



## TÍTULO

**MONITORIZACIÓN Y EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA  
TECNOLOGÍA DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIA COMO  
FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE EN DOS ÁMBITOS  
FAMILIAR E INDUSTRIAL EN BOLIVIA**

## AUTOR

**Oliver Campero Rivero**

<b>Director Institución</b>	<b>Esta edición electrónica ha sido realizada en 2013</b> Manuel Jesús Díaz Blanco (Universidad de Huelva) Universidad Internacional de Andalucía Tesis Doctoral
<b>ISBN</b>	978-84-7993-920-5
©	Oliver Campero Rivero
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
<b>Fecha Lectura</b>	05/06/2012



## Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas

### Usted es libre de:

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

### Bajo las condiciones siguientes:

- **Reconocimiento.** Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciadador (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
- **No comercial.** No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
- **Sin obras derivadas.** No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.
  
- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
- *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
- *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*



Universidad  
de Huelva

“Monitorización y Evaluación comparativa de la tecnología de Biodigestión anaerobia como fuente de energía renovable en dos ámbitos familiar e industrial en Bolivia”

Tesis Doctoral  
Oliver Campero Rivero  
Huelva, 2011



*Monitorización y Evaluación comparativa de la tecnología de Biodigestión anaerobia como fuente de energía renovable en dos ámbitos familiar e industrial en Bolivia*

Memoria presentada por el Ingeniero Oliver Campero Rivero optar al grado de Doctor Ingeniero por la Universidad Internacional de Andalucía

(firma)

Oliver Campero Rivero  
La Rábida (Huelva) 2011

Manuel Jesús Díaz Blanco, Profesor Titular de Universidad adscrito al Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Química Orgánica de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva,

INFORMA:

La memoria titulada *“Monitorización y Evaluación comparativa de la tecnología de Biodigestión anaerobia como fuente de energía renovable en dos ámbitos familiar e industrial en Bolivia”* que, para optar al grado de Doctor por la Universidad Internacional de Andalucía presenta D. Oliver Campero Rivero, ha sido realizada bajo mi dirección. Considerando que este trabajo presenta todos los requisitos para su defensa como Tesis Doctoral, autorizamos su presentación en la Universidad Internacional de Andalucía

Vº Bº Director de la Tesis

Dr. Manuel Jesús  
Díaz Blanco

La presente Tesis Doctoral cumple los requisitos exigidos por la legislación vigente



ÍNDICE	
Lista de Abreviaturas	I
Agradecimientos	III
Dedicatoria	V
Resumen	VII
Summary	IX
I. INTRODUCCIÓN	
I.1. RESIDUOS: GENERACIÓN Y GESTIÓN	3
I.1.1. Conceptos básicos sobre residuos	4
I.1.2. La problemática de los residuos sólidos orgánicos	5
I.1.3. Los residuos orgánicos en contexto urbano y rural	7
I.1.3.1. <i>Generación de residuos en Bolivia</i>	7
I.1.3.2. <i>Producción per-cápita y composición física de los residuos en el departamento de Cochabamba</i>	8
I.1.3.3. <i>Los residuos orgánicos de ganadería y matadero</i>	12
I.1.4. Tecnologías aplicadas en reutilización de los residuos orgánicos	18
I.1.5. Aspecto medioambiental del manejo de residuos	22
I.1.6. Aspectos socio-económicos del manejo de residuos	23
I.1.7. Marco político y legal del manejo de residuos	24
I.2. BIOMASA Y ENERGÍAS RENOVABLES	26
I.2.1. La biomasa como energía renovable	28
I.2.2. La energía rural en Bolivia	30
I.2.3. La energía renovable en Bolivia	34
I.2.4. Impactos de las energías en el ecosistema	36
I.3. BIODIGESTION ANAEROBIA	39
I.3.1. Revisión histórica	39
I.3.2. Generación de Biogás	41
I.3.2.1. <i>Fases en la Fermentación anaeróbica</i>	41
I.3.2.2. <i>Microbiología y bioquímica de la digestión anaerobia</i>	43
I.3.2.3. <i>Parámetros determinantes en el proceso de generación de biogás</i>	44
I.3.2.4. <i>Balances en la fermentación anaeróbica</i>	49
I.3.2.5. <i>Purificación y utilización del biogás</i>	50
I.3.3. Clasificación de los reactores utilizados para la biodigestión anaerobia	51
I.3.3.1. <i>Reactores de primera generación</i>	51
I.3.3.2. <i>Reactores de segunda generación</i>	53
I.3.3.3. <i>Reactores de tercera generación</i>	53
I.3.3.4. <i>Reactores de bajo coste</i>	55
I.3.4. Antecedentes de biodigestores de bajo coste en Altiplano	56

II. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	
II.1. OBJETIVOS GENERALES	61
II.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	62
II.3. PLAN DE TRABAJO	63
III. MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	
III.1. RESIDUOS UTILIZADOS	67
III.2. BIODIGESTORES: INSTALACIÓN Y SISTEMAS EXPERIMENTALES	68
III.2.1. Dimensionamiento del biodigestor	69
III.2.2. Materiales Utilizados en el biodigestor de bajo coste	70
III.2.3. Descripción de los modelos experimentales utilizados	73
III.2.3.1. Área industrial (nivel industrial de mataderos)	73
III.2.3.2. Área rural (nivel familiar)	76
III.3. METODOLOGÍA ANALÍTICA Y ESTADÍSTICA	77
III.3.1. Toma de muestras	77
III.3.2. Temperatura	77
III.3.3. Determinación del pH	77
III.3.4. Sólidos totales, volátiles y sedimentables	78
III.3.5. Demanda química de oxígeno (DQO)	78
III.3.6. Nitrógeno Kjeldhal	78
III.3.7. Fósforo total (P <sub>T</sub> )	79
III.3.8. Cationes (Na, K, Ca, Mg, Cu y Zn).	79
III.3.9. Composición de biogás	79
III.4. ESTUDIOS EN COMUNIDADES	80
III.5. ESTUDIOS ESTADÍSTICOS	82
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
IV.1. VALORACIÓN DE LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE LA ZONA RURAL DEL VALLE, DE BOLIVIA.	
IV.1.1. Análisis estadístico de los ítems	
IV.1.2. Análisis de fiabilidad	
IV.1.3. Discusión de las encuestas	
IV.2. RESULTADOS EN ÁREA RURAL (NIVEL FAMILIAR)	97
IV.2.1. Elección y funcionamiento del biodigestor	97
IV.2.2. Seguimiento de los parámetros medidos	99
IV.2.2.1. <i>Temperaturas de entrada, salida e interna</i>	99
IV.2.2.2. <i>Seguimiento del pH</i>	105
IV.2.2.3. <i>Humedad del sustrato</i>	108
IV.2.2.4. <i>Emisión de gases</i>	111
IV.2.3. Optimización del sistema	116
IV.3. RESULTADOS A NIVEL INDUSTRIAL (MATADERO)	121
IV.3.1. Elección de los biodigestores	121
IV.3.2. Seguimiento de los parámetros medidos	124
IV.3.2.1. <i>Temperaturas</i>	124
IV.3.2.2. <i>Seguimiento del pH</i>	129
IV.3.2.3. <i>Seguimiento de la evolución de los gases</i>	131



IV.3.2.4. Seguimiento de la evolución de la humedad interna, oxígeno y dióxido de carbono de los biodigestores	133
IV.3.2.5. Seguimiento de la evolución del CH <sub>4</sub>	135
IV.3.2.6. Equilibrio hidráulico y tiempo de retención hidráulico (TRH)	140
IV.3.3. Optimización del sistema	142
IV.4. INTERACCIONES TECNOLÓGICAS ENTRE LOS DOS SISTEMAS	153
IV.4.1. Potencial metodológico de la tecnología de biogás en dos diferentes escenarios	153
IV.4.2. Interacciones y sinergias entre las tecnologías a distintos niveles en Bolivia	155
V. CONCLUSIONES	161
V.1. LA ENERGÍA RURAL EN LA COMUNIDAD DE LA MAICA, PROVINCIA CARRASCO DE COCHABAMBA, BOLIVIA	162
V.2. SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN EN CONDICIONES FAMILIARES	163
V.3. SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN INDUSTRIALES (MATADEROS)	164
VI. BIBLIOGRAFÍA	167
VII. ANEXOS	186



## LISTA DE ABREVIATURAS

AGV	Ácidos grasos volátiles
ATP	Adenosina trifosfato
B1	Biodigestor numero 1
B2	Biodigestor numero 2
B3	Biodigestor numero 3
CAPS	Contaminantes Aéreos Peligrosos
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CFI	Comparative Fit Index
CH4	Metano
C/N	Relacion Carbono nitrogeno
CPE	Constitución Política del Estado Bolivia
CPTS	Centro de promoción de tecnologías Sostenibles
CSTR	Reactor de tanque continuo agitado
COD	Conversión orgánica de digestión
CORDEPAZ	Cooperación de desarrollo de La Paz
DBO	demanda Bioquímica de Oxigeno
DQO	Demanda Química d Oxigeno
DS	Decreto Supremo
EMAUQ	Empresa Municipal de Aseo Quillacollo
EMSA	Empresa Municipal de Saneamiento Básico
FAFSS	fermentación anaeróbica en la fase semi-sólido
GERES	Empresa Gestión de Residuos Sólidos
GFI	Goodness Of Fit Index
GIRS	Unidad de Gestión Integral de Residuos Sólidos
GM	Gobiernos Municipales
GN	Gas Natural
GLP	Gas Licuado de Petróleo
GRS	Gestión de Residuos Sólidos
GTZ	Entidad de Cooperación Alemana
HDPE	High-density polyethylene
HFC	Gases hidrofluorocarbonos
IFI	Incremental Fit Index
IIDEPROQ	Instituto de Investigación de proyectos químicos
INE	Instituto Nacional de Estadística
INER	Instituto nacional de Electrificación Rural
IPCC	Panel Internacional del Cambio Climático
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
LCFA	Ácidos Grasos de cadena larga
LEL	Límite explosivo inferior
LDPE	Low-density polyethylene
LUV	Luz ultravioleta
LTD	Termoaislante

MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MS	Materia seca total
msnm	Metros sobre el nivel del mar
MO	Materia Orgánica
NB	Normas Bolivianas
PBG	Plantas de Beneficio de Ganado
PEBD-LDT	Polietileno de baja densidad (Low Density Polyethylene)
PFC	Gases perfluorados
PPC	Producción Per Capita
PVC	Poli-vinil-cloruro
Senasag	Servicio Nacional de Inocuidad agrícola
SD	Sólidos diluidos
SST	Sólidos Totales
RASIM	Reglamento Ambiental para el Sector Industrial Manufacturero
RCE	Reducciones Certificadas de Emisiones
RMP	Red-mud-plastic
RP	Residuos Peligrosos
RRSS	Residuos Sólidos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
OLADE	Organización Latinoamericana de Desarrollo
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONG	Organización no Gubernamental
OP	Operadores privados
OSC	Organismo Sectorial Competente,
RMSEA	Root Mean Square Error of Approximation
SAS	Statistical Analysis System
SS	Sólidos sedimentables
TRSB	Tiempo de Retención de los Sólidos Biológicos
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
TRC	Tiempo de Retención Celular
TLI	Tucker-Lewis Index
UASB	Reactor Anaerobio de flujo ascendente y Capa de Lodo
UNIA	Unidad Nacional de Inocuidad alimenticia)
VD	Volumen del Digestor
VOCS	Concentraciones de componentes orgánicos volátiles
WTE	Waste to Energy
Φ	Diámetro

## Agradecimientos

Mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que de una u otra forma me han ayudado a llegar aquí, y de forma muy especial:

Al profesor Dr. Manuel Jesús Díaz Blanco, director de este trabajo de tesis, por todas sus ideas, consejos, comentarios y ayuda tanto en la parte experimental como en la teórica, por las innumerables correcciones del documento de tesis, y en resumen por todo el apoyo que me ha dado, tanto en el ámbito científico como en el personal, durante todos estos años.

Al Prof. Dr. John Beckman Abransom por sus ánimos y apoyo continuo, por sus consejos científicos y por ser el tutor innato durante más de 10 años, desde mis primeros pasos en la investigación de la biodigestión anaerobia, en la maestría de Economía Ecológica, que fue la base para iniciar este viaje investigativo desde el año 2000 y por las correcciones del inglés.

A la Universidad Internacional de Andalucía, UNIA por la beca de formación personal de investigador que he disfrutado durante la etapa presencial, con apoyo en estudios y alojamiento para el desarrollo de la primera parte del proyecto "Monitorización de sistemas de tratamiento de residuos orgánicos mediante biodigestión en reactores flexibles", básico para la realización del presente trabajo.

A la Universidad de Huelva (UHU) por la calidad y prestancia de educación que imparte a sus alumnos doctorantes.

A los comunarios, propietarios y trabajadores de las granjas colaboradoras, en el área rural de Bolivia que aportaron para el mejoramiento de la tecnología usada así como por los datos recolectados en las encuestas y por su amabilidad.

A mis padres, a mis hermanas, y mis dos hijos por animarme a continuar, y hacerme sentir siempre que estaban ahí, y por todo su apoyo, y pedirles disculpas por todas esas horas, fines de semana y vacaciones que le he robado para dedicarlas a este trabajo, gracias por todo.



## DEDICATORIA

A la persona que sola logro hacer de un niño una persona de bien, y de grandes valores, deseando que esas enseñanzas sean asimiladas por mis hijos Santiago y Damián para que en un futuro puedan seguir la senda de la virtud personal,

..... a mi admirable Madre.





## RESUMEN

Bolivia, actualmente, es un país con grandes problemas estructurales entre los que destaca la falta de fuentes y correcta distribución de los recursos energéticos. Este hecho provoca una grave limitación para el desarrollo fundamentalmente en el área rural. La presente investigación pretende desarrollar y optimizar la tecnología de biorreactores de bajo coste para la obtención de biogás para su implementación en esa área. Con ello se pretende lograr una mejora de la calidad de vida de poblaciones rurales y obligadas a vivir en un subdesarrollo por falta de oportunidades que brinden energía descentralizada de bajo costo y renovable.

El presente documento es el resultado de una investigación realizada durante dos periodos 2007–2010 con el objetivo de analizar la influencia de las variables más importantes en el desarrollo de biodigestores en altiplano a una altura de 3800 msnm en condiciones de invierno.

El estudio se ha dividido en tres grandes bloques. El primer bloque es el análisis de la valoración de las necesidades energéticas de la zona rural de Cochabamba, con el fin de conocer la realidad rural de Bolivia. Además este estudio implica un análisis técnico de los residuos existentes y características para producir energía a través de la transformación de los residuos orgánicos en biogás. Se demuestran las necesidades energéticas de las zonas rurales estudiadas, donde las fuentes de energía son escasas e ineficientes por lo que la obtención y uso de biogás a partir de los residuos y desechos producidos puede representar importantes beneficios sociales y ambientales, especialmente. En el segundo y tercer bloque se analiza y optimizan biodigestores utilizando residuos de matadero y de estiércoles de ganado vacuno en dos contextos uno familiar y otro industrial.

En el ensayo a nivel familiar, la optimización de sistema se realizó en base a la determinación del volumen y producción de biogás bajo diferentes condiciones de temperatura ambiente y alturas de instalación del biodigestor, tomando la temperatura interna, de salida y entrada del biodigestor. El análisis experimental incluyó las siguientes variables: se hicieron mediciones de los siguientes parámetros de funcionamiento del digestor: pH, Temperatura, humedad y composición del biogás obtenido ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ). La materia prima utilizada para este estudio fue la mezcla de residuo orgánico de ganado vacuno en un 95% y un 5% humano.

La temperatura exterior al biodigestor no presenta una gran influencia en el funcionamiento del mismo si el control de temperatura interna es eficiente. Siendo las condiciones de operación más idóneas una temperatura interna promedio de 36°C, un tiempo de retención hidráulico de 40 d con la carga de sustrato al sistema (materia prima a degradar) de 20 kg d<sup>-1</sup>. En estas condiciones el gas de obtenido contiene entre 55 y 70 % de metano, y entre 30- 45 % de CO dado que el contenido energético del metano puro es 8556.2 Kcal m<sup>-3</sup>, en condiciones estándar de presión y temperatura.

El ensayo a nivel industrial se desarrolló en matadero de La Paz, ubicada en la vereda de la autopista La Paz - El Alto. El experimento comprendió tres biodigestores de plástico; 1 en polietileno de invernadero y dos biodigestores en geomembrana de PVC. El análisis de las condiciones de funcionamiento de un sistema de biogás con el uso de residuos de matadero se realizó en invierno al considerarse que eran las más desfavorables. Los resultados mostraron que se presenta mayor producción de biogás, y niveles de pH cercanos al punto neutro. Los digestores con temperatura interna mayor se genero la mayor cantidad de biogás.

Por otra parte, a mayor porcentaje de sólidos totales la cantidad de biogás producido se mantiene constante, cuando la temperatura conserva esta misma tendencia, y además, se pudo determinar también la gran influencia que tiene el pH, la temperatura y la humedad en la producción de biogás para este tipo de influente y de digestor.

Los resultados obtenidos muestran que, en un proceso semicontinuo como es el de los biodigestores en PVC, el comportamiento de digestión de los reactores anaerobios, con porcentajes menores al 25,2% (valor más alto en promedio obtenido por los biodigestores) existe un efecto sinérgico alcanzando valores máximos de 6,45 Lbiogás d<sup>-1</sup> y de 546,06 L<sub>CH<sub>4</sub></sub> kg<sub>SV</sub><sup>-1</sup>, por lo que las condiciones de aplicabilidad de los biodigestores han sido influenciados por el incremento de la temperatura y en especial por las mezclas en la composición de la alimentación a los biodigestores.

Palabras clave: Energía, fuentes alternativas de energía, biodigestor, biogás.

## SUMMARY

Bolivia is a country which suffers from severe structural problems, one of the most serious of which is a lack of adequate sources and an adequate distribution of energy. This puts major constraints on development, above all in rural areas. The aim of the research described here is to develop and optimize the technology of low cost bioreactors which can produce biogas, principally for rural use. By this means we hope to improve the quality of life for the inhabitants of rural villages who are forced to live in a state of underdevelopment due to the lack of the opportunities offered by decentralized, low-cost, renewable energy.

This document is the result of research carried out during two periods between 2007 and 2010, whose overall objective was to analyze the influence of the most important variables on the performance of biodigestors in the altiplano at a height of 3800m above sea level in winter conditions.

The study is divided into three main sections. The first section is an analysis of the evaluation of the energy needs of the rural area of Cochabamba, as the basis for understanding the realities of rural Bolivia. This study also entails a technical analysis of the organic residues available, and the characteristics of the techniques used to transform the residues into biogas.

We show the energy requirements of the rural areas under study, where sources of energy are few and inefficient so that the production and use of biogas from organic residues and waste can yield major social and environmental benefits.

In the second and third sections we analyze and optimize the biodigestors, using slaughterhouse waste products, and cow dung in two different contexts: one industrial and the other domestic, respectively.

In the trials on a domestic scale the system was optimized by measuring the volume and the composition of biogas while varying the ambient temperature and the height of the biodigestor, taking the internal temperatures at the entrance and the exit to the digestion chamber. The experimental analysis included the following variables, measuring the following parameters relevant to the functioning of the biodigestor: pH, temperature, humidity and composition of the biogas ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ). The input material used in this study was a mixture of cow droppings,

95%, with human faeces, 5%. The outside temperature around the biodigester has relatively little influence on its output if there is efficient control of the internal temperature. The optimum operational conditions are a mean internal temperature of 36°C, a dwell time for the working fluid within the biodigester of 40 days, with an input rate of input material of 20

kg day<sup>-1</sup>. Under these conditions the gas produced contains between 55% and 70% of methane, and 30%-45% of CO. The energetic content of pure methane is 8556.2 kcal m<sup>-3</sup> at standard temperature and pressure.

The study at industrial level was carried out at the La Paz slaughterhouse, close to the La Paz-El Alto motorway. The experimental set-up consisted of three plastic biodigestors, one of greenhouse quality polyethylene, and two made of PVC "geomembrane". The analysis of the working conditions of the biodigestors in the slaughterhouse was carried out in winter, in order to sample the least favourable conditions. The results showed that the largest quantities of biogas were generated when the pH was close to neutral, a condition which was reached in these trials when the temperature was highest. Another result was that increasing the proportion of solid input did not raise the rate of biogas production when the temperature was kept constant. We were able to determine the ways in which varying the pH, the temperature and the humidity had on the biogas output from this type of input materials and in this type of biodigester. Quantifying these results we showed that in a semi-continuous process, of the type which takes place in a PVC digester, the behavior of the digestion in these anaerobic reactors with percentages near to 25.2%, (the highest value obtained on average for the biodigestors), there is a synergetic effect which yields maximum values of 6.45 litres of biogas per day, and 546.04 L<sub>CH<sub>4</sub></sub> kg<sub>SV</sub><sup>-1</sup> of solid input, where we see that the productivity of the biodigestors has been affected by the rise in temperature, and in particular by varying the mixture in the composition of the feedstock to the biodigestors.

Keywords: energy, alternative energy sources, biodigester, biogas

# I. INTRODUCCIÓN



# INTRODUCCIÓN

La generación de desechos orgánicos a nivel mundial crece exponencialmente (Figura 1). A medida que las poblaciones aumentan su número, principalmente en países en vías de desarrollo, se están generando grandes cantidades de residuos que no tienen manejo o disposición adecuada, generando problemas ambientales y de salud. De tal manera que los problemas globales de contaminación ambiental han pasado a ocupar, sobre todo la contaminación de residuos orgánicos, uno de los temas de mayor actualidad, por la importancia que tienen para la vida en la tierra y la perpetuidad de la especie humana (Fernández y Sánchez, 2007).

En ese sentido, se viene dando una búsqueda intensa de tecnologías que puedan servir de ayuda al estado actual de gestión de los residuos.

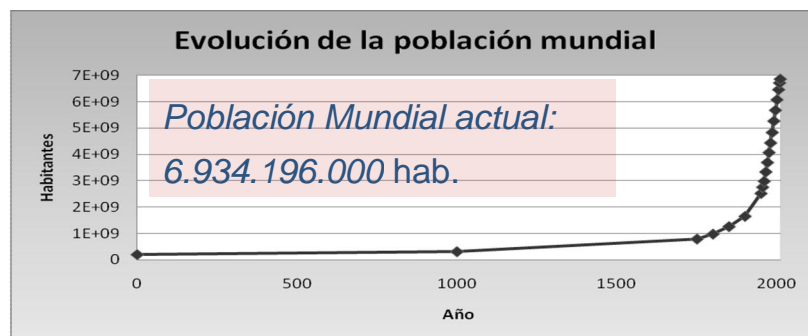


Figura 1. Evolución de la población mundial

Fuente: Elaboración propia

## I.1. RESIDUOS: GENERACIÓN Y GESTIÓN

Desde finales del siglo XVIII cuando se inicia la Revolución Industrial, gracias al desarrollo de la ciencia y la técnica, surgen nuevas actividades humanas netamente industriales. Se produce entonces una auténtica explosión demográfica y económica que se manifiesta en el imparable desarrollo de la humanidad en todos los aspectos.

Pero es a partir del siglo XX, y especialmente en su segundo tercio, debido a la expansión de la economía basada en el consumismo, en especial en países desarrollados, donde la cultura del usar y tirar se establece como norma. Es en esta

época cuando el problema de la gestión de residuos empieza a tomar proporciones críticas y a generar un gravísimo impacto en el medio ambiente.

Los cambios socioeconómicos de las últimas décadas, las altas concentraciones de población en núcleos urbanos, el desarrollo de la industria agroalimentaria, la intensificación de las explotaciones ganaderas, las prácticas consumistas, etc., han dado lugar a la generación grandes cantidades de residuos.

### I.1.1. Conceptos básicos sobre residuos

Los residuos son originados por los organismos vivos, como desechos de las funciones que éstos realizan, por los fenómenos naturales derivados de los ciclos y por la acción directa del hombre. Muchos de ellos tienen un efecto negativo y prolongado en el entorno, en muchos casos por la propia naturaleza físicoquímica de los desechos (Fernández y Sánchez, 2007).

Los residuos, según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) se definen, como “aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado un valor económico en el contexto en que fueron producidas, debido tanto a la inexistencia de tecnología adecuada para su aprovechamiento, como a la inexistencia de mercado para los productos recuperados”.

Hontoria y Zamorano (2000), según su estado físico pueden ser sólidos, líquidos, gaseosos y pastosos, proporcionan un comentario: desde el punto de vista de su estructura química, el origen y el destino final potencial de los residuos se pueden clasificar:

1) Residuos orgánicos, son aquellos que en algún momento tuvieron vida, formando parte de un ser vivo o derivan de los procesos de transformación de combustibles fósiles. Se pueden clasificar a su vez en:

- *Putrescibles*: Proviene de la producción o la uso de materias naturales. Por su grado de humedad tienen un alto índice de biodegradabilidad.
- *No putrescible*: Características biológicas han sido modificadas hasta el grado que, en determinadas ocasiones, pierden su biodegradabilidad. Normalmente son combustibles. Estos pueden ser a su vez:

a) *Naturales*; Como papel, cartón, textiles, etc.



b) *Sintéticos*; Residuos no biodegradables, provienen de procesos de síntesis petroquímica como plásticos, fibras sintéticas, etc.

- 2) Residuos inertes, son no biodegradables e incombustibles. Proviene de la extracción, procesamiento o utilización de los recursos minerales, como de la construcción, demolición, etc.
- 3) Residuos peligrosos, son residuos orgánicos o inertes que por sus características físicas, químicas o biológicas, no pueden ser acoplados a procesos de recuperación o transformación convencionales.

Otra posible clasificación de los residuos es según su fuente productora:

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| a) Residuos urbanos      | b) Residuos agrícolas, ganaderos y forestales |
| c) Residuos mineros      | d) Residuos sanitarios                        |
| e) Residuos radiactivos  | f) Residuos de construcción y demolición      |
| g) Residuos industriales |   |

En la presente tesis, nos centraremos en los grupos a) y b) susceptibles de ser tratados mediante digestión anaeróbica. De esta manera:

1. Residuos urbanos, se conocen como basura urbana. Se producen en los núcleos de población e incluyen los domésticos, comerciales e institucionales (oficinas, parques, jardines, etc.)
2. Residuos agrícolas, ganaderos y forestales. Se producen en su entorno natural y abarcan los siguientes grupos:
  - Residuos agrícolas
  - Residuos ganaderos
  - Residuos forestales
  - Residuos de industrias agropecuarias.

### I.1.2. La problemática de los residuos sólidos orgánicos

La generación de residuos sólidos, en especial los de naturaleza orgánica, en su mayoría RSU, lodos de depuradora, estiércoles y podas, tiene una triple repercusión medioambiental: contaminación, desperdicio de recursos y necesidad de espacios para su disposición final.

Estos residuos, al ser acumulados o abandonados de forma incontrolada, crean una evidente problemática ambiental, ya que al no tomar medidas preventivas contaminan los medios receptores (aire, suelos y aguas), afectando de una forma importante al paisaje, con la consiguiente depreciación del terreno y deterioro del

entorno. Los residuos constituyen además un problema social, cuya gestión medioambiental y económica necesita encontrar soluciones urgentes que eviten su incidencia ambiental negativa (Figura 2. a,b,c,d).

a) Vertederos o vertederos



b) Ríos contaminados



c) Residuos orgánicos



d) Aguas contaminadas



Figura 2. Fotos del vertedero de Tolata y Río Sulti, próximo al vertedero

Fuente: Situación Actual de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia/2009 (Swiss Contac, 2010)

Cabe destacar tres aspectos importantes en la problemática ambiental de los residuos sólidos orgánicos:

- Los riesgos sanitarios al existir una alta probabilidad de contraer o transmitir enfermedades o lesiones a través del contacto con las basuras, si no se recogen y eliminan adecuadamente.
- Los depósitos incontrolados de basuras generan la presencia de roedores, insectos y otros agentes portadores de enfermedades. También producen impactos negativos sobre los cuerpos de agua del entorno, ya que los líquidos lixiviados pueden alcanzar y contaminar fuentes superficiales o subterráneas de agua potable o de riego.
- El deterioro y contaminación del entorno que producen las grandes acumulaciones de basura dispersas en el territorio de forma incontrolada.

La escasez de recursos económicos en la gran mayoría de los municipios impide adoptar las soluciones más adecuadas. Por lo que la recuperación de materiales y desechos existentes en los residuos alcanza cada día mayor auge, debido a la crisis de energía, al encarecimiento de las materias primas y al aumento de precio que algunas de ellas han experimentado.

Todo ello ha conducido a considerar seriamente la posibilidad de recuperación y/o reciclado de materiales, una vez que las basuras han sido descargadas en las plantas de tratamiento, e incluso antes, mediante la puesta en marcha de campañas de recuperación previa a través de la colocación de contenedores específicos.

### I.1.3. Los residuos orgánicos en contexto urbano y rural

El conocimiento de los orígenes y los tipos de residuos orgánicos, así como la composición y las tasas de generación, es fundamental para optar por el tipo de gestión más adecuado. Así la cantidad de residuos producidos en un núcleo urbano es muy variable, entre los que se destacan los siguientes:

- Nivel de vida de la población
- Época del año
- Modo de vida de la población
- Movimientos de la población

Villegas (1990), señala consideraciones económicas e institucionales para explicar la disminución o el estancamiento en la prestación del servicio de gestión y disposición de los residuos sólidos domésticos e industriales. Estima que la población de América Latina y el Caribe producen diariamente 220.000 toneladas de residuos sólidos, alcanzándose a recolectar el 70% de la producción urbana y a disponer sanitariamente sólo el 14% de estos. Los recursos limitados para financiar las actividades de gestión y otras restricciones han llevado a muchas comunidades rurales y pequeñas comunidades a perseguir la regionalización como un medio para implantar la gestión integral de residuos y otros programas de gestión regional.

#### I.1.3.1. Generación de residuos en Bolivia

En Bolivia los datos exactos sobre la emisión de residuos, formados fundamentalmente por desechos orgánicos, y sobre todo de aquellos emitidos por el ganado de diferentes especies, son muy ambiguos y carecen de exactitud, el

INE (Instituto Nacional de Estadística) es la única institución que realiza un seguimiento a estos datos.

La principal fuente de procedencia de generación de residuos sólidos fue la domiciliaria con 625.542 t, los mercados 51.429 t, áreas públicas 49.719 t, los establecimientos de salud 4.767 t y otros (industria, madereros, etc.) 46.120 t.

Sin embargo no existe en la actualidad un análisis sobre la cantidad detallada de residuos orgánicos que emiten por departamento o por región, simplemente existen aproximaciones de estas cantidades. Datos estadísticos muestran como los residuos urbanos en Bolivia se incrementan linealmente, de tal manera que en los últimos en 6 años se incrementó cerca del 25%, sobre el total de lo producido en 1999, es por esto que se debe analizar más a detalle los datos sobre la contaminación antropogénica y sobre todo la generada por los residuos sólidos orgánicos.

Aparte de los datos expuestos por el INE, es necesario hacer énfasis en los residuos no declarados, por ejemplo, se estima que en nuestro país existen entre 10-15 mataderos clandestinos por cada matadero legal, vale decir que el incremento de desechos orgánicos de alto grado contaminante es un problema alarmante en Bolivia (Senasag, 2005).

#### *1.1.3.2. Producción per-cápita y composición física de los residuos en el departamento de Cochabamba*

En el Departamento de Cochabamba (Tabla 1), el índice mayor de producción de residuos sólidos se registra en Villa Tunari con  $0,62 \text{ kg hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$  siendo el menor en el municipio de Capinota con  $0,29 \text{ kg hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . Los datos han sido recopilados de estudios de Swiss Contac (2010). En el siguiente cuadro se muestran los índices de Producción Per-Cápita (PPC) para los municipios de Cochabamba.

A partir de los datos, se ha agrupado a los municipios según la categoría poblacional a la cual pertenecen y luego calculado los promedios ponderados por cada categoría (Tabla 2), dando como resultado los siguientes índices:

Tabla 1. Cochabamba, (PPC) de residuos sólidos urbanos (kg hab<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>).

Nº	Municipio/Capital	Categoría	PPC	Fuente/Estudio
1	Cochabamba	Capital	0,51	Empresa Municipal de Servicios de Aseo (EMSA)
2	Sacaba	Mayor	0,47	Empresa Gestión de Residuos Sólidos (GERES)
3	Quillacollo	Mayor	0,53	Empresa Municipal de Aseo Quillacollo (EMAUQ)
4	Tiquipaya	Intermedio	0,53	Unidad de Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS)
5	Colcapirhua	Intermedio	0,45	Dirección de Medio Ambiente/2007
6	Vinto	Intermedio	0,31	Gestión Integral de Residuos Sólidos para el Municipio de Vinto
7	Sipe Sipe	Menor	0,31	Sistema de Recolección, Transporte y Disposición Final de los Residuos Sólidos, para el área urbana del Municipio.
8	Capinota	Menor	0,29	Estimado/2009
9	Santiváñez	Menor	0,32	Gestión de Residuos Sólidos del Eje Metropolitano de Cochabamba
10	Arbieto	Menor	0,48	Sistema de Gestión de Residuos Sólidos en el Municipio de Arbieto.
11	Tarata	Menor	0,37	Recolección, Transporte y Disposición Final de Residuos Sólidos/2007
12	Cliza	Intermedio	0,46	Manejo de Residuos Sólidos en la Mancomunidad del Valle Alto
13	Tolata	Menor	0,46	Manejo de Residuos Sólidos en la Mancomunidad del Valle Alto
14	Punata	Intermedio	0,56	Manejo de Residuos Sólidos en la Mancomunidad del Valle Alto
15	San Benito	Menor	0,32	Manejo de Residuos Sólidos en la Mancomunidad del Valle Alto
16	Arani	Menor	0,42	Gestión Integral de Residuos Sólidos en la Mancomunidad de Municipios del Cono Sur
17	Vacas	Menor	0,50	Gestión Integral de Residuos Sólidos en la Mancomunidad de Municipios del Cono Sur
18	Mizque	Menor	0,53	Gestión Integral de Residuos Sólidos en la Mancomunidad de Municipios del Cono Sur
19	Aiquile	Menor	0,41	Gestión Integral de Residuos Sólidos en la Mancomunidad de Municipios del Cono Sur
20	Colomi	Menor	0,30	Estimado/2009
21	Independencia	Menor	0,27	Estimado/2009
22	Morochata	Menor	0,40	Estimado/2009
23	Villa Tunari	Menor	0,62	Plan de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos para Villa Tunari
24	Chimoré	Menor	0,38	Estimado/2009
25	Ivirgarzama	Menor	0,44	Estimado/2009
26	Entre Ríos	Menor	0,38	Estimado/2009
27	Tiraque	Menor	0,42	Manejo de Residuos Sólidos en el Centro Poblado de Tiraque

Fuente: Situación Actual de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia/2009 (Swiss Contac, 2010)

Tabla 2. Cochabamba, índice PPC por categoría poblacional

Categoría	PPC Promedio (kg hab <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
Capital	0,51
Mayor	0,50
Intermedio	0,46
Menor	0,40
Promedio	0,47

Fuente: Situación Actual de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia/2009 (Swiss Contac, 2010)

Se estima que la generación total en el departamento de Cochabamba aproximadamente asciende a 750 t d<sup>-1</sup>, representando el 19% de la generación total de Bolivia. La composición de los Residuos Sólidos de los 28 municipios, 22 cuentan con estudios de caracterización, en su mayoría corresponden al período

2005-2007 (Figura 3). Al igual que en el resto de las ciudades capitales y municipios, la fracción orgánica fermentable representa en promedio el 66% del total generado los residuos inorgánicos reciclables o valorizables, compuesto por los plásticos, papeles, cartones, metales y vidrios, representan en promedio el 16% del total y la fracción otros residuos representan el 18%.

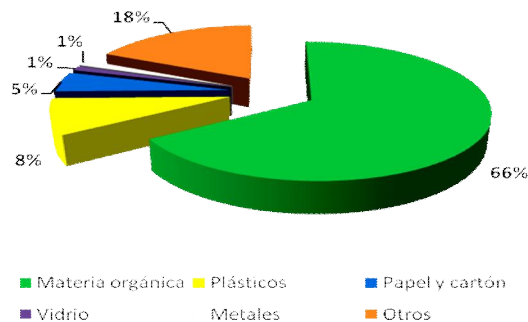


Figura I.3. Composición física de residuos sólidos en Cochabamba.

Fuente: Situación Actual de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia/2009 (Swiss Contac, 2010)

Mostrándose tan baja la capacidad de valorización y/o correcta adecuación de estos residuos en Departamento de Cochabamba, se puede afirmar que el tratamiento de residuos orgánicos es una necesidad que debe solucionarse antes de que el sistema colapse y se generen más problemas en especial con los residuos orgánicos (66%).

En este contexto, son de relevancia los residuos agropecuarios que son, en Bolivia, fundamentalmente generados en pequeñas explotaciones. Y cuyos residuos (humanos, animales y vegetales) tienen especial incidencia por la diseminación de la generación y por el alto impacto ecológico que pueden suponer.

Especial incidencia puede hacerse con los residuos orgánicos de origen animal (excrementos y residuos de matadero) debido a la casi nula gestión que de estos residuos se realiza y las características específicas (biosanitarias e higiénicas) que presentan. Es la ganadería una de las actividades que inciden de una forma más significativa sobre el medio ambiente de los municipios rurales. Tradicionalmente la gestión y eliminación de residuos agropecuarios ha sido una actividad realizada sin exigencias legales ni fines de aprovechamiento. Esto es debido a que la agricultura está poco tecnificada y la ganadería ocurre de manera extensiva, dispersando los

residuos generados. Cuando esta actividad se hace más intensiva, la gestión de los residuos agropecuarios debe contemplar la incineración de los vegetales residuales de los cultivos y cosechas y la gestión adecuada de las excretas de los animales de granja.

La distribución de Mataderos con Registro Sanitario nacional se muestra en la Tabla 3, exponiéndose la distribución del ganado bovino en Bolivia en la Figura 4. Del análisis de estos datos se puede deducir la deficiente gestión que, en algunos departamentos, se le da a este tipo de residuos. Por ejemplo se observa que en distrito de Beni de los 18 mataderos sólo el 44,4% tiene registro sanitario cuando en ese distrito se genera casi el 50% de los residuos de matadero.

Tabla 3. Mataderos con Registro Sanitario (RS) nacional.

Distrital	Total	Con RS	% con RS
La Paz	2	1	50
Cochabamba	14	2	14,3
Santa Cruz	33	14	42,4
Beni	18	8	44,4
Tarija	15	4	26,6
Chuquisaca	11	2	18,2
Potosí	6	0	0
Oruro	1	1	100
Pando	1	0	0
TOTAL	101	32	31,6

Fuente: Senasag, 2006. R.S. (registro sanitario) UNIA

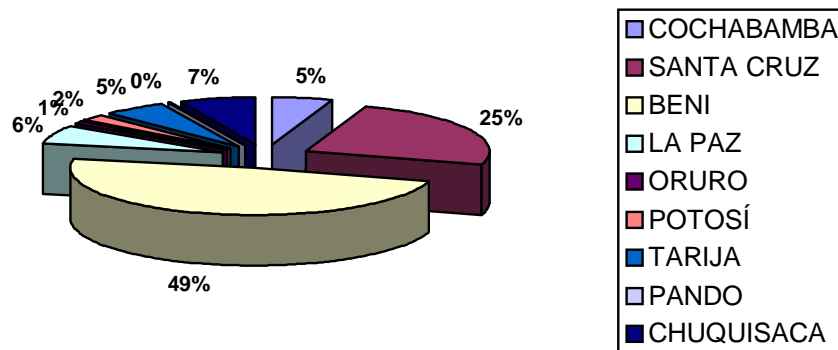


Figura 4. Distribución del ganado bovino en Bolivia

Fuente: Anuario estadístico 2008, INE

Los residuos agropecuarios presentan algunas propiedades favorables que pueden dar origen a su aprovechamiento en los sectores energético, agrícola, ganadero e industrial. Entre esas propiedades se hallan el alto poder calorífico, la riqueza en materia orgánica y el potencial de aprovechamiento como materia prima en procesos industriales. La propiedad energética más importante es el

poder calorífico, cuyo valor, para algunos residuos agropecuarios, oscila alrededor de 2,000 y 5,000 kcal kg<sup>-1</sup>. También, los residuos agropecuarios presentan propiedades favorables para su incorporación al suelo agrícola, como:

- Riqueza en materia orgánica.
- Nutrientes N, P, K, también en oligoelementos.
- Abundancia de agua.
- Fuente de microorganismos necesarios para el suelo.

Para lograr el correcto aprovechamiento agrícola de los residuos, se hace necesario un proceso de fermentación para la obtención de un producto final con una materia orgánica estable que al llegar al suelo, pueda mineralizarse y mejorar las propiedades del mismo.

En el campo de los residuos de origen agrícola y ganadero existen desde tecnologías simples hasta muy sofisticadas para el tratamiento de los mismos. En este caso, debido a las características de los residuos y a las necesidades de los agricultores y ganaderos, la gestión de los residuos tiende hacia el aprovechamiento de los mismos, acelerando los procesos naturales, generando, entre otras cosas, energía (por incineración o por digestión anaerobia), mejoradores del suelo (por compostaje), alimentos para otros animales y materias primas para procesos de transformación.

### 1.1.3.3. Los residuos orgánicos de ganadería y matadero

Los residuos de la ganadería en Bolivia se reflejan en la Tabla 4.

Tabla 4. Población de ganado bovino por zonas geográficas (#Cabezas).

Año	Trópico	% (*)	Valles	% (**)	Altiplano	% (***)	Total
1995	4.066.327	72.8	980.824	17.6	633.220	9.6	5.669.321
1996	4.178.610	72.9	1.007.109	17.6	644.306	9.5	5.730.025
1997	4.308.664	73.0	1.033.791	17.6	666.485	9.4	5.808.940
1998	4.430.991	73.1	1.061.344	17.6	670.447	9.4	6.002.782
1999	4.551.901	73.1	1.090.103	17.6	684.339	9.4	6.226.343
2000	4.661.563	73.2	1.119.204	17.6	699.079	9.4	6.399.906
2001	4.808.935	73.2	1.149.409	17.6	613.734	9.3	6.572.078
2002	4.042.083	73.2	1.178.630	17.6	629.089	9.3	6.749.799
2003	5.076.541	73.2	1.209.156	17.4	645.118	9.3	6.930.815
2004	5.215.746	73.3	1.240.177	17.4	661.662	9.3	7.117.585
2005	5.368.899	73.3	1.277.998	17.6	677.475	9.3	7.314.372

Fuente: CPTS (2008)

\* Trópico: Beni, Pando, y Santa Cruz

\*\*Valles: Cochabamba, Chuquisaca y Tarija

\*\*\*Altiplano: La Paz, Oruro y Potosí



En Bolivia la generación de residuos está enmarcada en un crecimiento vertiginoso (Tabla 5), como demuestra las siguiente estadísticas (INE, 2003), donde se muestra la relación del ganado existente en las zonas rurales de nuestro país.

Tabla 5. Diferentes tipos de ganado en Bolivia.

Ganado	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Caprinos	1.500.000	1.496.210	1.496.210	1.500.000	1.500.00	1.500.000
Vacuno	5.730.025	5.808.940	6.002.782	6.226.343	6.399.906	6.572.078
Camelidos	8.028.922	8.232.036	8.409.124	8.574.545	8.751.920	8.752.00

Fuente: CPTS (2008)

En base a datos del INE se puede observar la cantidad de estiércol de animales en que puede generarse en la región donde se realiza la investigación (Tabla 6) y comprobar la demanda de gestión de residuos existentes en las distintas regiones.

La problemática asociada a la gestión de los residuos orgánicos de origen ganadero se debe, básicamente, a la separación progresiva de la explotación ganadera y la agrícola, de forma que la mayoría de las explotaciones no poseen una base territorial suficiente para reutilizar los residuos ganaderos. Esto, junto con el aumento del censo ganadero, la disminución de la superficie agrícola útil, y el aumento de las dimensiones de las explotaciones ganaderas, hace equiparable el sector ganadero, con la industria en cuanto a la problemática de gestión de residuos (Danés *et al.*, 1996).

Tabla 6. Población de ganado y cantidad de estiércol en la región.

Ganado	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Caprinos	4500,36	4488,93	4488,93	4500,45	4500,67	4500,67
Vacuno	91765,29	93567,31	95801,4	98340,45	100868,85	100875
Camélidos	9191,25	9250,00	9250,00	9500,00	9500,00	9500,00
Ovinos	24116,80	24696,105	25227,40	25723,63	26255,76	26256,00
Total kg	129573,29	132002,35	134767,73	138064,08	141124,61	141131,00
m <sup>3</sup> Biogás d <sup>-1</sup>	5248,31	5351,03	5468,73	5598,74	5728,26	5728,52
m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> d <sup>-1</sup>	3148,98	3210,61	3281,24	3359,25	3436,96	3437,11

Fuente: Elaboración propia, en base a datos del INE, 2003.

Bolivia es un país en crecimiento, y su potencial agropecuario ha crecido en los últimos 5 años en un 40%, en ganado vacuno y en especial el sector lechero que es ahora sobre todo en las principales cuencas lecheras un foco alto de contaminación, estos sectores son La Paz, Cochabamba, y Santa Cruz, es así que

este vertiginoso incremento a no va en consonancia con la capacidad del medio para poder alcanzar el equilibrio deseado y no romper la estabilidad de los recursos naturales.

Tradicionalmente, en las zonas andinas el estiércol se usa como abono y como combustible. Así, una parte de las excretas se acumula en el mismo establo durante largos periodos de tiempo, para utilizarse posteriormente en la preparación del terreno en el periodo de pre-siembra. Este tipo de manejo puede conllevar pérdidas importantes de nitrógeno (N) por volatilización, lixiviación, y nitrificación-desnitrificación (Rufino, 2006). El resto de las excretas, una vez secas (lo que se conoce como bosta), se utiliza como combustible para la cocción de alimentos, especialmente en zonas con escasez de leña a causa de la deforestación y de los climas fríos.

El beneficio del ganado es una actividad económica de gran importancia, provee al consumidor alimentos ricos en proteínas; Las Plantas de Beneficio son las intermediarias entre la ganadería y el consumidor final, al preparar y disponer en las debidas condiciones de sanidad e higiene los productos de unos para el consumo de otros. Las Plantas de Beneficio de Ganado (PBG), son el eslabón central de la cadena que une al productor ganadero con el consumidor de la carne y sus derivados, llevando los productos del campo a los hogares, permitiendo a la población acceso alimentos (Figura 5).

Paralelamente a los beneficios que brindan las PBG, están los impactos ambientales que genera su actividad, como la contaminación de cuerpos de agua, suelos y la emisión de gases, ruido y olores, generados por ineficiencias en el uso del agua y la energía y el manejo inadecuado de los residuos.

La escala de la producción en las PBG puede ser cuantificada empleando bases de cálculo como el número de cabezas procesadas, peso en vivo que ingresa al proceso o el peso en caliente de la carne en canal producida.

Es innegable que con respecto a los aportes medioambientales de la actividad de sacrificio de animales al desarrollo sostenible de Bolivia; como lo demuestran las siguientes cifras:

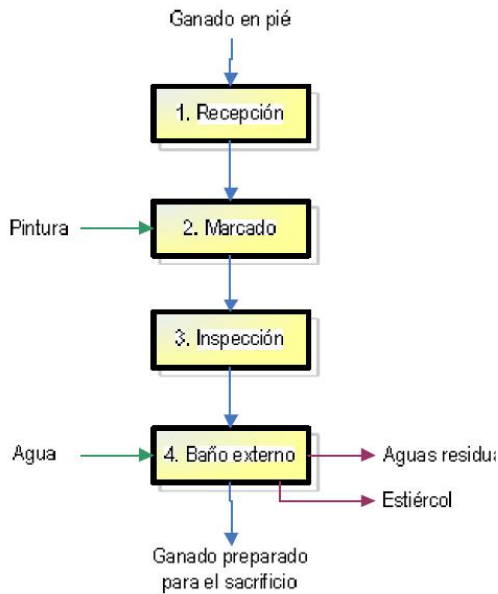


Figura 5. Proceso de beneficiado de ganado (PGB).

Fuente: Programa Ambiental ANAM – PAN – BID, 2005.

- El 97% de los mataderos en el país no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales adecuado.
- El 90% vierte sus aguas residuales directamente a un cuerpo de agua, al alcantarillado o a campo abierto.
- El 84% vierte el contenido ruminal directamente a los cuerpos de agua o en campo abierto.
- El 33% no hace en lo absoluto ningún uso de la sangre resultante de los procesos de sacrificio y faenado.

En general, para transformación primaria existen en el país 32 mataderos en las clases III a IV y planchones (pequeñas centrales de sacrificio), los cuales procesan más de 50% del consumo nacional y abastecen tanto los mercados locales como la demanda de ciudades próximas.

En la mayor parte de estas plantas no existen programas de gestión ambiental, ni planes de aseguramiento del proceso. Se carece de la capacidad instalada y técnica para hacer un control del vertimiento sólido y líquido que generan los procesos de sacrificio y faenado del ganado.

La actividad de beneficio de ganado ocasiona impactos ambientales considerables si los diferentes procesos y los residuos que en éstos se generan, no son manejados de manera adecuada; los impactos están especialmente relacionados en la generación de emisiones al medio (Figura 6) como lo demuestra el Programa Ambiental ANAM – PAN – BID, 2005.

Es común encontrar dentro de las PBG ineficiencias que afectan negativamente el desempeño económico y ambiental de su operación; por ejemplo, las fugas de agua.

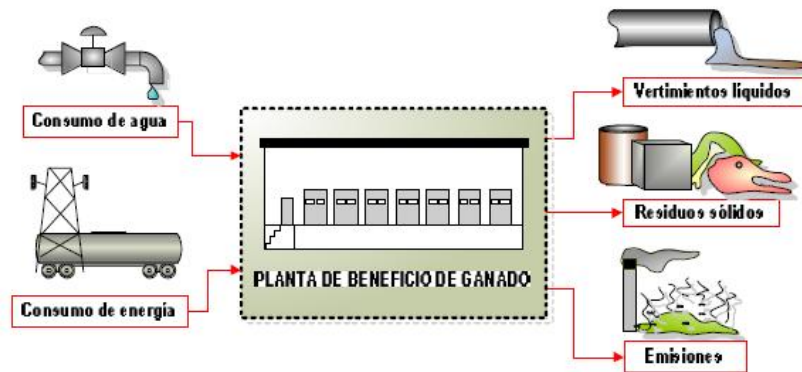


Figura 6. Impactos ambientales en Plantas de beneficio de ganado

Fuente: Programa Ambiental ANAM – PAN – BID, 2005

Las corrientes líquidas generadas son comúnmente mezcladas en un sistema único de drenaje de aguas residuales; las características generales del vertimiento resultante son:

- Carga orgánica elevada, expresada como la Demanda química de oxígeno DQO, debido a la presencia de sangre, grasas, rumen y estiércol.
- Elevada DBO<sub>5</sub>, por los altos contenidos de sangre y agua-sangre.
- pH variable por causa del uso de limpiadores alcalinos y ácidos.
- Niveles considerables de nitrógeno, fósforo y sales disueltas.
- Altas concentraciones de (Sólidos Totales) SST y (Sólidos diluidos) SD.
- Temperaturas relativamente altas, por la descarga de condensados.

La composición de las aguas residuales de las PBG, al igual que su caudal, varía en el tiempo, dependiendo de las operaciones que se estén llevando a cabo: sacrificio de ganado o limpieza general de las instalaciones, las aguas residuales del sacrificio, tratamiento de vísceras. Aunque en general presentan cargas orgánicas elevadas, alta turbidez y color, las aguas residuales de lavado tienen una menor carga pero son de mayor caudal, con elevados niveles de cloruros y desinfectantes. El volumen de los vertimientos líquidos es un reflejo del consumo de agua: se estima que entre el 80% al 95% del agua consumida se convierte en aguas residuales.

La mayor parte de los residuos sólidos generados en el beneficio de ganado están constituidos por los subproductos: vísceras, sebos y órganos y/o tejidos no comestibles, las retenciones de las inspecciones, el estiércol sólido recogido de los corrales y el rumen extraído del tracto digestivo. Los subproductos son materiales

que se descomponen con rapidez y su mal manejo fácilmente genera problemas de olores, presencia de moscas, roedores, bacterias y virus, que son un foco de generación de enfermedades.

Las situaciones de mal manejo de los residuos sólidos más comunes que se encuentran en las PBG son:

- *Acumulación de residuos putrescibles*: Los residuos sólidos producidos en el sacrificio y el procesamiento de vísceras se descomponen con facilidad a temperatura ambiente, sobretodo en climas cálidos, dando paso a la generación de malos olores y al crecimiento de microorganismos patógenos.
- *Mezcla de residuos sólidos con aguas residuales*: Residuos valorizables como el estiércol y el rumen son desaprovechados cuando se diluyen en las aguas residuales, aumentando a la vez la carga contaminante de éstas.
- *Disposición al aire libre o en fosas improvisadas*: Cuando los residuos sólidos se disponen a cielo abierto o en fosas sin ninguna adecuación especial generan problemas de contaminación de suelos, infiltración de lixiviados hacia acuíferos, malos olores y proliferación de vectores (Figura 7).
- *Grandes volúmenes*: El tratamiento o disposición de los residuos sólidos acarrea costos de capital y costos operativos que aumentan en la medida que los volúmenes generados sean elevados.
- Otras emisiones de la PBG son gases de combustión, olores y ruido estas emisiones atmosféricas generadas en las PBG se ilustran en la Figura 7.

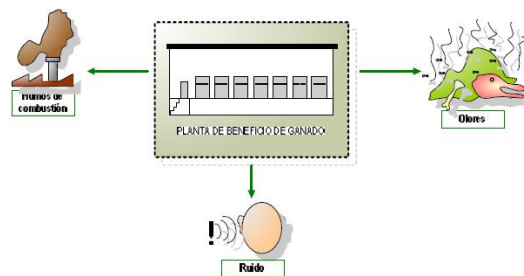


Figura 7. Emisiones atmosféricas generadas en las en PBG

Fuente: Programa Ambiental ANAM – PAN – BID, 2005

En esta los gases de combustión se originan por la combustión en las calderas. Las emisiones de sustancias tóxicas son mayores cuando se usan combustibles pesados como aceites. Los olores se producen por un manejo inadecuado de los subproductos al no ser procesados o evacuados de inmediato. El ruido es

generado por el tránsito de los camiones transportadores de ganado, la descarga y manejo de los animales y por las herramientas de corte.

#### I.1.4. Tecnologías aplicadas en reutilización de los residuos orgánicos

Las propiedades físicas, químicas y biológicas que poseen los residuos son básicas para un correcto diseño y desarrollo de sistemas de gestión de estos, así como las transformaciones que pueden afectar a su forma y a su composición.

Existe un variedad de tratamientos para el adecuado de los residuos orgánicos, tratamientos que buscan un objetivo básico como es el de aumentar la capacidad de gestión sobre el residuo.

Los objetivos particulares pueden ser (Flotats *et al.*, 2000):

- ✓ Adecuar la producción de residuos a las necesidades de los cultivos.
- ✓ Transportarlo fuera de la zona de aplicación del plan de gestión.
- ✓ Valorar económicamente el residuo.
- ✓ Adecuar la composición a los requerimientos del entorno (de suelos, de cultivos, de mínimo impacto ambiental - malos olores).
- ✓ Extraer y recuperar nutrientes valorizables (nitrógeno, fósforo).
- ✓ Higienizar –reducir o eliminar patógenos.
- ✓ Generar subproductos energéticos y nutrientes.

En este sentido, tanto los residuos agrícolas como los agropecuarios potencialmente contaminan con nitrógeno, fósforo, materia orgánica y metales pesados. Las tecnologías propias de la gestión integral de los residuos agropecuarios mantienen afinidad con las alternativas de valorización de materia orgánica (Solans, 1998) que se exponen en la Tabla 7.

Los Procesos de transformación utilizados en la gestión de residuos orgánicos pueden implicar:

Transformaciones físicas: En la operación de sistemas de gestión de residuos sólidos las principales transformaciones físicas que se pueden producir incluyen:

a) Separación de componentes; Es el término utilizado para describir el proceso de separación, por medios manuales y/o mecánicos, de los componentes identificables de los RS no seleccionados. Se utiliza para transformar los residuos heterogéneos en un número de componentes más o menos homogéneos.

b) Reducción mecánica de volumen; Conocido como densificación, es el término utilizado para describir el proceso por el cual se reduce el volumen inicial del residuo, mediante la aplicación de una fuerza o presión.

c) Reducción de tamaño mecánica; Utilizados para reducir el tamaño de los materiales residuales. El propósito de este proceso es obtener un producto final que sea razonable uniforme y considerablemente reducido en tamaño en comparación con su forma original (ANAM – PAN – BID, 2005).

Tabla 7. Tratamientos aplicables a los residuos orgánicos.

Proceso de transformación	de	Medio o método de Transformación	Productos obtenidos de la transformación
<b>Físicos</b>			
1. Separación componentes	de	Manual mecánica	y/o Componentes individuales encontrados
2. Reducción volumen	en	Aplicación de energía en forma de fuerza	Reducción del Volumen de los residuos orgánicos
3. Reducción Tamaño	de	Aplic. de energ. en para trituración	Alteración de forma y reducción de tamaño
<b>Químicos</b>			
1. Combustión		Oxidación térmica	Dióxido de Carbono, dióxido de azufre y otros
2. Pirolisis		Destilación	Corriente de H <sub>2</sub> , CO, alquitrán y combustible carbonoso
3. Gasificación		Destructiva Combustión	Un gas de bajo poder calorífico, combustible con carbono
<b>Biológicos</b>			
1. Aerobio		Conversión Biológica aerobia	Compost (material para mejorar el suelo)
2. Digestión anaerobia		Conversión Biológica aerobia	Metano CH <sub>4</sub> , dióxido de carbono y otros gases
3. Compostaje Anaerobio		Conversión Biológica aerobia	Metano CH <sub>4</sub> , dióxido de carbono, y residuos digeridos

Fuente: Elaboración Propia

Transformaciones químicas; Las transformaciones químicas de los residuos sólidos normalmente implican un cambio de fase (por ejemplo, sólido a líquido, sólido a gas, etc.). Para reducir el volumen y/o recuperar productos de conversión, los procesos para transformar los residuos sólidos son:

a) Combustión (oxidación química); Es la reacción química del oxígeno con materias orgánicas para producir compuestos oxidados, acompañados por emisión de luz y una rápida generación de calor. En presencia de oxígeno en exceso y bajo condiciones idóneas.}

- b) Pirolisis; Como la mayoría de las sustancias orgánicas son térmicamente inestables pueden romperse en fracciones gaseosas, líquidas y sólidas, mediante una combinación de cracking térmico y reacciones de condensación en un ambiente libre de oxígeno.
- c) Gasificación; Este proceso implica la combustión parcial de un combustible carbonoso para generar un gas combustible rico en monóxido de carbono, hidrogeno y algunos hidrocarburos saturados, principalmente metano. El gas combustible entonces se puede quemar en una caldera o en un motor de combustión interna.

Transformaciones biológicas; Las transformaciones biológicas de la fracción orgánica de los residuos sólidos se pueden utilizar para reducir el volumen y el peso del material; para producir compost (material similar al humus), y para producir metano. Los principales organismos implicados en las transformaciones biológicas de residuos orgánicos son bacterias, hongos, levaduras y actinomicetos (ANAM – PAN – BID, 2005).

Estas transformaciones pueden utilizarse aeróbicamente o anaeróbicamente, según la disponibilidad de oxígeno. Los procesos biológicos que se han utilizado para la conversión de la fracción orgánica de los residuos sólidos son:

- a) Compostaje aerobio; La fracción orgánica de los residuos sólidos sufre descomposición biológica.
- b) Digestión anaerobia. La porción biodegradable de la fracción orgánica de los residuos sólidos se puede convertir biológicamente bajo condiciones anaerobias en un gas que contiene dióxido de carbono y metano.

Existen otros procesos de transformación biológica, que se están desarrollando y evaluando, entre ellos tenemos a los procesos de digestión anaerobia de sólidos de alta concentración. Por el que se produce la fermentación con un contenido de sólidos totales de aproximadamente el 22% (ANAM-PAN-BID, 2005). Las ventajas que tienen este proceso, por un lado más bajos requisitos de agua y una tasa más alta de producción de gas por unidad de volumen del tamaño del biorreactor.

También es interesante la codigestión que consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes, con el objetivo de:



- Aprovechar la complementaridad de las composiciones.
- Compartir instalaciones de tratamiento.
- Unificar metodologías de gestión.
- Amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado
- Reducir costes de inversión y explotación, el término codigestión se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen.

La codigestión de residuos orgánicos de diferente origen ha resultado una metodología exitosa tanto en régimen termofílico como mesofílico (Tabla 8). Los residuos ganaderos, pueden ser una buena base para la codigestión ya que, generalmente, presentan un contenido en agua elevado, una alta capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de microorganismos anaerobios.

Tabla 8. Potenciales de producción de biogás con residuos orgánicos de la industria alimentaria y de la fracción orgánica de residuos municipales.

Residuos Orgánicos	Contenido orgánico	Sól. Volát. (%)	Producción de Biogás (m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> )
Intestinos + rumen	Hidratos de Carbono, proteínas, lípidos	15-20	50 - 70
Lodos de flotación	65-70% proteínas, 90-95% lípidos	13-18	90-130
Tierras filtrantes de aceites con bentonita	80% Lípidos, 20% orgánicos	40-45	350-450
Suero leche	75-80% lactosa, 20-25 proteínas	7-10	40-55
Suero concentrado	75-80% lactosa, 20-25 proteínas	18-22	100-190
Hidrolizados de carne y huesos	70% proteínas, 30% lípidos	10-15	70-100
Mermeladas	90% azucares, ácidos orgánicos	50	300
Aceite soja margarina	90% aceites vegetales	90	800-1000
Bebidas alcohólicas	40% alcohol	40	240
Lodos residuales	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	3-4	17-22
Lodos residuales concentrados	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	15-20	86-110
Lodos de separado en origen	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	20-30	150-240

Fuente: (Angelidaki y Ahring, 1997).

#### I.1.6. Aspecto medioambiental del manejo de residuos

El reciclaje consiste en el aprovechamiento de los materiales contenidos en los residuos para su posterior utilización en otros usos. Cada vez hay más posibilidades tecnológicas para reciclar. Los centros tecnológicos, de investigación, las universidades, las empresas tecnológicas, etc., han puesto a punto, y se encuentran disponibles en el mercado, una amplia oferta de nuevas tecnologías de reciclaje que abren perspectivas y posibilidades insospechadas hasta ahora.

Además de las ventajas medioambientales que supone una correcta gestión de residuos expuestas en los apartados anteriores (minimización de impactos, aprovechamiento de recursos, etc.), existe otro aspecto a tener en cuenta en el aprovechamiento- reciclaje de estos residuos como es la valorización energética.

La valorización energética, en la escala de jerarquía que clasifica las opciones de gestión de residuos de mayor a menor calidad ecológica, viene a continuación de la prevención, la reutilización y el reciclaje. En otras palabras, solo se debe valorizar energéticamente aquellos residuos que no se hayan podido evitar y que no sean ni reutilizables ni reciclables.

No todo aprovechamiento energético de un residuo debe ser calificado de valorización energética. Solamente si el poder calorífico del residuo, es decir, su contenido energético, es alto y se recupera mediante un proceso de alta eficiencia energética, puede hablarse en rigor de valorización energética.

En términos conceptuales y jurídicos, la valorización energética ha sido perfilada por el Tribunal de Justicia de Luxemburgo a través de sus sentencias C-228/00, de 13 de febrero de 2003; C-458/00, de 13 de febrero de 2003; y C-116/01, de 3 de abril de 2003, en las que establece un criterio adicional de carácter finalista o intencional: No se considera valorización energética la extracción de energía de un residuo, si la finalidad principal del proceso es la de deshacerse del residuo.

Actualmente, los recursos energéticos convencionales van siendo más escasos, por lo que se hace necesario utilizar las energías renovables de forma tecnológicamente correcta, entre ellas, el biogás, obtenido de la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es una alternativa de tratamiento que está en línea con el desarrollo sostenible. El proceso de la generación conjunta de electricidad y calor, representa una oportunidad medioambiental y tecnológicamente atractiva para aprovechar el biogás obtenido a partir de la codigestión, creando fuentes energéticas alternativas, dando así un paso importante para reducir el calentamiento global y su efecto invernadero, que provoca cambios climáticos incalculables y a menudo devastadores.

#### I.1.6. Aspectos socio-económicos del manejo de residuos

La problemática del manejo integral de los residuos sólidos está acompañada de oportunidades para el desarrollo sostenible, no sólo por el ahorro de los pasivos ambientales y los gastos en salud, sino también por las ventajas económicas y sociales producidas por la recuperación de materiales comerciales, la generación de nuevas fuentes de empleo y el cuidado con el medio ambiente (Fernández y Sánchez, 2007).

El manejo de los residuos origina también impactos económicos importantes asociados a los costos para su tratamiento y disposición final. La manera de encarar la problemática está relacionada con los conceptos actuales de evitarlos y minimizarlos.

Se ha llegado a decir que un residuo es, en realidad, una materia prima producida en un lugar inadecuado, en un momento inoportuno. En esto consiste la valorización, en el aprovechamiento de los contenidos materiales o energéticos de los residuos para un fin útil. Afortunadamente el hecho de que cada vez se encuentren más usos posibles de los residuos abre nuevas posibilidades de valorización. Los programas de investigación e innovación., llevados a cabo en los últimos años en este campo han sido muchos y cada vez más exitosos, lo que ha dado como resultado que hoy dispongamos de un amplio abanico de posibilidades nuevas de gestión mucho más ecológicas, e incluso económicas, para la mayoría de los residuos (ANAM – PAN – BID, 2005).

Los residuos que hace unos pocos años había que depositar inevitablemente en vertederos pueden en la actualidad ser valorizados de varias formas, podemos

incluso elegir entre diversas opciones de reutilización, reciclaje o valorización energética que puede generar reditos económicos interesantes.

#### 1.1.7. Marco político y legal del manejo de residuos

Las ventajas de la gestión integrada van desde la adecuación de la composición del producto final a un suelo o cultivo concreto, la mejora del proceso de tratamiento, y el abaratamiento de los costes de transporte. Por otra parte, la gestión en sí misma puede resultar más complicada al intervenir diversos productores de residuos, que incluso pueden proceder de sectores a nivel central.

En Bolivia los avances logrados son: el reglamento específico de la Ley de Medio Ambiente No. 1333, las Normas Bolivianas de Residuos Sólidos NB 742-760 y las Normas para RRSS Generados en Establecimientos de Salud NB 69001-69007. Las dificultades residen en lograr el cumplimiento de estas normas y reglamentos, por parte de las empresas agropecuarias.

Un tema pendiente actualmente, de relevante importancia es el proyecto de Ley de Residuos Sólidos, cuyo proceso de elaboración ya se ha iniciado. Las políticas y estrategias nacionales, deberían dar origen a planes departamentales de Gestión de residuos Sólidos (GRS) que apoyen su implementación. A nivel Local los GM, la autonomía y el carácter operativo de estos, los responsabilizan del manejo de los RS y en consecuencia de la prestación del servicio en forma directa o delegada, en este contexto, el déficit principal de este nivel, está en el manejo de la contratación de operadores semiprivados (OP); estos procesos no siempre han llegado a buen fin y muchos contratos se han rescindido, causando daños económicos considerables a los GM. La autonomía municipal, debería dar origen a la generación de reglamentos locales que definan derechos y obligaciones de las entidades gestoras, de los operadores, de los usuarios y de la comunidad respecto a la GRS.

Las políticas, el marco legal y las regulaciones existentes, para el manejo de residuos sólidos dentro el subsector están al inicio de sus planteamientos (Tabla 9). Las experiencias sobre todo del nivel municipal y la evaluación de la que forma parte el presente informe, constituirán parte de las bases para iniciar un proceso concertado entre la sociedad, los sectores, niveles y sistemas del estado

involucrados en la gestión de los residuos sólidos en procura de definir un marco nacional de políticas y estrategias.

La reglamentación ambiental vigente relacionada con los mataderos, está constituida por las siguientes disposiciones legales:

- Ley del Medio Ambiente, Ley 1333, de 27 de abril de 1992
- Reglamentos a la Ley del Medio Ambiente, de 8 diciembre de 1995
- Reglamento Ambiental para el Sector Industrial Manufacturero (RASIM), de 30 julio de 2002; La Ley del Medio Ambiente y sus reglamentos son de carácter general, y existen normativas específicas sectoriales. En el caso particular de los mataderos se tiene el Reglamento Ambiental del Sector Industrial Manufacturero, RASIM. Entre las partes más relevantes, relacionadas con las guías técnicas de producción más limpia, menciona:

Artículo 94. (Incentivos); A efectos del presente Reglamento se establecen los siguientes incentivos:

a) Financiamiento de proyectos de inversión, preinversión e investigación en producción más limpia.

b) Promoción de la aplicación de guías técnicas ambientales” “Artículo 96. (Instrumentos para acceder a incentivos).- Con el objeto de promover la producción más limpia, las Guías Técnicas Ambientales, y/o las certificaciones de Sistemas de Gestión Ambiental obtenidas a través de la norma NB-ISO 14001, se constituirán en documentos de referencia técnica para: 1) Acceder a incentivos y establecer acuerdos entre la industria y la autoridad y 2) Ser incorporados dentro del Plan de Manejo Ambiental.

Según la “Clasificación industrial por riesgo de contaminación” del RASIM los mataderos de reses están comprendidos en la subclase 15111 “Matanza de ganado bovino y procesamiento de su carne”. De acuerdo con esta clasificación, los mataderos de reses están en las Categorías 1- 4, dependiendo de su capacidad de faeno.

Tabla 9. Marco regulatorio del manejo de los residuos sólidos.

Instrumento Legal	Numero	Fecha	Incidencia en la GRS
Constitución Política de Bolivia	1585	24-11-2007	- Señala los derechos, deberes y garantías de las personas - Legisla las formas de ejercer autoridad - Autonomía de los gobiernos municipales y gobernaciones
Ley de Organización del poder ejecutivo	2446	24-11-2007	- Ministerio de servicios y Obras Publicas: Sector Servicios básicos
Ley de municipalidades	2028	28-10-99	Determina Competencias a los Gobiernos municipales -Reglamentar, fiscalizar y administrar el manejo de los RS - Preservar el medio ambiente y Aprobar tasas de aseo
Ley de Medio Ambiente	1333	23-08-92	Reglamenta el cuidado del medio ambiente Regl. el manejo de los residuos sólidos
Ley del sistema de regulación sectorial	1608	25-10-94	Define el saneamiento básico y los residuos sólidos
Ley de participación popular	1558	20-04-94	Reconoce, promueve y consolida la participación de la comunidad y les otorga personería jurídica Refuerza la universalidad del uso de los servicios básicos
Ley de servicios de agua potable y alcantarillado	2066	29-10-99	Promueve el uso de los RS parte del saneamiento básico Promueve el uso de los residuos como fuente de energía
Ley del Dialogo 2000	2235	31-07-2001	Establece la posibilidad de fondos en el saneamiento básico y medio ambiente.
Ley de creación del Senasag	2061	17-03-2000	Establece responsabilidad de los productos convertidos en residuos
D.S. Reglamento amb. del sector industrial	26736	30-07-2002	Reglamentación de actividades de las industrias que pueden contaminar el medio ambiente con residuos sólidos
Norma Boliviana de Residuos sólidos		11-96	Norma el uso y manejo de los residuos sólidos

Elaboración Propia: Fuente CPE Bolivia, Ley 1333 de Medio ambiente en Bolivia.

## I.2. BIOMASA Y ENERGIAS RENOVABLES

Considerando la energía como el combustible de la economía, es lógico entender que su crecimiento es el principal factor que favorece la demanda energética. El objetivo actual pasa por mantener economías que utilicen menos energías, mediante su diversificación y la aplicación del concepto de desarrollo sostenible. En este sentido, los recursos energéticos tienen una relación directa con la economía, el medio ambiente y el bienestar social. Por lo tanto, toda sociedad que pretenda consolidarse en el panorama socioeconómico mundial debe garantizar un suministro eficaz de energía para la satisfacción de las necesidades de desarrollo. El nivel de industrialización que tiene lugar en la sociedad actual,

cada vez más elevado y complejo, está actualmente localizado pocas zonas muy industrializadas con una demanda intensiva y muy parcial de las fuentes energéticas (Figura 8).

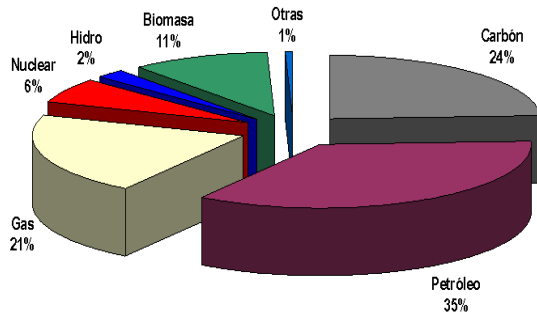


Figura 8. Fuentes actuales de energía.  
Fuente: IDAE, 1998

En la figura se observa que la mayor parte de la industria y el transporte dependen de los combustibles fósiles (80%).

Por otra parte, las energías renovables, son energías que se producen de forma continua y son inagotables a

escala humana, no consumen recursos finitos, y causan menos impactos medioambientales que los combustibles tradicionales. Entre ellas destacan: hidroeléctrica, solar, geotérmica, eólica, biomasa y el biogás entre las más importantes.

Son conocidas las consecuencias ambientales derivadas del uso de los recursos energéticos fósiles o convencionales. Si se une el hecho de que la población mundial va en aumento, la tendencia es consumir cada vez más energía, implica un mayor impacto sobre el medio ambiente. En la Figura 9, se muestra el consumo energético desde 1970 y una proyección hasta el 2020.

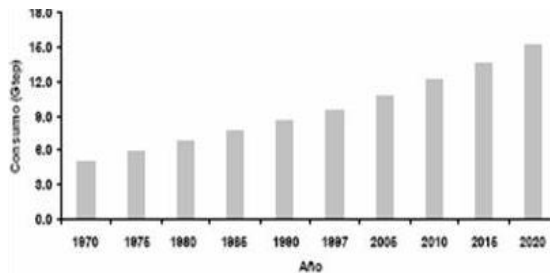


Figura 9. Consumo energético mundial.

Fuente: IDAE (1998)

Se observa en la figura anterior que durante las últimas décadas, el consumo de energía ha aumentado considerablemente. El problema es que las reservas de las principales fuentes energéticas son limitadas, implicando el desarrollo perentorio de tecnologías alternativas. Además, una de las consecuencias directas del uso de las

energías de origen renovable es la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>, lo que supone minimizar los efectos del calentamiento global y de la lluvia ácida.

El impacto que causa el uso de las energías no renovables no se produce únicamente durante su consumo, sino que todas las etapas de su ciclo de vida (desde que se extrae el recurso hasta que se utiliza la energía generada) son contaminantes. Entre los principales daños producidos sobre el medio ambiente destacan las emisiones atmosféricas, la contaminación de aguas y la generación de residuos sólidos; además de otro tipo de impactos: degradación del suelo, ruido, impactos paisajísticos, etc.

### I.2.1. La biomasa como energía renovable

Las energías renovables (ER) pueden representar una respuesta importante a la demanda generalizada de un modelo sustentable de progreso que no afecte a las generaciones futuras, dentro un enfoque de sostenibilidad. Además, las economías de escala alcanzadas como resultado de la mayor utilización de las ER, junto con el notable incremento en los precios de los combustibles fósiles observado durante la presente década, han mejorado su posición competitiva, abriéndoles mayores posibilidades (Torres y Gómez, 2006).

Las ER tienen una fuente prácticamente inagotable con respecto al tiempo de vida de un ser humano en el planeta y su aprovechamiento es técnicamente viable. Todas las fuentes de energía renovables combinadas contabilizan solo el 14% de la producción de energía en el mundo (Figura 8), del cual la energía hidroeléctrica provee el 90% de ellas y solo el 10% restante son las otras fuentes de energía renovable (Goswami y Kreith, 2007). Se observa entonces que existe una gran oportunidad para incrementar el uso de las otras fuentes energéticas, entre ellas la biomasa.

Una forma de producir energía es a través de la biomasa, para esto es necesario recordar que si bien los recursos de biomasa más conocidos son la leña y el carbón vegetal, no son los únicos. La biomasa comprende una extensa gama de materia biológica, cuya energía puede obtenerse en estado líquido mediante la fermentación de azúcares a través de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica.



El término *biomasa* incluye todos los materiales que producen energía provenientes de fuentes biológicas, tales como madera o residuos de madera, productos residuos de la pecuaria (cría de ganado), de la industria agroalimentaria, aguas residuales, residuos sólidos municipales (entre los que se encuentran los de matadero) y otros materiales biológicos. Cuando se usa la biomasa como fuente de energía se pueden obtener también beneficios sociales, económicos y ambientales. Si la biomasa proviene de residuos de productos (basura orgánica) los costos son usualmente bajos; esta fuente puede tener beneficios adicionales y evitar los costos de disposición de residuos (Capehart et al., 2003).

Abu-Qudais y Abu-Qudais (2000), afirman que a causa de la disponibilidad limitada de tierra en algunos países y algunos problemas ambientales asociados con los procesos del relleno sanitario -tal como las emisiones de gas y producción de lixiviados- la tecnología de los rellenos sanitarios necesita ser mejorada. Se sabe que en general los rellenos sanitarios se convierten en cementerios de basura sin utilización posterior alguna. Sin embargo, existe la posibilidad de recuperar energía de los residuos sólidos a través de dos mecanismos: el primero sería a través de su incineración - proceso conocido como conversión de Residuos-a-Energía (de sus siglas en inglés WTE, Waste-to-Energy), y el segundo por la recolección de gas metano y su empleo para la generación de energía eléctrica, sin olvidar la gran cantidad de residuo en equilibrio obtenido y usado como biofertilizante.

Marshall (2007), expone que cuando los componentes biodegradables de los residuos sólidos se descomponen, se libera biogás. Si no se captura ni se aprovecha, ese gas puede ser una fuente potente de gas de efecto invernadero y el principal contribuidor para el cambio climático. De hecho, según el Panel Internacional del Cambio Climático (IPCC) el metano tiene una equivalencia en cuanto a su contribución a este efecto de 21 veces la del CO<sub>2</sub> (Bitrán & Asociados, 2006).

Por lo tanto, la captura y combustión del metano en un quemador de biogás, un motor generador u otro dispositivo, resulta en una reducción neta sustancial de emisiones de gases con efecto invernadero. Los beneficios adicionales más allá de reducción de emisión de gas con efecto invernadero incluyen el potencial para la

mejora de la calidad de aire local a través de la destrucción de CAPS y VOCS a través de su combustión (EPA - LMOP, 1996). De acuerdo con la EPA (2008) también minimiza las emisiones locales de óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) el cual es responsable, según Strevett *et al.* (2002), de alrededor del 35% de la lluvia ácida y el principal contaminante del ozono.

Giugliano *et al.*, (2008) mencionan que los beneficios de la recuperación de energía de los residuos orgánicos son en gran parte indiscutibles, por los beneficios en sí mismos de la energía y las implicaciones ambientales positivas, relacionadas principalmente por el ahorro de la energía primaria derivada de combustibles fósiles.

### I.2.2. La energía rural en Bolivia

Bolivia es un país (sin salida al mar), situado en el centro de América del Sur, con una extensión territorial de 1.098.581 Km<sup>2</sup>. Geográficamente está ubicada entre los 9°38' y 22°53' de latitud Sur y 57°25' y 69°38' de longitud Oeste. Posee una baja densidad demográfica de Bolivia (1,5 hab km<sup>-2</sup>) con una población de aproximadamente 9.000.000 de habitantes, que influye y dificulta a la hora de brindar los servicios básicos y poder mejorar la calidad de vida sobre todo de las poblaciones en área rural.

En Bolivia aproximadamente un 43% de la población total vive en el área rural, en un contexto de diversidad geográfica, económica y organizacional diferente a la urbana; Por otra parte el 32% de esta población rural, se encuentra en centros poblados (2000 a 9000 habitantes) y el 68% en poblaciones dispersas (Guzmán, 2000).

Bolivia, país de grandes contrastes geográficos y ecológicos e indudablemente uno de los más diversos en su clima, topografía, vegetación natural y suelos, como también en el aprovechamiento que el hombre hace de estos recursos naturales básicos. Bolivia en área rural pese a encontrarnos en el siglo XXI tiene grandes problemas de satisfacción de necesidades básicas como la energía, que asemejan a estar en el siglo XIV.

En el contexto rural el acceso a la energía marca la diferencia en la calidad de vida de la población y mejora sus condiciones de sostenibilidad. Las familias rurales tienen un acceso limitado a la energía, usando pilas, velas y mecheros, pero en

términos reales, las familias rurales pobres pagan más por servicios de energía de baja calidad.

En el campo energético, desde el año 2005 el actual gobierno ha procedido con la nacionalización de la industria del gas natural (GN) y el petróleo, así como con la discusión y la aplicación de un nuevo modelo económico que intenta buscar mayor equidad y responsabilidad estatal con un principio de presencia del Estado en todos los sectores económicos y sociales del país. Así, Bolivia experimenta un proceso de redefinición de sus vínculos con la economía mundial y de reorganización de su estructura energética productiva, incorporando al Estado en la economía con un rol más protagónico.

El desarrollo a plenitud del potencial hidrocarburífero boliviano es el gran desafío de la nacionalización realizada y motivará que el país se constituya, en los hechos, en el eje de la integración energética gasífera del Cono Sur. El gasoducto a Brasil, así como los existentes al interior de Bolivia, y el de exportación a Argentina y sus respectivas ampliaciones a nivel interno y externo, constituyen la red más importante para el comercio gasífero en esta región, la cual en el futuro servirá para el transporte de GN no solo de Bolivia sino también de otros países.

Sin embargo ésta es solo una parte del escenario, que viene a ser complementado por la realidad de un área rural con una población dispersa, inconexa y aislada y marginada del mercado energético nacional. Este sector representa casi un 43% de la población del país con índices de desarrollo por debajo de los niveles aceptables mundialmente. En el área rural el abastecimiento de los hidrocarburos es muy escaso, particularmente el del Gas Licuado de Petróleo (GLP). De amplio uso a nivel urbano, el GLP solo está presente en los centros rurales más importantes, mientras que en el resto del territorio nacional sencillamente no existe disponibilidad de este combustible. La principal fuente energética en estas áreas dispersas y alejadas es la biomasa, que en promedio cubre el 80% de la demanda total rural de energía (existiendo algunas zonas donde este recurso cubre hasta el 97% de esta demanda), situación que no ha cambiado en los últimos 13 años (Fernández, 2010).

Las políticas públicas de la última década aún en un marco de liberalización de la economía, están marcadas por la intención de implementar y profundizar la

descentralización, en un marco de tendencia mundial para transferir responsabilidades del Estado Central a niveles más directamente involucrados con la población. Sin embargo a pesar de eso, la pobreza siguió creciendo y las diferencias entre pobres y ricos se fue haciendo cada vez más grande.

En el contexto de la Energía Rural en Bolivia, el acceso a la energía rural aún está basada en la utilización de mecanismos de mercado, los cuales están siendo no regulados paulatinamente, al declararse que lograr el acceso a los servicios básicos, como la electricidad para la población, es una obligación del Estado. La cobertura eléctrica en el país alcanza un 67%, mientras las ciudades tienen una cobertura entre 80% y 90%, en el área rural apenas llega a un 36%. La electrificación rural alcanza apenas a 38 kWh/mes por familia, una cantidad de energía que solamente permite un uso limitado de iluminación, radio y horas de televisión (Fernández, 2008).

En el año 2006, se estimó que unos 500.000 hogares rurales de Bolivia no tenían acceso a la energía eléctrica, muchos de ellos a ningún tipo de energía comercial. De éstos, cerca de 200.000 radican en localidades donde presumiblemente existe infraestructura eléctrica y por tanto su conexión corresponde a un proceso de incremento del servicio ya establecido. Así se estima, por otra parte, que unos 200.000 hogares rurales puedan ser atendidos mediante la utilización de energías renovables descentralizadas (fundamentalmente sistemas fotovoltaicos) y que unos 100.000 hogares puedan ser atendidos con sistemas aislados de mini redes con diversas fuentes (diesel, hidráulica, biomasa, sistemas híbridos, etc.). De estos aproximadamente se estima que unos 50.000 hogares (aquellas familias que cuentan con ganado vacuno y están en área rural) pueden utilizar tecnologías alternativas como la digestión anaeróbica.

Conceptualizando la energía y pobreza podemos ver que la población rural sin electricidad alcanza a 577.197 hogares de las cuales el 93% de ellas usan biomasa como principal combustible (leña o estiércol seco). Cuando se analiza el tema de la dispersión, se identifica que la población que vive en comunidades con menos de 120 familias son 608.854 que representa al 80% de toda la población rural. En éste segmento, la cobertura eléctrica es del 17,2% y el uso de biomasa alcanza al 81%. Si se desciende un nivel más en el análisis, se puede ver que las familias rurales

que viven en comunidades con menos de 60 familias son aproximadamente 577.000 familias de las cuales solo un 12,7% tiene acceso a la electricidad (Figura 10) y un 84,1% usa biomasa.

Por otro lado, el criterio para medir la pobreza en Bolivia se basa en las Necesidades Básicas Insatisfechas. Considerando el nivel de pobreza, se puede observar que el número de hogares rurales en condiciones de pobreza extrema, es muy próximo al número de hogares en el área rural que no cuentan con energía eléctrica, esto que implica que el 90,17% (520.450) de los hogares sin energía eléctrica del área rural corresponden a una situación de pobreza extrema (indigencia y marginalidad) (Fernández, 2010).

Finalmente se puede observar que la presencia de grupos poblacionales sin acceso a la electricidad, se encuentran, en una relativa densidad, sobre la franja de territorio occidental que ocupa la cordillera de Los Andes.

Cuando se analiza el tema poblacional en el área rural, salta a la vista los niveles de dispersión existentes. Se identifica que cerca de 600.000 familias viven en comunidades con menos de 120 familias, lo que representa el 80% del total de la población rural (Fernández, 2010).

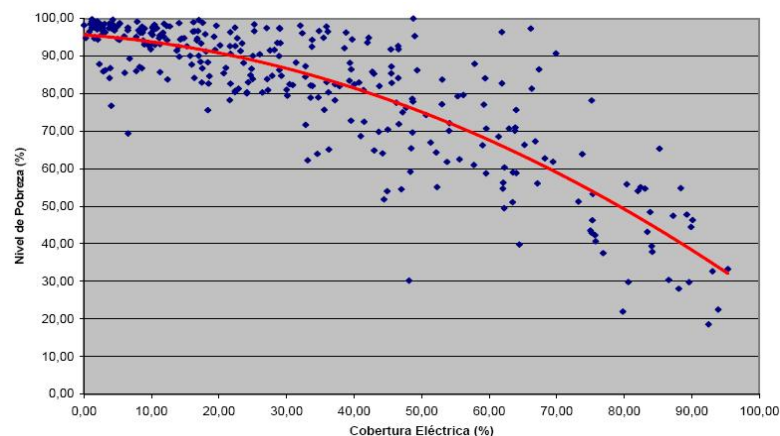


Figura 10. Municipios de Bolivia: Cobertura Eléctrica Vs. Nivel de Pobreza.

Fuente: Fernández, 2010

El abastecimiento de biomasa en hogares situados en comunidades dispersas, particularmente leña para la cocción de alimentos, se realiza por medio de la recolección. Un 82% de los hogares rurales recogen leña para su uso de bosques más o menos cercanos. El promedio de consumo por familia está estimado en 2,1t año<sup>-1</sup>. La recolección de esta leña autoabastecida implica sobre todo el trabajo

de mujeres, niños y niñas, quienes tienen como responsabilidad el suministro de este energético. Se estima que anualmente se emplean cerca de 89 horas/hombre/año por hogar para la provisión de leña.

Considerando un universo de 600.000 hogares que consumen leña, la cantidad de horas empleadas en este trabajo alcanza a 53,4 millones de h año<sup>-1</sup>. Las familias rurales perciben problemas respecto al uso tradicional de leña: i) la cada vez menor disponibilidad en el acceso; ii) el incremento de las distancias para conseguir el recurso; y iii) la falta de medios necesarios de transporte. También se hace notar que la actividad de recolección de leña es un trabajo excesivo, al que hay que dedicarle mucho tiempo (en función del piso ecológico).

Finalmente también se manifiestan sobre los inconvenientes que ocasiona su consumo, y mencionan el humo que se produce, en general, y el hollín que ensucia las casas. El impacto ambiental del uso de leña se presenta sobre todo en el interior de las viviendas rurales, como una contaminación in-door. Mediciones sobre la presencia de monóxido de carbono y material particulado (producto de la combustión de la leña) se han realizado en hogares rurales de Bolivia y muestran que en estos hogares se sobrepasan hasta en seis veces los niveles definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como peligrosos. La imposibilidad de sustitución de este energético por combustibles fósiles radica en la inaccesibilidad a las comunidades aisladas y/o los altos costos de transporte, así como en la irregularidad del abastecimiento.

### 1.2.3. La energía renovable en Bolivia

De acuerdo con CEPAL (2000), "en el contexto latinoamericano deberán explorarse aquellas opciones que respondan más adecuadamente a los requerimientos regionales, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos naturales, técnicos y financieros y para lograr un desarrollo sostenible".

En nuestra región existe un amplio potencial de uso en energías limpias y renovables, que sin embargo han sido percibidas por los gobiernos como algo marginal, limitado a los sectores rurales apartados. Pero aún así, ni siquiera ha habido un esfuerzo importante para difundir estas opciones en esas áreas. Por esto nuestros países (América Latina) deben analizar seriamente su potencial real en

materia de energías renovables, de bajo impacto ambiental, entre estas la eólica, solar, geotérmica, de biomasa, biogás y la minihidráulica.

La energía solar puede ser aprovechada de dos formas: como calor o mediante la producción de energía eléctrica a través de celdas fotovoltaicas. Como no todas las regiones tienen la misma radiación solar, cada una deberá determinar su importancia dentro de la canasta energética, pero prácticamente en todas se trata de una fuente energética potencialmente importante (Virreira, 1997).

La energía eólica en pequeña escala tiene una larga tradición en la región, en articular en molinos de viento para el bombeo de agua y en pequeños generadores de electricidad. El viento en la superficie contiene energía cinética de la que es factible recuperar como energía mecánica de rotación del orden de 25% (Virreira, 1997).

La energía directa de la biomasa (combustión) ha sido siempre una fuente importante de energía, que ha venido siendo desplazada por otras fuentes como los hidrocarburos y la energía hidráulica. El desafío actual consiste en aprovecharla de manera sostenible y eficiente. La sustentabilidad implica entonces que la biomasa utilizada sea reemplazada por nueva biomasa que continúe fijando el CO<sub>2</sub> atmosférico liberado. Dentro de las posibles opciones leña y carbón vegetal, residuos de biomasa y cultivos energéticos, quizá la más problemática sería esta última, dado que se tendería a la realización de cultivos a gran escala, con todos los impactos ambientales que éstos generan (como la erosión y la contaminación por agroquímicos). En el uso de leña, el desafío consiste en lograr un manejo sostenible de los bosques a lo que se suma, en el caso del carbón, la tecnificación en la producción del mismo para asegurar el máximo aprovechamiento de la madera. Los residuos de biomasa pueden constituir una fuente importante de energía, aprovechando residuos que no tienen otra utilidad, en particular los residuos urbanos (Virreira, 1997).

Otra fuente de energía de la biomasa degradable es mediante la generación de biogás. Este es uno de los tipos de energía que mejores resultados está teniendo en países en vías de desarrollo mediante el uso de biodigestores (Virreira, 1997).

La energía Geotérmica consiste en utilizar el agua o el vapor calientes provenientes del interior de la corteza terrestre, para mover una turbina y un

generador de electricidad. En nuestra región, constituye un importante componente energético dado que se trata de una fuente limpia y renovable al ser nuestra región rica en este recurso.

La energía hidroeléctrica continúa siendo una opción importante en materia de energías limpias y renovables. Para que a su vez tenga un bajo impacto ambiental, se requiere disminuir la escala y propiciar los aprovechamientos hidráulicos de pequeña escala, combinados con otros usos (agua potable, sistemas de riego), el impacto puede ser prácticamente nulo (Virreira, 1997).

#### 1.2.4. Impactos de las energías en el ecosistema

Los impactos ambientales del sistema energético debido a la gran cantidad de procesos presentes en las actividades de captación, transformación y uso de la energía, tienen una significativa incidencia sobre el medio ambiente.

También el agotamiento de los recursos no renovables provoca efectos adversos en el ecosistema. Limitándose a los procesos de producción energética, la generación de energía eléctrica a partir de fuentes fósiles emite a la atmósfera diversos compuestos contaminantes, entre ellos dióxido de azufre, óxido de nitrógeno y partículas, responsables de la acidificación del suelo y las aguas naturales, con repercusiones en la salud, las infraestructuras y los ecosistemas.

Estudios realizados en España muestran los resultados obtenidos en un estudio comparativo de los impactos medioambientales de las principales tecnologías renovables de producción eléctrica como muestra la Tabla 10 donde se indica los valores medios o intervalos de emisión unitaria ( $\text{g kWh}^{-1}$ ) de los tres principales compuestos contaminantes:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ .

Si estos valores se comparan con los que derivan de los impactos de las centrales convencionales, se obtiene diferencias significativas, claramente favorables a las tecnologías renovables. Según IDAE (1998), los resultados obtenidos en un estudio en el Reino Unido sobre impacto de centrales convencionales de carbón, fuel, gasoil y gas natural en el ciclo de vida completo, ponen de manifiesto que los valores de emisión unitaria asociadas son muy superiores en general entre 10 a 100 veces mayores, que los que se obtienen con tecnologías renovables.



Tabla 10. Comparación entre las emisiones de ciclo de vida de las tecnologías de producción eléctrica con las renovables (g kWh<sup>-1</sup>).

	Cultivos tecnol. actual	Gran hidráulica	Mini hidráulica	Solar fotovoltaica	Solar termo-eléctrica	Eólica	Geotérmica
CO <sub>2</sub>	17 - 27	9	3,6 - 11,6	98 - 167	26 - 38	7 - 9	79
SO <sub>2</sub>	0,07-0,016	0,03	0,009 - 0,024	0,20 - 0,34	0,13 - 0,27	0,02-0,09	0,02
NO <sub>x</sub>	1,1 - 2,5	0,07	0,003 - 0,006	0,18 - 0,30	0,06 - 0,13	0,02-0,06	0,28

Fuente: IDAE (1998)

Un beneficio asociado a la utilización de los residuos orgánicos para generar energía es la comercialización de los bonos de carbono, que se otorgan por la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nítrico, entre otros). Esto se origina en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en diciembre de 1997 bajo los términos del Protocolo de Kyoto, el cual Bolivia firmó como país miembro del Anexo II en junio de 1998 y la ratificó el 7 de septiembre de 2000.

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo sostenida en Junio de 1992, también conocida como la Cumbre de la Tierra, fue adoptada la Agenda 21 como el plan de acción necesario para la prosperidad continua de la humanidad en armonía con las otras criaturas vivientes sobre la tierra en el siglo 21.

La Agenda 21 está compuesta por cuatro secciones: a) Dimensiones sociales y económicas; b) Conservación y gestión de los recursos para el desarrollo; c) Refuerzo del papel de los principales grupos y d) Medios de implantación.

Estas secciones están subdivididas en un total de 40 capítulos que presentan planes de acción específicos en todos los campos.

Los planes de acción relativos a los residuos están presentados en dos capítulos; Capítulo 20: Gestión con enfoque ambiental de los residuos peligrosos, incluyendo la prevención de tráfico ilegal internacional de los residuos peligrosos y Capítulo 21: Gestión con enfoque ambiental de los residuos sólidos y emisiones relacionadas con los residuos líquidos. En el Capítulo 21, la atención está dirigida a la minimización de los residuos, la maximización de la reutilización y reciclaje de los residuos con un enfoque ambiental.

En América Latina y el Caribe la normativa es por lo general parcial e incompleta. La falta de cumplimiento y la insuficiente fiscalización de la ley son un

problema. Las tecnologías limpias, si bien implican mayores inversiones, suelen estar asociadas a una mayor rentabilidad y a ventajas de competitividad y marketing de las empresas. En la región latinoamericana, la institucionalidad ambiental es todavía muy precaria, dado que se están creando servicios públicos nuevos, sean estos ministerios, comisiones o departamentos. Por otro parte, en la región existe la necesidad de desarrollar instituciones ambientales modernas, eficaces, con respaldo político, con capacidad fiscalizadora, con poder sancionador y con presupuesto.

El mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto es un instrumento legal ratificado por Bolivia que establece límites a las emisiones de gases de efecto invernadero que provocan el cambio climático global para los países desarrollados y en transición. A través del Protocolo se deben reducir 5% las emisiones globales con base en el año 1990. Los gases a disminuir son bióxido de carbono, metano, óxido nitroso, carbonos hidrofúorados (HFC) y perfluorados (PFC) y hexafluoruro de azufre. El MDL estimula la ejecución de proyectos de tecnologías limpias y con ello generar "Bonos de carbono" o Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE). Los países desarrollados que han ratificado el Protocolo pueden optar por disminuir su cuota de emisiones a través de comprar estas RCE a países en desarrollo como Bolivia.

Como se ha demostrado, el rol de las energías renovables dentro de las comunidades rurales trasciende la expansión de los servicios de energía, y se relaciona directamente con la promoción de un desarrollo social basado en el alivio de la pobreza (Midmore et al., 2000) y la preservación de los recursos.

### I.3. BIODIGESTION ANAEROBIA

#### I.3.1 Revisión histórica

La tecnología del biogás, es un proceso anaerobio que ocurre de forma espontánea en la naturaleza para degradar la materia orgánica, produciendo, por ejemplo, el gas de los pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes.

En 1776 Alessandro Volta, físico italiano, descubrió el "combustible del aire", formado en los sedimentos del fondo de los lagos y ríos. Ochenta años más tarde Reiset detectado la formación de metano en los estercoleros, y propuso el estudio de este tipo de gestión de residuos para explicar el proceso de descomposición anaeróbica.

Dalton, en 1804, estableció la composición química del metano ( $\text{CH}_4$ ) y hasta mediados del siglo XIX no se tuvo certeza de la participación de organismos vivos unicelulares en el proceso, siendo Beauchamp, en 1868, quién estableció la presencia de microorganismos en los procesos de producción de metano.

Propoff, en 1875, descubrió que la formación de biogás sólo se producía en condiciones anaerobias y en 1884, Pasteur investigó sobre la producción de biogás a partir de residuos animales, proponiendo la utilización del biogás para la iluminación de las calles (Muñoz Valero *et al.*, 1987).

En 1910, Sohngen encontró que en la fermentación de materiales orgánicos se produce la reducción de compuestos como el hidrógeno, ácido acético y dióxido de carbono. También demostró que hay reducciones de  $\text{CO}_2$  para formar metano y asumió que el ácido acético es el responsable de la formación de metano. Esta hipótesis, ahora se considera correcta, siendo controvertida durante décadas.

En 1914, Reichle Thum, llegó a la conclusión de que el proceso se produjo en dos fases: el ácido y el metano y en 1916, Imhoff, denominó digestión ácida a la etapa de la digestión de metano en el proceso.

En 1940, Barker aisló una bacteria (*Omelianski*) que oxida el etanol, el acetato y el metano mientras que en 1948, Buswell y Sollo, demostraron que el metano procedente del acetato no se produce mediante la reducción de  $\text{CO}_2$ .

Jerris en 1956 encontró que el 70% del metano producido se obtuvo a partir de acetato.

Briant en 1967 reportó que hay dos grupos de bacterias que convierten el metano. (AEMA, 2005). También en la India, a partir de la década de los 60, se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino con el doble objetivo del aprovechamiento energético y biofertilizantes. En China se ha fomentado, desde la década de los 70, la construcción de digestores, mediante programas de ámbito nacional.

En los países industrializados la historia de la tecnología de biometanización ha sido diferente y el desarrollo ha estado motivado más por razones medioambientales que puramente energéticas, siendo un método clásico de estabilización de lodos activos residuales de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas.

Con la bajada de los precios del petróleo, a finales de los años ochenta, el interés por la tecnología de digestión anaerobia volvió a decaer, aunque en algunos países industrializados se han desarrollado importantes programas de plantas anaerobias a escala industrial, teniendo como objetivos principales la gestión de residuos, principalmente ganaderos, la estabilización e higienización de los mismos, y el fomento de las energías renovables, para disminuir la emisión neta de gases de efecto invernadero. El principal exponente es Dinamarca, donde, en 1985, comenzó un programa demostración, desarrollado conjuntamente por los ministerios de agricultura, energía y medio ambiente, en un esfuerzo por demostrar el potencial de grandes plantas de digestión anaerobia como productores de energía eléctrica. Así, en 1997 se contabilizaban 19 grandes plantas que tratan conjuntamente residuos de origen industrial, residuos urbanos, lodos de depuradora y residuos ganaderos (Angelidaki y Ahring, 1997), aunque en el año 2000 los objetivos eran duplicar la producción, y continuar aumentando hasta el año 2030.

Las ventajas para el usuario de la tecnología del biogás son el ahorro económico por el uso de los subproductos (ahorro en combustibles, disponibilidad de energía para el desarrollo de otras actividades, ahorro en fertilizantes), menos trabajo y otros beneficios cualitativos (facilidad de cocinar y mejores condiciones higiénicas, mejor iluminación, independencia energética, mejora del trabajo de la granja, mejora de la calidad del suelo) (Flotats y Campos 2005).

### 1.3.2. Generación de Biogás

Actualmente, investigadores de todo el mundo han prestado especial atención a los procesos anaeróbicos, así como el desarrollo de reactores para la optimización de este proceso.

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa. La materia prima preferentemente utilizada para someterla a este tratamiento es la biomasa residual con alto contenido en humedad, especialmente los residuos ganaderos y los lodos de depuradora de aguas residuales urbanas.

#### 1.3.2.1 Fases en la Fermentación anaeróbica

Debido que la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se puede afirmar en líneas generales que esta se desarrolla en tres etapas durante las cuáles la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para dar biogás como producto final, por la acción de diferentes tipos de bacterias (Marchaim, 1992).

Las variables más importantes que influyen en el proceso son las siguientes:

- ✓ Temperatura: con un funcionamiento óptimo alrededor de los 35 °C.
- ✓ Acidez: determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,6.
- ✓ Contenido en sólidos: las mejores condiciones con menos de 10% en sólidos, por eso la biomasa más adecuada es la de alto contenido en humedad.
- ✓ Nutrientes: para el crecimiento y la actividad de las bacterias, se debe disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.
- ✓ Tóxicos: aparte del oxígeno, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas.

El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de CH<sub>4</sub> (50 a 70%) y CO<sub>2</sub> (30 a 50%), con pequeñas proporciones de otros

componentes ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí (Marchaim, 1992). La cantidad de gas producido es muy variable, aunque generalmente oscila alrededor de los  $350 \text{ L kg}^{-1}$  de sólidos degradables, con un contenido en  $CH_4$  del 70%. Por su parte, el efluente de la digestión está compuesto por diversos productos orgánicos e inorgánicos y se usa tanto en la fertilización de suelos, como en alimentación animal.

Las etapas de la digestión anaeróbica (Figura 11, Lettinga, 1985), son;

- Hidrólisis de los polímeros complejos.
- Acidogénesis por fermentación de los monómeros produciendo acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes,  $H_2$  y  $CO_2$ .
- Acetogénesis por fermentación secundaria generando acetato,  $H_2$ ,  $CO_2$ .
- Metanogénesis a partir de  $H_2$ ,  $CO_2$ , acetato y la consiguiente generación de  $CH_4$ .

Los procariontes reductores de  $CO_2$  más importantes son los metanógenos, un grupo de arqueobacterias anaeróbicas estrictas que emplean generalmente el  $H_2$  como donante de electrones. Hay por lo menos diez sustratos que se convierten en metano por la acción de uno u otro metanógeno, todos los cuales liberan energía adecuada para la síntesis de ATP, incluyendo formiato, acetato, metanol, metilmercaptano y metilamina. La conversión de acetato a metano aparece como un proceso muy importante en digestores de residuos y en medios anóxicos, donde no hay una competencia excesiva por el acetato con otras bacterias.

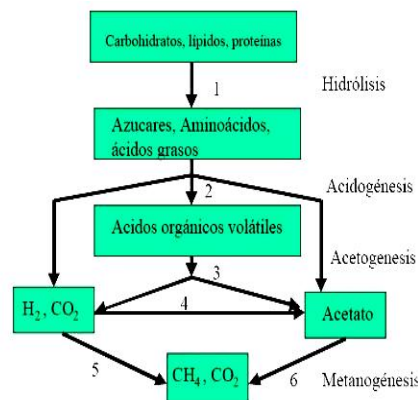


Figura 11. Procesos anaeróbicos de la materia orgánica

Fuente: Lettinga (1985).

### 1.3.2.2. Microbiología y bioquímica de la digestión anaerobia

Un reactor anaerobio de digestión puede ser considerado como un ecosistema donde diversos grupos de microorganismos trabajan juntos en la conversión de la materia orgánica compleja en metano, dióxido de carbono, agua, sulfuro de hidrógeno y amoníaco, y las nuevas células bacterianas. El consorcio de microorganismos activos en el tratamiento anaerobio para eliminar la materia orgánica, realiza un proceso complejo que involucra muchas especies de bacterias, que actúan en forma simbiótica.

Una operación estable del digestor requiere que estos grupos de bacterias se encuentren en un equilibrio dinámico y armónico. Los cambios en las condiciones ambientales pueden afectar este equilibrio, y resultar en un aumento de microorganismos intermediarios que pueden inhibir todo el proceso. Esto tiene una importancia extrema para comprender hacia que direcciones se mueven los procesos microbiológicos y bioquímicos y poder dirigir el sistema de digestión para producir biogás (Marchaim, 1992).

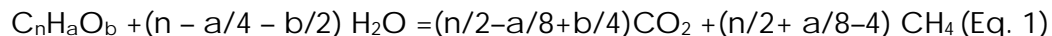
El conocimiento de los factores microbiológicos y bioquímicos que ocurren en la fermentación metanogénica es indispensable para entender la cinética de este proceso, y esto permite controlarlo e incidir sobre ellos para obtener resultados satisfactorios. En la fermentación bacteriana intervienen poblaciones microbianas diversas (Scriban, 1982; Marchaim, 1992; Tabla 11).

Tabla 11. Características principales de los microorganismos metanogénicos más usuales.

Metanogénicos acetoclasicos	T opt (°C)	T Max (°C)	$\mu_{max}$ (d <sup>-1</sup> )	K <sub>5</sub> (Ac) mgDQO L <sup>-1</sup>
<i>Metanobacteria barkeri</i>	35-40	-	0,023	320
<i>Metanobacteria thermophila</i>	50	55-60	0,058	288
<i>Metanobacteria CALS-1</i>	55-58	60	0,058	-
<i>Metanobacteria MP</i>	55	60	-	-
<i>Metanobacteria MSTA-1</i>	55	65	0,053	685
<i>Metanobacteria CHT55</i>	57	63	0,085	614
<i>Metanobacteria soebngenii</i>	37	45-50	0,085	45
<i>Metanobacteria concilii</i>	35-40	40-45	0,029	77
<i>Metanobacteria sp-Pt</i>	55	65-70	0,020	-
TAM	60	70	0,012	51
<i>Methanohirx sp. CALS-1</i>	60	65-70	0,028	64
<i>Methanohirx thermophila</i>	65	70	-	-
Co-cultivo oxidante de acetato	60	-	0,019	-

Fuente: Silva (1996).

La ecuación estequiométrica de Boswel es aplicable a la fermentación de la materia orgánica (Kenealy *et al.*, 1981; Yougfu *et al.*, 1989):



El proceso de conversión anaerobia depende de diversos factores como por ejemplo: del pH, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de sustancias tóxicas, el tiempo de retención, la relación carbono/nitrógeno (C/N) y el nivel de carga (An, 1996).

Hablar de un equilibrio de estas poblaciones implica necesariamente, identificar y analizar los tipos de interacciones que se establecen entre ellas, la influencia que tienen estas interacciones sobre el desarrollo de cada población y el efecto que tienen estas interacciones sobre la regulación de poblaciones.

### *1.3.2.3. Parámetros determinantes en el proceso de generación de biogás*

Varios son los factores que influyen la producción de biogás en proceso semicontinuo a partir de materiales orgánicos determinados en un diseño de biorreactor definido. Estos factores son el pH, temperatura, velocidad de carga (LR), tiempo de retención hidráulico (HRT), composición del sustrato, etc. (Callaghan, 2002).

Los residuos urbanos e industriales suelen contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable (lípidos, carbohidratos y proteínas), por lo que presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos, de 30 a 500 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> (Ahring *et al.*, 1992; Angelidaki y Ahring, 1997a; Bardiya *et al.*, 1996), mejorando la viabilidad económica de las plantas (Ahring *et al.*, 1992). Sin embargo, estos residuos pueden presentar problemas para su digestión, como deficiencia en nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos anaerobios, baja alcalinidad, o excesivo contenido en sólidos que genere problemas mecánicos (Banks y Humphreys, 1998).

La codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa (Brinkman, 1999). Experiencias de codigestión han sido llevadas a cabo, mezclando diferentes tipos de residuos, desde las experiencias a escala piloto e industrial, corroborando casi siempre las expectativas de un mayor potencial de biogás. Los efectos beneficiosos de la



introducción de mezclas de residuos ganaderos con residuos industriales se han puesto de manifiesto en las plantas a escala (Burton, 2003).

#### I.3.2.3.1. El potencial de hidrogeniones (pH)

La influencia del pH se manifiesta en diferentes formas, cambiando las cargas de los sitios activos de enzimas, modificando sus estructuras y por lo tanto perder sus características, aumentando o disminuyendo la toxicidad de éstos. Según Lema (1997), el pH óptimo depende del consorcio de microorganismos involucrados en el proceso. Normalmente, los microorganismos tienen su pH cercano al neutro óptimo como es el caso de las arqueas metanogénicas, con un rango óptimo de 6,5 a 8,2. En condiciones por encima o por debajo de este rango disminuye la tasa de producción de metano.

Las bacterias productoras de ácido tienen un crecimiento óptimo a un pH de entre 5 y 6 y tienen una mayor tolerancia para los valores más bajos de arqueas metanogénicas. En los sistemas existe una serie de micro-organismos que actúan en forma de consorcios, se debe buscar el rango de pH en que presta el máximo crecimiento de la mayoría de los microorganismos implicados (Smith, 1990). También informa de que el pH está estrechamente relacionado con las concentraciones de ácidos orgánicos volátiles en medio de un equilibrio entre las poblaciones de microorganismos y la alcalinidad total del sistema. Por lo tanto, cualquier desequilibrio en el sistema que provoca la acumulación de ácidos orgánicos en el medio y, por consiguiente disminución en el pH. Los dos principales componentes que afectan el pH en los procesos anaeróbicos son el ácido carbónico y los ácidos volátiles. De acuerdo con Anderson y Yang (1992) y Speece (1995) la concentración de ácidos orgánicos, sulfatos, compuestos de nitrógeno y DQO, tienen efecto sobre la demanda de alcalinidad para el control de pH en el tratamiento anaerobio.

#### I.3.2.3.2. Temperatura del biodigestor

De acuerdo con Sánchez *et al.* (2001), el proceso anaerobio se ha aplicado en diferentes rangos de temperatura. Según Lema (1997), estos rangos de temperatura

asociados con el crecimiento microbiano pueden ser: Psicrófilos entre 0 y 20°C; Mesófilas rango: 20 a 45°C y Termófilas rango: 45 a 70°C

En el rango mesofilico (20-45°C), la temperatura óptima es de alrededor de 35°C en el termofilico (45-65°C), alrededor de 55°C (Smith y Hirata, 1997).

De acuerdo con Smith (1990), el proceso presenta una mayor inestabilidad en los parámetros de su control cuando se opera en la fase termofilica, y se produce cuando existe una variación repentina de la temperatura, este problema se agrava y puede afectar más seriamente el proceso. El grupo de bacterias metanogénicas son las más afectadas por la influencia de la temperatura, ya que tienen un rango de temperatura muy estrecho de operación, puede causar el aumento de los ácidos volátiles por las bajas temperaturas, y en consecuencia una disminución en el pH.

La digestión anaeróbica es posible a baja temperatura (10°C), pero la eficiencia y la carga orgánica es mucho menor al disminuir la temperatura. (Haandel Van y Lettinga, 1994). Según Speece (1996) por cada 5°C de descenso de la temperatura hay una disminución del 34% en la actividad de los microorganismos, el autor considera la temperatura óptima en el rango de 25 a 30°C para los procesos de mesófilos.

#### I.3.2.3.3. Nutrientes

Las principales ventajas del proceso anaerobio es su baja necesidad de nutrientes (Lema et al., 1997). Los requerimientos nutricionales de los microorganismos en el sistema anaeróbico se establecen según la composición química de las células microbianas. En este sentido, los productos químicos en mayor cantidad en la composición de los microorganismos son el carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, fósforo y azufre siendo, por lo tanto las necesidades en función de esta composición. Otros nutrientes son necesarios para la biosíntesis de los componentes celulares, tales como cationes y oligoelementos considerados como micronutrientes (Co, Cu, Mn, Mo, Zn, Ni, Se,) que actúan como una ayuda a las distintas enzimas.

Según Chernicharo (1997), asumiendo que los nutrientes están disponibles, la degradación depende del mantenimiento de un entorno favorable para los

microorganismos, incluyendo el control y la eliminación de componentes tóxicos. Los niveles de nutrientes, y las relaciones entre ellos, deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes.

Entre las relaciones más importantes están la C/N y la C/P. Los materiales con diferentes relaciones de C/N difieren grandemente en la producción de biogás siendo una relación menor de 8 inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio (Werner *et al.*, 1989). La relación C/P se considera idónea para la mayoría de los residuos procedentes tanto de animales como vegetales (Sánchez *et al.*, 2001)

#### I.3.2.3.4. Toxicidad

La toxicidad, por la presencia de componentes químicos no deseados, ha sido considerada como una de las principales razones de la no aplicación de los procesos anaeróbicos, ya que las bacterias metanogénicas son fácilmente inhibidas por las toxinas. Los grupos de productos químicos como los metales pesados y sustancias organocloradas tóxicas con influencia negativa, en concentraciones bajas (Pol *et al.*, 1998).

Hwu *et al.*, (1998) estudiaron la bioabsorción de ácidos grasos de cadena larga (LCFA) en los reactores UASB, concluyendo que la adsorción de estos compuestos en la matriz de los gránulos de los microorganismos es rápida y que, al aumentar la concentración de estos compuestos en el efluente, mayor será su adsorción, la creación de una inhibición y la degradación.

La degradación de los colorantes azoicos, un producto utilizado normalmente en la industria textil y curtiembres, fue estudiado por Manu *et al.*, (2001), donde el efecto tóxico de los colorantes y las sales presentes en este tipo de efluentes en los microorganismos metanogénicas fue evaluado a través de la producción de metano y la actividad metanogénica. Los resultados no mostraron inhibición de la producción de metano, pero indicaron que concentraciones por encima de 400 mg L<sup>-1</sup> pueden tener efectos inhibidores en la actividad metanogénica (Yongfu *et al.*, 1989). Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados (Marchaim, 1992).

Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. Por ejemplo, en alimentos de alto contenido de proteína para el ganado, un desbalance por altos contenidos de nitrógeno y bajas disponibilidades energéticas, causa toxicidad por generación de amonio. Usualmente, el nivel de amonio libre debe mantenerse en 80 ppm (Anderson *et al.*, 1982). Sin embargo, una concentración más alta, alrededor de 1500-3000 ppm, puede ser tolerada (Gunnerson y Stuckey, 1986). De Baere *et al.*, (1984), citado por Marchaim (1992) reporta señales iniciales de inhibición a una concentración de  $\text{NH}_4^+$  de alrededor de 800 ppm.

#### I.3.2.3.5. Nivel de carga del biodigestor

En cada uno de los ensayos el nivel de carga se realizó de acuerdo al volumen de los sistemas de biodigestión en ese sentido, varios autores toman en cuenta valores relacionados al tamaño de los sistemas.

Este parámetro se calcula como la materia seca total (MS) o materia orgánica (MO) que se carga o vierte diariamente por metro cúbico de volumen de digestor. La MO o sólidos volátiles (SV) se refiere a la parte de la MS o sólidos totales (ST), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 500°C (AOAC, 1980). Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano. Los residuales de animales pueden tener un contenido de MS mayor del 10%. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de MS no debe exceder el 10% en la mayoría de los casos (Loher, 1974). Por lo tanto, los residuales de granjas se deben diluir antes de ser tratados. La concentración óptima es del 6% en el verano a temperaturas entre 25-27°C y entre 10 y 12 % en la primavera a temperaturas de 18-23°C (Yongfu *et al.*, 1989).

En la práctica habitual de procesos anaerobios, se trabaja con concentraciones de sólidos totales (ST) entre 4 y 8% para garantizar un adecuado régimen de flujo que permita un manejo hidráulico satisfactorio (Álvarez, 2008).

#### 1.3.2.3.5. Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico está en función a el lugar donde se encuentre el sistema de biodigestión en ese sentido se tiene un promedio de tiempo de retención hidráulico para la temperatura ambiental que va relacionado al tipo de clima que se tiene en el ambiente exterior y a la temperatura interior del biodigestor. Generalmente varía de 10 a 60 días.

Existen dos parámetros para identificar el tiempo de retención de las sustancias en el digestor:

1. El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB) que se determinan dividiendo la cantidad de MO o SV que entra al digestor entre la cantidad de MO que sale del sistema cada día. El TRSB se utiliza para representar la media del tiempo de retención de los microorganismos en el digestor.
2. El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el volumen del digestor (VD) entre la media de la carga diaria.

Estos parámetros son importantes para los digestores avanzados de alto nivel, los cuales han alcanzado un control independiente del TRSB y del TRH a través de la retención de la biomasa. La medición del TRH es más fácil y más práctica que el TRSB al nivel de las granjas (An, 1996).

#### 1.3.2.4. Balances en la fermentación anaeróbica

En muchos ambientes anóxicos los precursores inmediatos del metano son el H<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> que se generan por las actividades de los organismos fermentadores. En el proceso general de producción de metano las bacterias celulolíticas rompen la molécula de celulosa, de peso molecular elevado, en celobiosa y glucosa libre (An, 1996). Por acción de los fermentadores primarios, la glucosa origina ácidos orgánicos, alcoholes, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Todo el hidrógeno producido es consumido inmediatamente por las bacterias metanogénicas, las acetogénicas o las reductoras de sulfato si éste se halla en alta concentración. Además el acetato puede ser convertido en metano por otros metanógenos.

Normalmente, la contaminación orgánica en biodigestores es evaluada y balanceada a través de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) siendo diferentes en los procesos anaeróbicos y aeróbicos (Figuras 12 y 13). De esta manera, se

observa que una correcta fermentación anaeróbica es más eficiente energéticamente que la aeróbica.

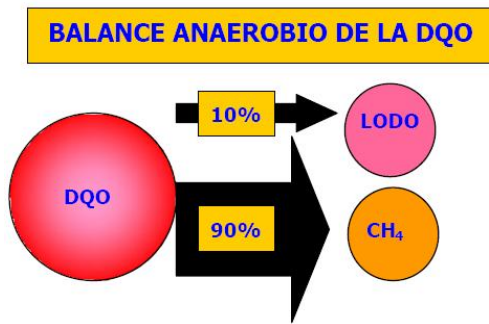


Figura 12. Balance Anaerobio de la Materia orgánica.

Fuente: Elaboración propia.

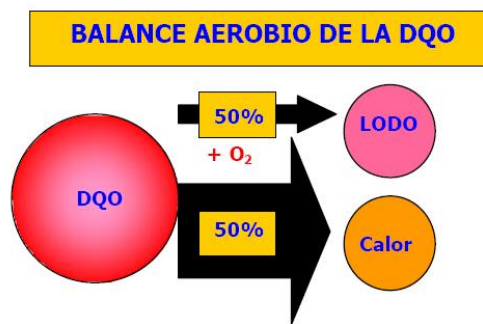


Figura 13. Balance Aerobio de la Materia orgánica.

Fuente: Elaboración propia.

#### 1.3.2.5. Purificación y utilización del biogás

En la práctica la purificación del biogás no es más que la remoción del dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno. El dióxido de carbono es eliminado para aumentar el valor del biogás como combustible. El sulfuro de hidrógeno se elimina para disminuir el efecto de corrosión sobre los metales que están en contacto con el biogás (Hesse, 1983).

El método químico más simple y eficiente de remoción del dióxido de carbono es su absorción en agua de cal. El agua de cal puede sustituirse por una solución acuosa de etanolamina, la cual absorbe el dióxido de carbono (y también el sulfuro de hidrógeno), aunque este proceso es caro y normalmente no se utiliza. Otra alternativa es utilizar otro residual fuertemente alcalino como medio de absorción de estos gases como son los efluentes de cultivos de microalgas. El líquido efluente del digestor es vertido directamente en un tanque de gran tamaño para producir el alga Spirulina. El alga basifica el agua de tal manera que esta posee un valor de pH de 10 o más. Esta agua se hace atravesar en contracorriente al biogás. El agua que queda como resultado de esta reacción contiene  $\text{HCO}_3^-$  la cual es rehusada en el cultivo de las algas (Lau-Wong, 1986).

El método tradicional de desulfuración consiste en añadir limallas de hierro a una solución de agua sobre la que se burbujea el biogás. También existe un procedimiento basado en la adición de aire al 1.5 % del volumen de biogás

producido (Henning, 1986). Con este método se asegura una disminución del contenido de H<sub>2</sub>S de aproximadamente 120 ppm o 0.012 % en volumen de biogás.

### 1.3.3 Clasificación de los reactores utilizados para la biodigestión anaerobia

Los reactores biológicos, según el tipo de biomasa se pueden dividir en dos grupos distintos: los reactores de biomasa suspendida y los reactores de biomasa fija a un soporte inerte. Otra clasificación (Rizzo y Leite, 2004), distribuyen la evolución a lo largo de los años en 3 generaciones de reactores (Tabla 12).

Tabla 12. Generaciones de reactores anaerobios.

Reactores de 1ª Generación	Reactores de 2ª Generación	Reactores de 3ª generación
Tanque séptico	Filtro anaerobio	Reactor anaerobio de lecho fluidizado
Tanque Imhoff	Reactor anaerobio de flujo ascendente y capa de UASB	Reactor Anaerobio de lecho expandido
Lagunas anaerobias		
Reactor convencional		
Reactor de contacto		

Fuente: Elaboración propia en base a Rizzo y Leite (2004).

#### 1.3.3.1. Reactores de primera generación

Estos reactores son aquellos en los que la biomasa ha sido suspendida. En este caso, el tiempo de retención celular es igual al TRH, lo que refleja este hecho directamente en el tamaño de los reactores cuando sea necesario para el tratamiento de grandes volúmenes de residuos orgánicos.

##### Fosa Mouras

M. Luis Arabe desarrolló alrededor de 1860 en Francia, un tanque cerrado llamado "mora automática Scavenger" capaz de licuar la materia orgánica en las aguas residuales de una casa (McCarty, 1981 en Rizzo, et al., 2004).

##### Tanque séptico

En 1895, Donald Cameron construyó en la ciudad de Exeter (Inglaterra) un tanque, para el tratamiento de efluentes. Este tanque fue patentado como un tanque séptico (Figura 14; Rizzo, et al., 2004). Su uso se limita a los hogares donde no hay sistemas de tratamiento de aguas residuales.

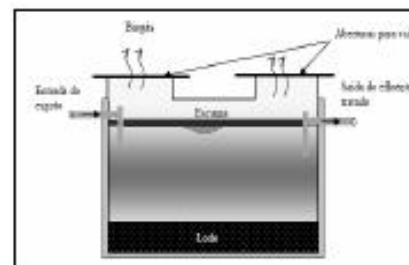


Figura 14. Esquema de un tanque séptico.

Fuente: Ávila, 2005

### Tanque Imhoff

Karl Imhoff (1905) desarrollo un tipo de depósito anaeróbico de alta eficacia. El tanque está dividido en: cámara de digestión de lodos, cámara de sedimentación y la cámara de crema (Figura 15, Noyola, 1993 en Rizzo, et al, 2004).

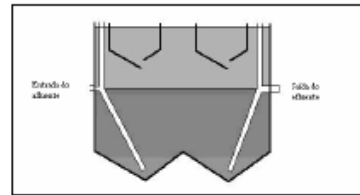


Figura 15. Tanque Imhoff.  
Fuente; Rizzo, 2004.

### Laguna anaerobia

Son grandes estanques con gran profundidad (2,5-5 m) donde las condiciones anaeróbicas se establecen en la zona profunda. El tanque se cubre con una membrana flotante que mantiene el calor y recoger el biogás. Se utilizan para el tratamiento de efluentes con alta carga orgánica. (280 a 4.500 kg DBO m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>). La remoción de DBO está en el rango de 50 a 80% para un tiempo de retención hasta 60 días (Eckenfelder, 1989).

### Reactor Convencional - CSTR (Reactor continuo de tanque agitado)

La geometría y el funcionamiento de tanque agitado son similares a los reactores químicos (Fig. 16). Surgió en los años 50, donde se resuelve el problema de la espuma en la parte superior del digestor y obtuvo un proceso más eficiente, debido al mayor contacto de las bacterias con el efluente. Los reactores convencionales son adecuados para el tratamiento de efluentes con altas concentraciones de material biodegradable, con una remoción de DQO en el rango de 80 a 95%. Los TRH suelen ser 20 a 30 días (Rizzo, 2004).

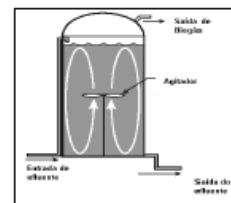


Figura 16. Reactor CSTR.  
Fuente: Rizzo, 2004

### Reactor Anaerobio de contacto

Fue desarrollado en 1955 por Schroepfer, (Fig 17; McCarty, 1981). La principal diferencia respecto a los anteriores es que después de la descomposición anaeróbica la mezcla se separa el sólido y el efluente en la jarra o floculador (Schrank, 2000). La eficiencia del tratamiento es generalmente alto, alcanzando el 95% de reducción de DQO con TRH menores a 5 d.

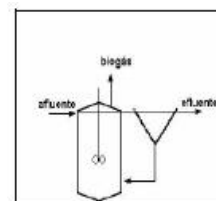


Figura 17. Reactor anaerobio de contacto.  
Fuente; McCarty, 1981



### 1.3.3.2. Reactores de segunda generación

Son aquellos en los que los organismos se mantienen dentro del reactor debido a la presencia de un soporte y por su capacidad de sedimentación.

#### Filtro anaerobio

Consisten en depósitos llenos de un material soporte inerte (piedra, plástico, cerámica, etc.) que permanece inmóvil, en el que los microorganismos crecen tanto en los espacios vacíos formando una capa de biofilm en la superficie, proporcionando así una alta retención de la biomasa en el reactor. Por esta razón, es deseable que el material inerte tenga una gran superficie por unidad de volumen (Florencio, 1999, Rajeshwari et al., 2000).

#### Reactor anaerobio de flujo ascendente y Capa de Lodo (UASB manta de lodos anaeróbicos de flujo ascendente)

Este reactor es un tanque de flujo ascendente en el que los microorganismos crecen dispersos, sin la necesidad de un material de apoyo, la formación de gránulos, con una alta resistencia mecánica restantes en el reactor (Figura 18, Chernicharo, 1997).

En su parte superior es un separador de tres fases (sólido-líquido-gas), para la eliminación de los gases producidos, así como la sedimentación y retorno automático a la cámara de digestión (Al Rajeshwari et al., 2000). El rendimiento en UASB de efluentes

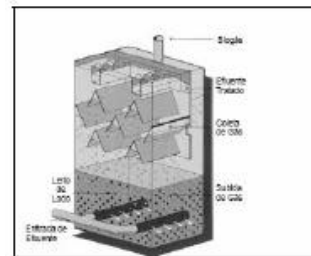


Figura 18. Reactor. UASB.  
Fuente: Chernicharo, 1997

industriales mostraron los resultados entre el 75 y el 80% de remoción de DQO con un TRH de 4 a 12 horas (Metcalf y Eddy, 1991).

### 1.3.3.3. Reactores de tercera generación

En este tipo de reactores los microorganismos están adheridos a un soporte que puede ser ampliado o de lecho fluidizado. El material utilizado normalmente como soporte, debe tener una gran superficie para la adhesión de microorganismos y mantener buenas características de sedimentación para asegurar la retención de la biomasa en el reactor.

### Reactor Anaeróbico de lecho expandido

En los años 70 (Conde, 1987) desarrolló un nuevo tipo de reactor biológico capaz de retener la biomasa activa. Los microorganismos crecen sobre un soporte inerte (arena, antracita o un material plástico; Figura 19). El grado de expansión puede ser hasta un 40%. La eficiencia de remoción de DBO en el tratamiento de aguas residuales, puede alcanzar el 90%, con un TRH de 2 horas.

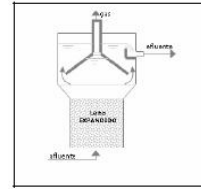


Figura 19. Reactor de lecho expandido.

Fuente: Conde 1987.

### Reactor anaerobio de lecho fluidizado

Estos reactores biológicos se han convertido en una alternativa muy interesante, debido principalmente a eficiencias de remoción de materia orgánica. El sistema es similar al lecho expandido. Aunque, la expansión que se alcanza puede ser del 300% (Figura 20; Noyola, 1993). Controlar la cantidad de biomasa unida al soporte es extremadamente difícil, y pueden producirse arrastres hidráulicos (lavado). La eficiencia de remoción de DQO se presenta en el rango de 80 a 87% (Speece, 1983).

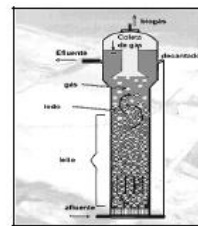


Figura 20. Reactor de lecho fluidizado.

### Reactor Híbrido

El tipo de reactor es la combinación híbrida más común de un reactor UASB en la parte inferior y un filtro anaeróbico en la parte superior. Este tipo de reactores híbridos tienen un 20-30% de su volumen lleno de materiales en movimiento, tales como espuma o anillos de plástico, con el propósito de la retención de la biomasa, dispuestas al azar (Speece, 1996). Los reactores híbridos tratan de asociar las ventajas del reactor y la capa de flujo ascendente (UASB - manta de lodo anaerobio de flujo ascendente) del filtro anaerobio, reduciendo sus defectos (Keenan et al., 1993).

### Reactor tubular de película fija

Este tipo de reactor que utiliza tubos de soporte o placas dispuestas de tal manera, para crear canales verticales. El material puede ser de cerámica, PVC, mantas de poliéster, etc. El reactor es típicamente el mismo principio del filtro

anaerobio, donde los microorganismos crecen en el sustrato, y forman una capa de biofilm en la superficie (Craveiro, 1994).

### Sistema de fermentación anaeróbica en la fase semi-sólido (FAFSS)

El sistema FAFSS, es una nueva forma de tratamiento muy económica (Brummel *et al.*, 1991; Kalyuzhnyi *et al.*, 2000). Los beneficios adicionales asociados a esta forma de tratamiento son: la generación de energía en forma de metano, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> que se atribuye el calentamiento global y de alta carga volumétrica que se puede aplicar en este sistema (Brummel *et al.*, 1991).

#### *1.3.3.4. Reactores de bajo coste*

##### *1.3.3.4.1 Evolución de los biodigestores de bajo coste*

Ya desde el siglo pasado se conocía en la India y China el uso de procesos fermentativos (reactores cúpula fija y de campana flotante) para producir el biogás y tratar ecológicamente los residuales orgánicos de forma artesanal (Turzo *et al.*, 1984).

En los biodigestores, que son las instalaciones donde ocurren estos procesos, se obtiene además un efluente líquido, cuyo valor económico como fertilizante es equivalente al del biogás (Kellner, 1990). Estudios realizados en Bolivia han demostrado que el uso del efluente líquido representa económicamente más beneficio que el propio biogás (Medina, 1990). A nivel rural o doméstico, los reactores suelen tener volúmenes bajos (5-20 m<sup>3</sup>) y sin elementos de regulación o agitación, con la finalidad de reducir el coste. A nivel doméstico hay tres tipos principales de biodigestores:

#### Tipo Chino

Estos biodigestores consisten en una cámara enterrada, con dos conductos (uno de entrada y otro de salida).

Con una abertura superior donde va instalada la conducción de biogás (Figura 21). Su peculiaridad es la cúpula fija en la parte superior. Esta inmovilidad hace que la presión del gas en el interior varíe en función de su producción y consumo.

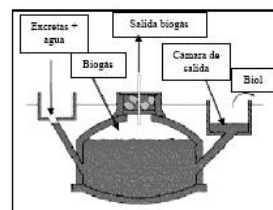


Figura 21. Biodigestor tipo Chino.

Fuente: Kossmann, 2000

### Tipo Hindú

Estos biodigestores son muy parecidos a los anteriores (Figura 22), excepto por el hecho de que en los de tipo hindú la cúpula es flotante, es decir que sube o baja en función de la presión interna de biogás.

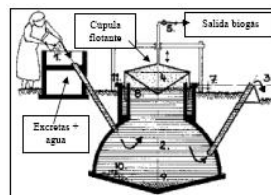


Figura 22. Biodigestor tipo Hindú.  
Fuente: Sasse, 1988.

### Tipo tubular

Estos biodigestores consisten en una manga de plástico a la que se le instalan unos tubos en los extremos como de tubos de entrada y salida. Este tipo de biodigestor es mucho más barato que los anteriores pero con una vida más corta debido los materiales (Figura 23). Por sus características constructivas y por su bajo costo son una alternativa adecuada para gestionar las excretas y otros residuos orgánicos de la granja

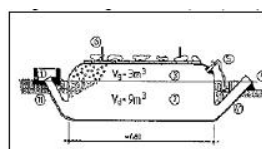


Figura 23. Biodigestor tubular.  
Fuente; Sasse, 1988

#### I.3.4 Antecedentes de biodigestores de bajo coste en Altiplano

En 1980 la OLADE (Organización Latinoamericana de Desarrollo) firma un acuerdo con la INER (Instituto nacional de Electrificación Rural), para la implementación de un programa de BIOGAS a largo plazo, fruto de este acuerdo se construyeron nueve plantas, tres en el altiplano paceño (provincia Los Andes), tres en Cochabamba y tres en el Beni. En la Paz, altiplano Boliviano, se experimento con tres tipos de digestores que se construyeron entre diciembre de 1980 y enero de 1981 en la granja Kallutaka, de propiedad de CORDEPAZ (Cooperación de desarrollo de La Paz). El primer Biodigestor fue del tipo OLADE-Guatemala con capacidad de  $8,5\text{m}^3$  éste no opero debido a las condiciones atmosféricas reinantes y la alta variación en la temperatura que lo hicieron inestable (Mendez, 2003).

El segundo biodigestor fue el tipo Chino con capacidad para  $12\text{m}^3$ , su funcionamiento fue irregular debido a la falta de seguimiento. El tercer biodigestor fue del tipo XOCHICALI – México con capacidad de  $16\text{m}^3$  y un gasómetro de  $3\text{m}^3$ ,

su funcionamiento fue irregular debido a las fallas en la construcción y las bajas temperaturas.

En Bolivia el apoyo de la GTZ, generó un proceso de investigación y desarrollo de sistemas de biodigestión anaerobia. Trabajaron por 10 años sin lograr grandes avances y no dio los resultados esperados. Actualmente se esta investigando y difundiendo a través de la ONG Tecnologías en Desarrollo, una gran cantidad de sistemas de Biodigestión en áreas rurales de Bolivia, mejorando las condiciones tecnológicas para su adaptación a diversos pisos ecológicos y condiciones climáticas.

Investigaciones recientes en condiciones de laboratorio se realizaron en la Universidad Mayor de San Andrés de la Ciudad de La Paz, con el proyecto de IIDEPROQ, en la mencionada investigación se realizo la codigestión de residuos de matadero y de residuos orgánicos generados en mercados. Las investigaciones netamente en condiciones de laboratorio, generaron datos bastante interesantes sobre el funcionamiento de los sistemas y sobre todo los beneficios de una investigación aplicada, que logre mejorar los rendimientos de la generación en m<sup>3</sup> de biogás por kilogramo de materia orgánica.

Experiencias fueron recolectadas en Perú, por investigadores como Ruiz (2010), que analiza, la adaptación y viabilidad en la aplicación de las tecnologías existentes a la utilización de las excretas, orines de los cerdos y de las aguas residuales de viviendas, como fuente de energía, de insumos para la producción orgánica, y para la mejora de los ingresos de las familias.

En el caso de Bolivia y Perú, las experiencias de implementación de biodigestores en altura llevadas a cabo hace 30 años, tuvieron escaso éxito en cuanto a impactos de la tecnología y continuidad del proceso. Actualmente, la mayor parte de los digestores entonces instalados se encuentran en desuso (Spagnoletta, 2007). Estas experiencias manifiestan las dificultades típicas de la diseminación de digestores en familias rurales: tecnológicas (falta de diseños adecuados), económicas (inversión difícilmente recuperable), financieras (dificultad para financiar la inversión inicial), sociales (necesidad de estimulación de la demanda y apropiación de la tecnología), logísticas (en instalación y seguimiento) y políticas (falta de apoyo estatal).



## II. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO





## II. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

La implementación de un proyecto de investigación que proporcione datos sobre el uso de sistemas de biodigestión tanto en área rural como en mataderos en condiciones de altura, es uno de los principales objetivos de este estudio. En este sentido, además de sistematizar la construcción de los biorreactores, se deben estudiar los resultados obtenidos en los ensayos con vistas a su optimización. Este paso se considera previo y necesario para la posterior difusión masiva de los biodigestores para que contribuyan de manera eficiente a la expansión de los sistemas de energía limpia en Bolivia. También, el estudio de algunos de los residuos más disponibles en la zona (sangre, contenido ruminal, estiércol y otros) se presenta como una de materia prima susceptibles de valorizar.

El esquema de investigación plantea:

- a) Valorización integral de residuos de aldeas rurales mediante la biodigestión en reactores flexibles en condiciones del altiplano Boliviano.
- b) Valorización de residuos de mataderos a través de la producción de Biogás; pretenden adecuar la tecnología de biodigestión a las características requeridas por los usuarios finales de granjas rurales y mataderos, para lograr una tecnología eficiente y de bajo costo, que lleve consigo beneficios ambientales y económicos.

Es importante recalcar que el manejo adecuado de los residuos sólidos y líquidos en mataderos, por medio de acciones sostenibles y acordes al equilibrio ecológico tienen la ventaja de no deteriorar la calidad de vida de la población en la zona del matadero en cuestión.

### II.1. OBJETIVOS GENERALES

El objetivo general del presente estudio es realizar el estudio técnico para la mejora de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos a nivel familiar y a nivel industrial para la obtención de biogás.

En este sentido, se pretenden determinar los parámetros que permitan un buen rendimiento de los digestores en las condiciones climáticas que se presentan principalmente en el altiplano boliviano (alturas superiores a los 3000 msnm), caracterizado por sus bajas temperaturas y condiciones extremas en invierno.

Con esto se intenta obtener una metodología de trabajo sencilla y rápida en la formulación de mezclas de materia prima, desechos de la ganadería.

## II.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estos objetivos se han subdividido en los siguientes:

1. Estudio de la situación actual en las zonas rurales de Bolivia relativo a la utilización de energías y sus fuentes en las zonas rurales de Bolivia.
2. Estudio de la situación actual en las zonas rurales de Bolivia relativo a la generación de energías renovables. Necesidad de la creación de fuentes de energía renovables y del consumo de fuentes energéticas tradicionales en las zonas rurales de Bolivia.
3. Estudio comparativo de un sistema de digestión flujo pistón en sistemas familiares empleando como sustrato estiércol animal, residuos sólidos y excrementos humanos en codigestión. Influencia de las variables de proceso.
4. Estudio comparativo de un sistema de digestión flujo pistón en sistemas de digestión semi-industrial empleando como sustrato residuos de matadero en codigestión. Influencia de las variables de proceso.
5. Estudio comparativo de tres sistemas de digestión en flujo pistón de actividad mesofílica utilizando como sustratos los residuos de matadero.
6. Análisis de los parámetros de funcionamiento y de producción de biogás y su composición en los sistemas de digestión en los dos tipos de sistemas estudiados (a nivel familiar e industrial) y utilizando diferentes sustratos.
7. Identificación de los procesos, técnicas y tecnologías, de la utilización de los dos tipos de manejo y uso de los sistemas de biogás en Bolivia (uso familiar y uso industrial).
8. Implementación de la tecnología en el marco político y legal de la reutilización y el reciclado de residuos en Bolivia, destinado a mejorar los mecanismos de su aplicación efectiva.

Como se puede apreciar se intentan aunar objetivos medioambientales, económicos y sociales. Los objetivos ambientales intentan proporcionar una visión clara de la relación existente entre el aprovechamiento de los recursos naturales y los procesos de reutilización y reciclado de residuos orgánicos (biomasa), así como del impacto ambiental que las actividades de gestión de residuos, generan, ubicando las fuentes productoras de los impactos y las posibles medidas de minimización.

Los objetivos económicos y sociales persiguen determinar la estructuración de los planes de reutilización y reciclado en Bolivia para aportar elementos a la sociedad, como generadora y recolectora inicial de residuos, y cooperadora fundamental de las actividades de reutilización y reciclado.

### II.3. PLAN DE TRABAJO

El trabajo realizado desde el año 2000 procura tanto la adaptación como la transferencia tecnológica de sistemas de biodigestión de bajo coste en Bolivia. Ha sido un estudio ligado al desarrollo de sistemas que se puedan usar, en Bolivia, en diferentes pisos ecológicos. En la actualidad están en activo aproximadamente 3000 sistemas de biodigestión anaerobia de diferentes tamaños situados en trópico, valle y altiplano. Con los biodigestores ensayados, se ha conseguido romper la barrera de los 2500 msnm logrando incluso implementar y poner en funcionamiento biodigestores en alturas superiores a los 4375 msnm.

Esta tesis de doctorado refleja esta década de investigación aplicada al desarrollo, que distintas instituciones a nivel gubernamental nacional e internacional han apoyado y que ahora es una realidad que pretende aportar una mejora en la calidad de vida de poblaciones rurales pobres, que por la falta de recursos económicos y de tecnología adaptable a su realidad no pueden satisfacer su necesidad sobre todo en el manejo de residuos y en la generación de fuentes de energía renovable, continua y barata.

Tecnologías en Desarrollo, Tecaltema, e instituciones de investigación y de desarrollo rural en Bolivia han desarrollado diferentes líneas de investigación sobre

los procesos de digestión anaerobia, desde varios puntos de vista en los que se distribuirá el trabajo:

1. Adaptación de sistemas de biodigestión a diferentes pisos ecológicos en Bolivia (estudiándose con más profundidad el que ofrece más dificultad para la biodegradación) y a distintos niveles.
2. Variación, respecto al diseño convencional de los procesos de digestión anaerobia, utilizando digestores plug off de flujo pistón.
3. Utilización como materias primas, residuos de diferente naturaleza y composición (estiércoles, residuos de matadero, vertidos de queserías, purines, y otros), todos ellos con alta carga orgánica.
4. Instalación de los sistemas de acuerdo a las mejores características de trabajo de los biodigestores en función de las características de la zona.
5. Análisis de los esquemas de trabajo para su optimización en base a la tecnología tipo Taiwán plug Off de flujo pistón.
6. Validación de la tecnología de biodigestión anaerobia en Bolivia, mediante parámetros técnicos, ambientales, económicos y sociales, para obtener las características idóneas de trabajo de los sistemas.

# III. MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



### III. MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### III.1 RESIDUOS UTILIZADOS

Los residuos que se usan para su análisis dentro el proceso de biodigestión son:

- Estiércol de ganado (recolección in situ)
- Residuos de proceso de sacrificio de animales (Rumen)
- Forraje predigerido (limitada proporción 5%)
- Drenaje de Sangre (Aprox. 5 a 15 L cada animal)
- Lavado de tripas, estómago y suelo
- Drenajes de limpieza (estiércol y otros)

Estos residuos son compuestos orgánicos de alto contenido energético, con macro y micronutrientes que proporcionan el agua, la vivienda, y la temperatura, preferidos por muchos macrovetores muy importantes como nicho ecológico. Según Pereira Neto (1992), estos vectores están asociados con la transmisión de muchas enfermedades zoonóticas, las enfermedades respiratorias, enfermedades epidémicas e infecciones.

En la Tabla 13 se describen las características típicas de residuos de alimentación a biodigestores y de los residuos (95% estiércol vacuno y 5% humano) utilizados en el estudio. En dicha tabla se observa que los residuos manipulados están dentro del intervalo descrito por otros autores para los residuos de naturaleza similar.

Tabla 13. Características químicas y físicas típicas de los residuos de estiércol vacuno y humano, utilizados en biodigestión anaeróbica (mg L<sup>-1</sup>).

Parámetro	Mínimo*	Máximo*	Media*	Media de los utilizados en el estudio
DQO	11530	38448	25543	28324 ± 1925
Sólidos Totales	12697	49432	22399	33496 ± 3037
Sólidos Volátiles	8429	39024	16389	19384 ± 815
Sólidos Fijos	4268	10408	6010	7489 ± 732
Sólidos Sedimentales	220	850	429	356 ± 151
Nitrógeno Total	1660	3710	2374	2166 ± 612
Fósforo Total	320	1180	578	790 ± 89
Potasio Total	260	1140	536	303 ± 76

Fuente: Silva, 1996 y datos propios del estudio

Concretamente, las características unitarias de los residuos utilizados en los biodigestores rurales e industriales, se muestran en la Tabla 14 y 15 respectivamente.

Tabla 14. Características medias de los residuos de partida para biodigestión en altiplano.

Parámetro	Unidad	Estiércol	Rumen	Sangre
pH		7,1	6,1	7,4
Sólidos Totales	%	14,14	13,42	23,03
Sólidos Volátiles	%ST	77,45	86,55	96,36
Sólidos Volátiles	%bh	10,95	11,62	22,19
Humedad	%	85,86	86,58	76,97
Nitrógeno Total	%	1,9	2,2	15
Materia Orgánica	%	74	90	96
Fósforo total	mg kg <sup>-1</sup>	9200	6600	870
Sodio total	mg kg <sup>-1</sup>	1100	20000	12000
Potasio total	mg kg <sup>-1</sup>	15000	8800	2900
Calcio	mg kg <sup>-1</sup>	23000	2100	130

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Características medias de los residuos de partida introducidos en los biodigestores industriales.

Parámetro	Unidad	Agua	Sangre	Rumen	Estiércol
pH		7	7,5	8	8
Sólidos Totales	%	0,29	11,2	17,2	17,1
Sólidos Volátiles	%ST	0,22	10,4	15,5	12,1
DBO <sub>5</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	59,9	39,2	--	--
DQO	mg kg <sup>-1</sup>	124	91,7	10000	17800
Humedad	%	-	65,57	83,33	80,63
Nitrógeno Total	%		11,9	2,9	2,3
Materia Orgánica	%				
Fósforo total	mg kg <sup>-1</sup>	1,14	442,23	9,31	15,92
Sodio total	mg kg <sup>-1</sup>	5,09	20,49	31,04	63,32
Potasio total	mg kg <sup>-1</sup>				
Calcio	mg kg <sup>-1</sup>				
Coliformes	NMP	+	+	+	+

Fuente: Elaboración propia

### III.2. BIODIGESTORES: INSTALACIÓN Y SISTEMAS EXPERIMENTALES

El Biodigestor tubular de plástico utilizado es un sistema de digestión anaeróbica compuesto de las siguientes partes:

- Cámara de entrada: Donde se mezcla la proporción adecuada de excretas y agua, se homogeneiza antes de su introducción en el biodigestor.
- Manga (biodigestor): Recipiente hermético con la capacidad necesaria para otorgar un tiempo de residencia adecuado para la degradación anaerobia de la materia orgánica y transformación en biogás.



- c. Cámara de salida: Almacena el biol que sale del biodigestor.
- d. Invernadero: construcción de plástico, que permite alcanzar una mayor temperatura acumulando el calor de la radiación solar. Aumenta el rendimiento de la producción de biogás y protege el biodigestor.
- e. Reservorio de gas: Usado para almacenar el gas producido por el biodigestor. Consiste en una manga de plástico conectada directamente a la conducción de salida del biogás del biodigestor.

### III.2.1. Dimensionamiento del biodigestor

Para realizar esta actividad se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1. Se necesita conocer la cantidad de excretas diarias generadas en granjas. A partir de ahí, con los siguientes cálculos se puede determinar el tamaño del biodigestor. Una vez conocido el volumen de excretas diarias, se puede calcular la cantidad de agua necesaria para hacer la dilución, ya que ésta es 1:4. Por lo tanto:

$$\text{Volumen diario agua (L)} = 4 * \text{Volumen diario de excretas (L)} \quad (\text{Ec. 1})$$

2. El volumen de la carga diaria que se introducirá en el biodigestor será la suma del volumen diario de excretas y agua:

$$\text{Vol. carga diaria (L)} = \text{Vol. diario agua (L)} + \text{vol. diario excretas (L)} \quad (\text{Ec. 2})$$

3. El tiempo de residencia de la mezcla en el biodigestor se estima inicialmente en 40 días (d). Debido a que en condiciones de valle el tiempo promedio es de 30 d, de acuerdo a la experimentación realizada en Bolivia (Campero, 2005), y a un promedio de temperaturas de 20°C por año, siendo este tiempo el acorde a las condiciones climáticas de la zona donde se realizó la experimentación. Por lo que se estableció un tiempo de 10 d más que el promedio que se utiliza para zona más templada ya que el altiplano posee un régimen de temperaturas mucho menor. Por tanto, para calcular el volumen líquido del biodigestor:

$$\text{Vol. líquido biodigestor (L)} = \text{Vol. carga diaria (L)} * 40 \text{ d} \quad (\text{Ec. 3})$$

4. El líquido debe ocupar el 80% del volumen total del biodigestor. Así el 20% restante lo ocupará el biogás generado en el proceso de fermentación:

$$\text{Vol. total biodigestor (m}^3\text{)} = \text{Vol. líquido biodigestor (L)} / (0,8 * 1000) \quad (\text{Ec. 4})$$

5. El biodigestor consiste en una manga de geomembrana de PVC. El ancho de rollo utilizado en el presente trabajo es de 1,45 m. La relación entre longitud y diámetro en un biodigestor debería estar entre 5:1 y 10:1. Sabiendo el volumen total del biodigestor y el ancho de rollo de la manga, se puede calcular la longitud de ésta:

$$2 * \text{Ancho de rollo (m)} = 2 * b * \text{radio sección biodigestor (m)} \text{ (Ec. 5)}$$

$$\text{Long. manga (m)} = \text{Vol. total biodigestor (m}^3\text{)} / \text{Sección biodigestor (m}^2\text{)} = \text{Vol. total biodigestor (m}^3\text{)} / (b * (\text{radio sección biodigestor (m)})^2) \text{ (Ec. 6)}$$

$$\text{Long. manga} = \text{Vol. total biodigestor (m}^3\text{)} / ((\text{ancho de rollo (m)})^2 / b) \text{ (Ec. 7)}$$

6. Por último, se debe sumar 1m a la longitud obtenida con el cálculo anterior, se necesita un trozo de manga extra para la unión de los tubos de entrada y de salida ( como se verá más adelante).

### III.2.2 Materiales Utilizados en el biodigestor de bajo coste.

En las investigaciones se utiliza el diseño de biodigestor tipo plug off de PVC, vale decir de plástico reforzado, tanto en sistemas familiares como en sistemas industriales. Este es de polietileno tubular y se construyó con las siguientes características:

- Para el biodigestor familiar de 10m<sup>3</sup> de capacidad, la fosa tuvo 7m de longitud por 2m de ancho arriba, 0.9m de ancho en el fondo y una profundidad de 1m. Las paredes longitudinales de la fosa quedaron con un talud de 10%. El desnivel a lo largo del piso fue de 0.05%, el biodigestor estaba provisto de una tubería de 152 cm, de entrada y otra de salida.
- Para el sistema industrial los sistemas tuvieron una dimensión de 20 m<sup>3</sup>, de 10m de largo y 2m de ancho en manga.

El sector de entrada tanto para sistemas familiares como para industriales se hizo en cemento y ladrillo como materia prima; las dimensiones del sistema familiar de 1m de largo, 1m de ancho y 0.4m de profundidad, se construyó tanto en la entrada como en la salida de los sistemas. La caja quedó separada de la fosa del biodigestor por un muro de bloques de 0.20m de ancho, en ladrillo. Las cajas de entrada y salida cumplen la función de codos; la de salida regula el nivel de líquido que se debe mantener dentro del biodigestor (Figura 24). En cuanto a los sistemas

industriales las dimensiones fueron de 1,5m de largo, de 1,5 m de ancho y una profundidad de 1m.

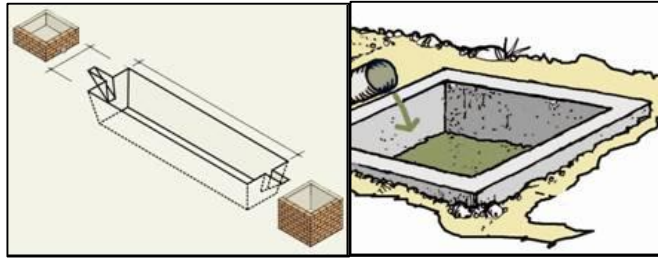


Figura 24. Esquema de colectores de residuo del biodigestor de altiplano.

Fuente: Manual Tecaltema (2009)

Se extendió el biodigestor tubular de polietileno negro, en doble capa, protegido con resina contra luz ultravioleta (LUV), uno de los film tubulares se introdujo en el interior del otro, el siguiente paso fue emparejar las dos secciones tubulares sin que quedaran arrugas o pliegues entre ellos. El biodigestor armado se llevó a la fosa, previamente preparada y conforme a las longitudes del biodigestor se excavo una zanja que permitiera instalar el sistema lo mas cómodo posible y instaló un sistema de impermeabilización del biodigestor con el suelo. Con el extremo de cada tubo dentro de las salidas de la bolsa, se hicieron pliegues regulares con el plástico, que cubrieron el conducto en forma uniforme. Posteriormente, se procedió al llenado del biodigestor, labor que se hizo introduciendo el estiércol líquido fresco por la caja de entrada.

A medida que el líquido subió de nivel dentro del biodigestor, se levantó el plástico en la parte central para evitar que el peso del fluido formara pliegues entre el plástico y las paredes de la fosa. El biodigestor se llenó hasta 70% de su capacidad y se verificó que no quedaran fugas de agua o gas



Figura 25. Sistema de biodigestión anaerobia utilizada

Fuente: Campero (2007)

durante el llenado y funcionamiento (Figura 25). En los reactores en Altiplano, se realiza la construcción de un invernadero de protección alrededor del biodigestor (Fig. 26). En valles se utiliza el sistema de protección perimetral, con adobe (ladrillos de tierra aglomerada).

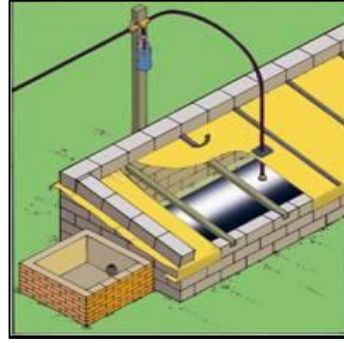


Figura 26. Biodigestor de altiplano.  
Fuente: Manual Tecaltema (2009)

También se dotó al sistema un sistema de reserva, llamado "reservorio" (Figura 27), con una capacidad de 4 m<sup>3</sup>, de almacenaje de biogás para el consumo de la familia.

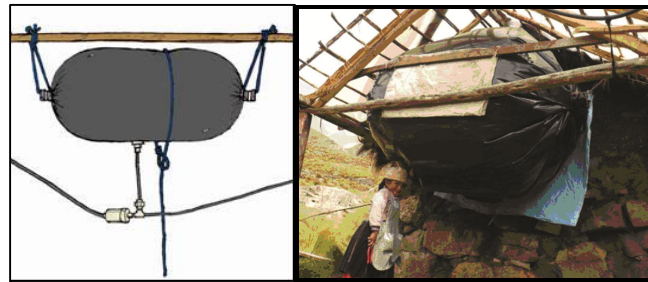


Figura 27. Esquema (a) y fotografía (b) del sistema de reservorio de biogás.

Fuente: Manual Tecaltema (2009)

*Tecnologías en Desarrollo* realizó las innovaciones y mejoras para el modelo adaptado a Bolivia (Figura 28), considerando aspectos de los que depende el logro del objetivo principal al que responde el modelo original, es decir, fácil manejo, bajo costo, disponibilidad y acceso a los materiales requeridos para la instalación entre los más importantes.

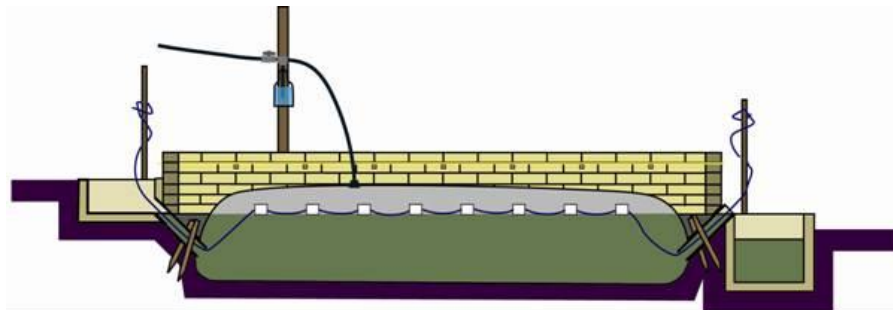


Figura 28. Esquema general del sistema de biodigestión anaerobia (perfil).

Fuente: Manual Tecaltema (2009)

### III.2.3 Descripción de los sistemas experimentales utilizados

#### III.2.3.1 Área industrial (nivel industrial de mataderos)

Se utilizaron tres tipos de sistemas de biodigestión tipo plug off de flujo continuo (B1, B2 y B3) de diferentes materiales con un volumen similar de acuerdo a las siguientes características (Figura 29):

Biodigestor 1 (B1):

- a) Características del biodigestor; Sistema fabricado en film de invernadero, con un micronaje de 700 a 800 micrones, con una capacidad de 40 m<sup>3</sup> de tratamiento de desechos y un volumen de carga de materia 30 m<sup>3</sup>, una campana de biogás con un volumen de 10m<sup>3</sup> y con un esquema de entrada y salida, en base a tubería de plástico de 23 cm.
- b) Tipo de carga máximo de 1 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>, de la carga realizada diaria después del periodo de generación de inóculo, el volumen del biodigestor es de 15 m<sup>3</sup> máximo efectivo.



Figura 29. Instalación de sistemas de biodigestión Industrial (B1, B2 y B3).

Fuente: Campero (2009)

- c) Manejo del biodigestor; El biodigestor se manejó de acuerdo a un protocolo de biodigestores, en base a este se dio el siguiente manejo:
  1. Carga inicial en las siguientes cantidades 437 kg de estiércol, 875 kg de rumen, 178 kg de sangre y agua 4150 L. (Un total de 5,6 m<sup>3</sup> de carga inicial)
  2. Tiempo de Activación o de generación de inóculo; Se procedió a cargar el biodigestor, luego realizar el control en la generación de inóculo en 60 d. Este periodo se dio teóricamente en base la experiencia de biodigestores de altiplano que se maneja en Bolivia.

3. Inoculación de Semilla; Se realizó la inoculación con semilla proveniente de biodigestores ya en funcionamiento, de manera que se fuerce la activación bacteriana dentro de los biodigestores experimentales, en ese sentido se tiene una mezcla de material de Biodigestores en funcionamiento, mezcla de levaduras, rumen de matadero, materia rica en azúcares, ricos en Nitrógeno y suero de leche como amalgama.
4. Tiempo de Generación de Biogás; A partir de los 60 d y analizando la poca actividad bacteriana y respuesta del biodigestor por las condiciones climáticas ligadas a la época en la cual se implementó los biodigestores.
5. Toma de datos de seguimiento; Los datos se tomaron de acuerdo a las características de pH, Tº, Humedad y la generación de gases.
6. Carga interdiaria del biodigestor, se cargó después del periodo de activación interdiariamente con 95 kg de sangre, 159 kg de rumen, 79 kg de estiércol y 500 L de agua siendo un total de 833 kg de carga (mezcla de materia orgánica y agua). La carga interdiaria se realizó martes, jueves y sábado de cada semana.

#### Biodigestor 2 (B2):

- a) Características del biodigestor; Sistema fabricado en geomembrana LDPE con características de mayor flexibilidad y en color negro diferente al sistema de invernadero, con dimensiones similares al B1. El material de PVC que se usó para la fabricación de los biodigestores fue POLYTEX GE- 300 (LDPE), con las siguientes dimensiones 10m largo, 1,3m de diámetro, un micronaje de 0,5mm, este material tiene características de flexibilidad y ductibilidad alta, de manera que es ideal para la implementación de los sistemas. De Color negro humo, con Filtro UV que permite la posibilidad de generar mayores temperaturas internas directamente proporcional a la radiación solar y por ende a la temperatura ambiental.
- c) El tipo de carga se realiza igual que el B1.
- d) Manejo del biodigestor; este punto se analizó con el siguiente manejo:
  1. Carga inicial es similar a B1.
  2. Tiempo de Activación o de generación de inóculo, se procedió al igual que el Biodigestor 1.

3. Inoculación de Semilla, en este punto se realizó la inoculación al sistema en la misma composición que B1.
4. Tiempo de Generación de Biogás, a partir de los 60 d.
5. Toma de datos de igual forma que en B1.
6. Carga interdiaria del biodigestor, el biodigestor 2 se cargó después del periodo de activación con 125 kg de sangre, 208 kg de rumen, 0 kg de estiércol y 500L de agua siendo un total de 833 kg de carga (mezcla de materia orgánica y agua). La carga interdiaria se realizó los mismos días.

Biodigestor 3 (B3):

- a) Características del biodigestor, Sistema fabricado en geomembrana HDPE con características de flexibilidad normal y en color negro diferente al sistema de invernadero, con características similar que B1 y B2. La geomembrana de Polietileno con las mismas dimensiones de diámetro y micronaje que B2, este material tiene características de flexibilidad y ductibilidad alta, pero que a diferencia de la Geomembrana (LDPE), se implementa mayor flexibilidad con el fin de generar un volumen extra de biogás al momento de generar metano de manera que se pueda incrementar teóricamente más el volumen efectivo de acumulación de gases, sin que por esto se pierda las características propias del material en cuanto a durabilidad y funcionamiento.
- c) Tipo de carga máximo de  $1 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ , al igual que los otros dos sistemas.
- d) Manejo del biodigestor; se dio de la siguiente manera:
  1. Carga inicial es la misma en los 3 sistemas.
  2. Tiempo de Activación fue de 60 d.
  3. Inoculación de Semilla, se realizó en los 3 sistemas, de la misma manera.
  4. Tiempo de Generación de Biogás; se dio a partir de los 60 d.
  5. Toma de datos de seguimiento se realizó de la misma manera que en B2.
  6. Carga interdiaria al biodigestor; Se cargó después del periodo de activación interdiariamente con 77 kg de sangre, 128 kg de rumen, 128 kg de estiércol y 500L de agua siendo un total de 833 kg de carga (mezcla de materia orgánica y agua). La carga interdiaria se realizó los mismos días.

### III.2.3.2 Área rural (nivel familiar)

Como parte de la investigación impulsada por Tecnologías en Desarrollo en torno al comportamiento de la temperatura a la cual opera el modelo de biodigestor desarrollado para Bolivia, se hicieron pruebas en altiplano (altura media entre 3500-4000 m con una temperatura promedio de 10°C y un rango de amplitud térmica elevado. Siguiendo el objetivo propuesto de realizar el tratamiento integral de los residuos producidos a nivel familiar se optó por una solución como se muestra en la Figura 30.

Este tipo de sistemas analizados en esta investigación han sido adaptados del tipo Vietnam, vale decir de sistemas que funcionan netamente en condiciones de trópico, en ese sentido y con las condiciones fisiográficas en Bolivia, los sistemas fueron optimizados para su adecuado funcionamiento. Los que se han considerados idóneos son del tipo tubular de PVC modelo Taiwán (Preston, 1995). El material plástico (en forma laminar) es una mezcla de lodos rojos residuales de la extracción de la bauxita y contiene PVC, plasticador, estabilizador y otros ingredientes (Gopalakrishnan 1982; Lockstoke 1983).



Figura 30. Esquema general del sistema de biodigestión familiar.

Fuente: Tecnologías en Desarrollo (2007)

El sistema utiliza los materiales y características del Biodigestor 3 (B3).



### III.3 METODOLOGÍA ANALÍTICA Y ESTADÍSTICA

#### III.3.1 Toma de muestras

La toma de muestras para gases (dos meses para cada reactor), se realizó diariamente, generalmente entre las 8 y 11 de la mañana. El experimento se realizó en periodos de octubre a diciembre entre los años 2006-2009. La toma de datos de temperaturas se llevó a cabo diariamente en la época de primavera. Las lecturas de temperaturas se tomaron en 3 puntos, a la entrada del biodigestor, a la salida y finalmente por la salida del biogás, de manera que se insertó un sonda de temperatura a 2 metros, colocada a 45cm. de la parte superior del sistema de biodigestión (Figuras 31 y 32).



Figura 31. Toma de muestras sistema de biodigestión familiar



Figura 32. Toma de muestras sistema de biodigestión Industrial.

Fuente: Campero, 2009

#### III.3.2 Temperatura

La temperatura fue monitoreada mediante un sensor de temperatura (termopar) colocado en el interior del biodigestor por la parte inferior del sistema, conectado a un termómetro electrónico (TESTO 112).

#### III.3.3. Determinación del pH

Se midió directamente sobre las muestras, con un electrodo Crison 52-11 conectado a un medidor de pH/mV Crison GLP 12. Se realizó la calibración con disoluciones tampón estándar CRISON de pH 7,02 y 4 a 20°C.

### III.3.4 Sólidos totales, volátiles y sedimentables

La determinación del contenido de sólidos totales (ST) y de sólidos volátiles (SV) se realizó de acuerdo con el método 2540 E de *Standard methods for examination of water and wastewater* (APHA, 1995). Los ST se determinaron mediante el peso del residuo seco, secado a 105°C en estufa, durante 24 horas, referido al peso de materia fresca inicial. Para el cálculo se utiliza la siguiente ecuación de sólidos totales:

$$ST \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = [(\text{Peso a } 105^{\circ}\text{C} - \text{Peso crisol}) / \text{Volumen de muestra}] \text{ (Ec 8)}$$

La determinación de los sólidos volátiles (SV) se realizó sobre la misma muestra, mediante calcinación, en mufla ORL-EI, a 550°C durante 2 horas. El contenido en sólidos volátiles se determina por diferencia entre el residuo seco y las cenizas, siguiendo la ecuación para sólidos volátiles.

$$SV \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = [(\text{Peso a } 105^{\circ}\text{C} - \text{Peso a } 550^{\circ}\text{C}) / \text{Volumen de muestra}] \text{ (Ec 9)}$$

El análisis de sólidos sedimentables (SS) presentes en una muestra de agua indica la cantidad de sólidos que pueden sedimentarse a partir de un volumen dado de muestra en un tiempo determinado (45 min) usando el Cono de Imhoff (1L).

### III.3.5 Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es una medida indirecta del contenido de materia orgánica y otros compuestos oxidables. Se ha utilizado el método 5220B propuesto en *Standard methods for examination of water and wastewater* (APHA; 1995, CNA 1996), conocido también como método de reflujo abierto.

La determinación de la DQO se determina según la ecuación para determinar la demanda química de oxígeno.

$$DQO \text{ (mg O}_2\text{ L}^{-1}\text{)} = [ (V_{Bl} - V_m) * 8000 * N ] / \text{Volumen muestra} \text{ (Ec. 10)}$$

$V_{Bl}$ = Volumen de Ferro-amonio sulfato consumido en la valoración del blanco.

$V_m$ = Volumen de Ferro-amonio sulfato consumido en la valoración de la muestra.

N= Normalidad de la Sal de Mohr:

### III.3.6 Nitrógeno Kjeldhal

El método ha sido adaptado del método 4500 de *Standard methods for examination of water and wastewater* siguiendo a Brenner (1965).

### III.3.7 Fósforo total ( $P_T$ )

A partir de las cenizas obtenidas por calcinación a  $550^\circ\text{C}$ , se realiza una extracción con ácido clorhídrico concentrado. El fósforo inicialmente contenido en las cenizas se disuelve y pasa a la solución. Utilizando un método colorimétrico, adaptado del método AOAC, (1995), se determina el contenido de fósforo. La lectura de absorción se realiza a  $430\text{ nm}$  mediante el espectrofotómetro "UNICAM UV". Una vez preparada la solución se debe dejar reposar 1 hora antes de realizar la lectura.

### III.3.8 Cationes (Na, K, Ca, Mg, Cu y Zn).

Los cationes se analizan utilizando el equipo "PERKIN-ELMER 2000", sobre la base de un extracto ácido sobre las cenizas, realizado con el mismo procedimiento que en el método de determinación del fósforo. Los cationes Na y K se determinan mediante la técnica de fometría de llama en emisión, mientras que la determinación del Ca, Mg, Cu y Zn, se realiza en absorción atómica (AOAC, 1995).

### III.3.9 Composición de biogás ( $\text{CH}_4$ , $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{O}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{CO}_2$ )

La producción de biogás, volumen y composición, se midió utilizando el método de proporciones mediante un método estequiométrico de utilización del equipo Crow Cron modelo Triple Plus+ 1098e (Figura 33), que registra las proporciones de  $\text{NH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ , y  $\text{H}_2\text{S}$ .



Figura 33. Medidor de gases Cow Cron

Fuente : Elaboración propia

La composición del biogás se encontró utilizando la relación de LEL % y convirtiendo ésta a su valor de porcentaje (%). Entonces conociendo la cantidad de biogás analizado, se podía saber cuánto de ese biogás era  $\text{CH}_4$  y cuánto  $\text{CO}_2$  en el sistema de biodigestión anaerobia.

El cálculo de los niveles de inspección basados en el LEL es un proceso de cinco pasos:

1. Determinar el LEL del contaminante en cuestión. Los LELs típicamente se

expresan como concentraciones en porcentaje (v/v) en el aire.

2. Convertir 10% de la concentración LEL del compuesto a concentración de fase de vapor ( $C_{VAP}$ ) expresada en  $\text{mol m}^{-3}$ :

$$C_{VAP} = (0.10 \times \text{LEL}) \frac{P}{(R)(T)} \times 10 \quad (\text{Ec 11})$$

En donde:

$C_{VAP}$  = LEL expresado como concentración en fase de vapor,  $\text{mol m}^{-3}$

LEL = Límite explosivo inferior, porciento (volumen/volumen)

P = Presión total, 1 atmósfera (atm) (supuesta)

R = Constante de gas ideal,  $0.08206 \text{ atm L mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

T = Temperatura, 298.15 K (supuesta).

La calibración del medidor de gases se realizó mediante cromatografía de gases con el equipo GC8000 Top de Termo Instruments, equipado con un inyector para columnas empacadas 70 y un detector de conductividad térmica. Se utiliza una columna empacada Porapak N de 2 mm de diámetro y 2m de longitud. La temperatura del detector es de 120°C y la del inyector de 130°C. La temperatura del horno se mantiene constante a 30°C. El tiempo total de análisis es de unos 4 minutos. La calibración se realiza utilizando dos patrones, uno mezcla de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  y, el otro mezcla de  $\text{N}_2$  y  $\text{CO}_2$ , de concentración conocida. Se utilizaron diferentes volúmenes de muestra, para obtener los diferentes puntos de la recta de calibración.

#### III.4. ESTUDIOS EN COMUNIDADES

Se ha aplicado un estudio exhaustivo en base a encuestas personales en la región objetivo del área rural, de Cochabamba tercera ciudad en importancia de Bolivia, esta zona cuenta con mucha población dispersa, y por ende en pobreza extrema entre sus habitantes. Este tipo de estudios ofrecen una correcta imagen de la situación real debido a que son investigaciones en campo. Se trata de un estudio transversal con una muestra representativa de la población objetivo en un momento determinado.

Las encuestas tienen su origen en las investigaciones de mercados y en los sondeos de opinión. Los temas estudiados gracias a este método son: educación,

familia, medio ambiente, hábitos, deporte. Por ello, este método de investigación social es uno de los más utilizados en el campo de la sociología.

Las características fundamentales de una encuesta para Sierra (2003), son:

- La encuesta es una observación indirecta de los hechos por medio de las manifestaciones expresadas por los interesados.
- Es un método preparado para la investigación.
- Permite una aplicación masiva que, mediante un sistema de muestreo, puede extenderse a una población.
- Hace posible que la investigación social llegue a los aspectos subjetivos de la sociedad.

Pero, la principal ventaja de esta técnica de investigación social es la posibilidad de diseñar el análisis de forma que mejor se adapte a los objetivos y la de obtener mediciones cuantitativas de variables subjetivas de un amplio número de individuos, es quizá lo que hace de la encuesta, la técnica de investigación social más utilizada (Ruiz, 2001).

El elemento imprescindible en la encuesta es el cuestionario. Manzano, Rojas y Fernández (1996), entienden por cuestionario un cuadernillo que contiene el listado de todas las preguntas que utilizamos para obtener información que interesa en la investigación, y que sirve como medio para estructurar la entrevista de forma ordenada, a fin de garantizar que se van a plantear las mismas preguntas a todos los encuestados.

Para Rodríguez (1994), el cuestionario es una especie de entrevista masiva y, como tal, presenta algunos de los problemas típicos de la producción en serie como es la falta de oportunidades de interacción e interpretación. Por contra, la ventaja es presentar un mismo estímulo a un número elevado de sujetos de forma simultánea, lo que proporciona una gran rentabilidad.

Según Sierra (2003), el cuestionario cumple la función de enlace entre los objetivos de la investigación y la realidad observada. Las condiciones fundamentales que debe reunir se pueden resumir en dos: traducir los objetivos de la investigación en preguntas concretas sobre la realidad y ser capaz de suscitar en los encuestados, respuestas sinceras y claras a cada pregunta.

Cuando las cuestiones que desea formular el investigador se asigna convencional o empíricamente un valor numérico, lo que permite cuantificar el grado de esa característica o actitud y son ordenadas en un cuadro, se conoce con el nombre de escala (Cea, 1996; Sierra, 2003).

La mayor dificultad que presenta esta forma de encuestas, es la necesidad de obtener muestras poblacionales muy amplias a las que aplicar la entrevista y que quieran/sepan responder adecuadamente a las preguntas. Para minimizar este problema, se realizó la primera fase de screening, con la que se pretende identificar la población objetivo cuyas comunidades son susceptibles de instalar los biorreactores. Posteriormente una segunda fase confirmatoria de las necesidades y adecuación para la instalación. Con esto se consigue aplicar el instrumento a un grupo menos numeroso de población.

El cuestionario elegido (que puede encontrarse íntegro en CAP. VIII. ANEXOS) pretende detectar y calibrar las necesidades energéticas de la población rural elegida. Se recogen varias necesidades energéticas básicas y se utilizan escalas fácilmente comprensibles.

### III.5 ESTUDIOS ESTADÍSTICOS

El análisis estadístico se realizó para cada experimento por separado, siendo las variables independientes, la temperatura ambiental y el tipo de clima sobre los que se desarrollaron los biodigestores. Se realizó el análisis de varianza, análisis de factorial y componentes principales mediante el paquete estadístico SAS.

Si la interacción entre los diferentes efectos resulta significativa se realiza el test de Tuckey para detectar diferencias entre los diferentes tratamientos. Si la interacción no es significativa, pero sí lo son los efectos principales, la separación de medias se realiza mediante el test de Duncan. En todos los casos se utilizó un nivel de confianza del 95%.

# IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN





## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### IV.1 VALORACIÓN DE LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE LA ZONA RURAL DEL VALLE, DE BOLIVIA.

El primer paso a la hora de construir un instrumento de evaluación es definir el constructo que quiere evaluarse, entendiendo por este el concepto, atributo o variable objeto de medición (Haynes, Richard y Kubany, 1995). Para ello es necesario realizar una revisión bibliográfica sobre el tema objeto de estudio lo que permite concretar los componentes que lo integran (Carretero-Dios y Pérez, 2005). En este caso, ante la novedad del fin de la investigación y la escasez de instrumentos de valoración de la implantación de programas (Alvira, 1991; Anguera, 1991, 1995; Chacón, Anguera y López Ruiz, 2000), se decidió por construir un instrumento.

En la zona de Carrasco, en condiciones de valle, se han realizado las encuestas expuestas y descritas en el Capítulo 3, en las encuestas se tomaron un total de 20 familias sobre un total de 100 que se estiman viven en la zona. El resultado obtenido en estas encuestas, tras un básico tratamiento estadístico, puede ser generalizado en base a las fases en las que se ha distribuido las encuestas.

Cuando el objeto de estudio es un concepto amplio, en nuestro caso, valorar la calidad y cantidad de energía utilizada en el área rural en relación a los ingresos y calidad de vida general, lo más lógico es descomponer ese concepto en diferentes dimensiones/subescalas o lo que es lo mismo distinguir diferentes aspectos de la misma (González, 1986). Para lo cual, el cuestionario se estructura a partir de cuatro bloques temáticos. Las dimensiones de nuestra investigación son:

1. La primera dimensión, a la que llamaremos información general o "DATOS DEL HOGAR", pretende obtener información relativa al tipo de vivienda típica en la zona.
2. La dimensión "CONSUMOS Y GASTOS DE ENERGIA ESTABLECIDOS" pretende conocer cuál es la situación energética de las comunidades encuestadas. Esta sección será desarrollada estadísticamente en la presente tesis con objeto de conocer los consumos y necesidades reales de la población objetivo.

3. "INGRESOS DE LA UNIDAD FAMILIAR" es la tercera dimensión. Intenta conocer los ingresos medios y tipos de ingresos en su relación con el gasto energéticos.
4. La cuarta dimensión, "INTERES EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DOMÉSTICOS Y BIOGAS", evalúa la posibilidad de completar la vivienda autoenergética con los paneles solares y la posibilidad de implantación con ayuda material y/o económica de la población objetivo.

#### IV.1.1 Análisis estadístico de los ítems

Se ha seguido un procedimiento de análisis atendiendo a lo establecido por Carretero-Dios y Pérez (2005). En primer lugar, se llevó a cabo el análisis estadístico de los ítems de la Dimensión 2 (Tabla 16) objetivo de la presente Tesis Doctoral.

Los criterios para conservar un ítem (los ítems en gris fueron desechados en el tratamiento estadístico posterior) fueron varios: valor mayor o igual a 0,30 en el coeficiente de correlación corregido ítem-total (Nunnally y Bernstein, 1995), desviación típica mayor a 1 (Valor-Segura, Expósito y Moya, 2009). Se calculó la fiabilidad de cada componente propuesto originalmente por los autores a través el índice de consistencia interna alfa de Cronbach (Tabla 17).

Para conocer la estructura factorial empírica de la EPOD, se realizó un análisis factorial exploratorio sobre los resultantes tras el análisis estadístico de los mismos, por el método de extracción de componentes principales y posterior rotación Varimax.

Antes de realizar el análisis, se calculó la medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y el test de esfericidad de Bartlett. El índice KMO mostró un valor de 0.845 y el test de Bartlett resultó estadísticamente significativo ( $\chi^2_{351} = 2416.402$ ;  $p < 0.005$ ), lo que llevó a concluir que la aplicación del análisis factorial resultaba pertinente.

El procedimiento de rotación utilizado fue Varimax a pesar de que se aconseja para casos en que los factores no están relacionados. Se optó por éste debido al interés teórico de separar, en la medida de lo posible, los factores resultantes, a pesar de constatar la relación de los factores (Carretero-Dios y Pérez, 2007). La estructura dimensional resultante está conformada por cuatro que conjuntamente explican un 71.64% de la varianza.

Para comprobar que la escala sigue la estructura factorial esperada, se llevó a cabo un análisis factorial confirmatorio mediante el programa STATISTICA V.4. Los parámetros fueron estimados mediante el método de máxima verosimilitud. Para evaluar la adecuación de los modelos sometidos a prueba, se optó por la valoración conjunta de un grupo de índices (Tanaka, 1993).

El ajuste de cada una de las escalas fue evaluado con una combinación de índices de ajuste absolutos y relativos. Entre los ajuste absolutos encontramos el estadístico chi cuadrado, puesto que es sensible al tamaño de la muestra. Se utilizó también la ratio entre chi cuadrado y grados de libertad ( $X^2/df$ ) para probar los modelos (Jöreskog, 1969). En un modelo "perfecto", esta ratio tendrá valor 1,0 y las ratios por debajo de 2,0 se consideran aceptables (Carmines y McIver, 1981). El GFI (*Goodness Of Fit Index*) es otro índice de ajuste absoluto que indica la cantidad relativa de varianza y covarianza, reproducida por el modelo específico, comparada con el modelo saturado y cuyo valor debe ser igual o superior a 0,90 para considerar aceptable el ajuste de un modelo. Sin embargo, esos índices absolutos son afectados por el tamaño de la muestra porque están basados en variaciones simples del chi cuadrado, por lo que hemos usado el RMSEA (*Root Mean Square Error of Approximation*) que minimiza este problema. El RMSEA es un índice de ajuste absoluto cuyos valores de 0,06 o menores indican un ajuste excelente y los valores de 0,8 o menores indican un buen ajuste (Hu y Bentler, 1999; Jöreskog y Sörborn, 1993).

Tabla 16. Análisis estadístico de los ítems de la Dimensión 2.

Tipo de Variables	DT	R II-c	$\alpha$ sin ítem
Gastos iluminación			
VAR00001 Gasto General (Tiempo - Duración)	6,48362	0,362	0,893
VAR00002 Como Gasto General (Cantidad)	2,62839	-0,047	0,880
VAR00003 Focos (Diesel - Cantidad)	2,42852	0,321	0,885
VAR00004 Focos (Diesel- Consumo)	1,48483	0,033	0,884
VAR00005 Focos (Gasolina - Cantidad)	2,11032	0,445	0,879
VAR00006 Focos (Gasolina- Consumo)	2,01152	0,575	0,876
VAR00007 Focos (Baterías - Cantidad)	1,98995	0,244	0,877
VAR00008 Focos (Baterías- Consumo)	1,99826	0,177	0,875
VAR00009 Lámparas Gas (Cantidad)	2,14034	0,561	0,876
VAR00010 Lámparas Gas (Consumo)	1,77808	0,633	0,876
VAR00011 Lámparas Keroseno (Cantidad)	1,56402	0,673	0,876
VAR00012 Lámparas Keroseno (Consumo)	1,58538	0,729	0,875
VAR00013 Linternas (Cantidad)	1,71202	0,688	0,875
VAR00014 Linternas (Consumo)	2,00704	0,082	0,885
VAR00015 Mechero (Tiempo - Duración)	6,48362	0,362	0,893
VAR00016 Mechero (Cantidad)	2,62839	-0,347	0,880
VAR00017 Velas (Tiempo - Duración)	2,47770	-0,47	0,891
VAR00018 Velas (Cantidad)	1,96335	0,185	0,883
Gastos comunicación			
VAR00019 Radio Receptor (Número)	2,15954	0,246	0,882
VAR00020 Radio Receptor (Pilas - consumo)	1,48763	0,492	0,879
VAR00021 Radio Rec. (Gen. Diesel - cons.)	1,58398	0,485	0,879
VAR00022 Radio Rec. (Gen. Gasolina - cons.)	1,86765	0,526	0,877
VAR00023 Radio Emisor-Receptor (Número)	0,0379	0,624	0,877
VAR00024 Radio Emisor-Rec (Pilas - consumo)	0,01688	0,521	0,877
VAR00025 Radio Em-Rec (Gen. Diesel - cons.)	0,08499	0,496	0,878
VAR00026 Radio Em.-Rec. (Gen. Gas.- cons.)	0,08492	0,485	0,878
VAR00027 Televisión (Número)	1,56478	0,407	0,880
VAR00028 Televisión (Gen Diesel - consumo)	2,13776	0,412	0,879
VAR00029 Televisión (Gen Gasol. - consumo)	1,80981	0,451	0,879
Otros Gastos energéticos			
VAR00030 Bombeo (Consumo Diesel)	1,80525	0,579	0,877
VAR00031 Bombeo (Consumo Gasolina)	1,86537	0,489	0,878
VAR00032 Molienda (Manual)	1,49912	0,230	0,881
VAR00033 Molienda (Consumo Diesel)	1,80624	0,027	0,885
VAR00034 Molienda (Consumo Gasolina)	1,56868	0,416	0,879
VAR00035 Seca Aliment. (Consumo Diesel)	2,47179	0,063	0,887
VAR00036 Seca Aliment. (Consumo Gasolina)	1,98824	0,147	0,884
VAR00037 Refrigeración (Consumo Diesel)	1,30793	0,769	0,876
VAR00038 Refrigeración (Consumo Gasolina)	1,20256	0,508	0,879
VAR00039 Fab. de chicha (Consumo Diesel)	1,38459	0,608	0,877
VAR00040 Fab. de chicha (C. Gasolina)	1,30415	0,600	0,878

VAR00041 Otros (Consumo Diesel)	1,38459	0,608	0,877
VAR00042 Otros (Consumo Gasolina)			

DT= Desviación típica; R IT-c= coeficiente de correlación corregido ítem-total;  $\alpha$  sin ítem= alfa de Cronbach sin el ítem correspondiente Fuente: Elaboración propia

En lo que respecta a los índices relativos fueron seleccionados el IFI (*Incremental Fit Index*), TLI (*Tucker-Lewis Index*) y el CFI (*Comparative Fit Index*) para evaluar el ajuste del modelo. Los valores de los índices IFI, TLI y CFI deben ser iguales o superiores a 0,90 para considerar aceptable el ajuste de un modelo (Bentler, 1995), aunque pueden ser considerados como admisibles valores superiores a 0,85, aunque lo ideal son valores superiores a 0,90 (Ntoumanis, 2001).

En la Tabla 17 se recogen la información proporcionada por los índices de ajuste utilizados en el análisis de los tres modelos examinados: el modelo resultante del análisis factorial exploratorio (modelo AFE) con todos los ítems y el modelo con mejores índices de ajuste (Modelo 1) sólo con los ítems seleccionados.

Tabla 17. Indicadores de ajuste y error del análisis factorial confirmatorio.

	RMSEA	GFI	IFI	TLI	CFI	$\chi^2$	gl	$\chi^2$ /gl
Modelo AFE	0,096	0,740	0,862	0,841	0,869	617,09	309	1,99
Modelo 1	0,400	0,934	0,986	0,975	0,985	45,88	39	1,17

Fuente: Elaboración Propia

#### IV.1.2 Análisis de fiabilidad

La consistencia interna de la escala fue evaluada con el alfa de Cronbach, para los modelos AFE y 1. Puede observarse que el modelo 1 tiene una consistencia interna mayor, tanto para la escala total, como para los factores resultantes. Razón por la que optamos por utilizar el modelo 1, (Tabla 18).

Tabla 18. Fiabilidad de cada uno de los modelos.

	Gastos Iluminación	Gastos Comunicación	Otros Gastos
Modelo AFE	0,857	0,636	0,638
Modelo 1	0,893	0,789	0,805

Fuente: Elaboración Propia

#### IV.1.3 Discusión de las encuestas

De estos resultados se comprueba que en las distintas comunidades rurales y periurbanas de Bolivia las familias usan diferentes fuentes energéticas con distintos fines, sean estos productivos, domésticos o de servicios comunales. La energía usada con fines productivos en la agricultura es manual y mecanizada. En la primera se usa la energía física del hombre y del animal, en este caso bueyes, en la segunda existen algunos tractores en la comunidad que hacen su servicio en el preparado del terreno para la siembra. Las labores como el aporcado y el deshierbe se las realiza manualmente.

La energía usada con fines domésticos se emplea principalmente en la cocción de alimentos, iluminación y comunicación. Cada uso dispone de fuentes específicas como veremos a continuación.

Para la cocción de alimentos, sobre todo en la cocina, para la preparación de los alimentos el combustible más usado es la leña (53,2%), seguido de una combinación de gas y leña (44,2%) y solo usa gas un porcentaje muy reducido de las familias (2,6%) como se puede observar en la Figura 34.

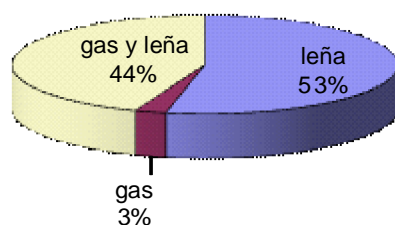


Figura 34. Fuentes Energéticas para la Cocción de Alimentos.

Fuente: Elaboración propia.

Entre los que utilizan gas (fundamentalmente gas licuado), estos lo hacen a gran escala, y prescinden de otras fuentes energética como se demuestra en la Figura 35 en la que la mayor parte de los encuestados utilizan más de 5 kilos de gas al mes.

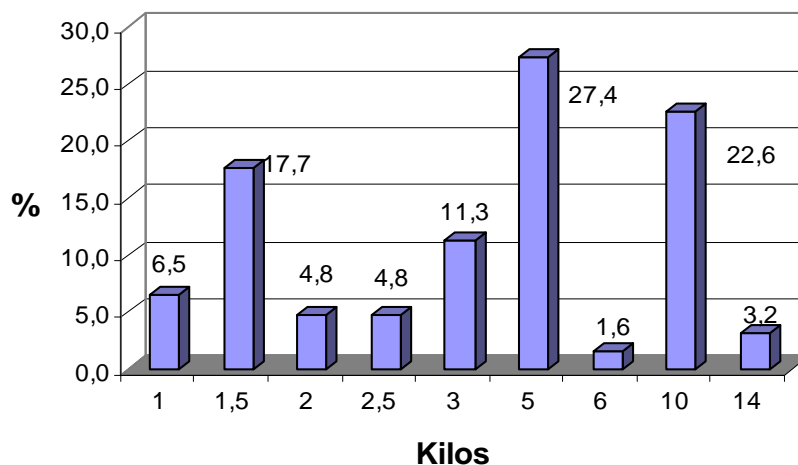


Figura 35. Consumo de Gas licuado.

Fuente: Elaboración propia

Referente a la iluminación y comunicación, para la iluminación de los distintos ambientes que conforman la vivienda campesina (cuarto y cocina principalmente) en Carrasco lugar donde se realizó la primera etapa de la investigación, requieren de energía por un lapso de cuatro horas, entre la mañana y la noche. Este requerimiento es satisfecho con fuentes tradicionales como velas, diesel en mecheros y lámparas, pilas y otras fuentes. En los estratos de mayores ingresos se tiende a la adquisición de generadores a diesel o gasolina. El consumo de diesel para mecheros es común por la relativa accesibilidad y su facilidad de transporte, es así que el 68% (Figura 36) usan un litro al mes. En algunos casos se llega a consumir hasta un máximo de 2 litros al mes (13,6%).

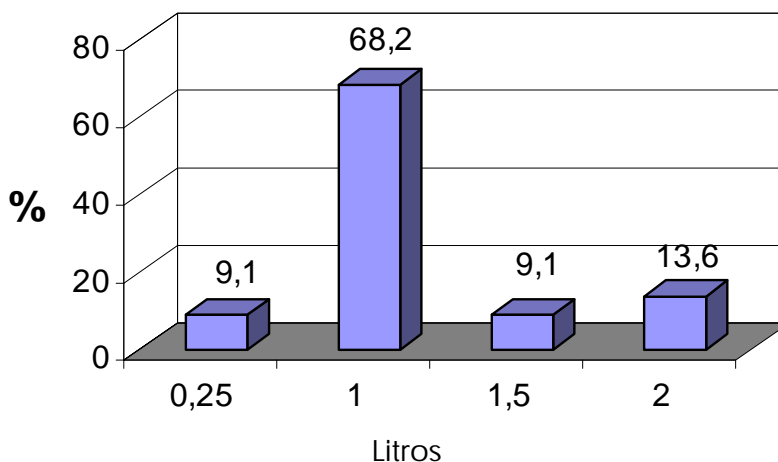


Figura 36. Consumo de combustible diesel (L) en mecheros por mes.

Fuente: Elaboración propia.

Las velas son de cera parafina, al entrar en contacto con el fuego, estas entran en combustión produciendo luz y calor; sus dimensiones promedio son de 20 cm. de largo, de un diámetro de 1.5cm; son también usadas en proporciones considerables par la iluminación de los hogares rurales, la mayoría (40,8%) usa entre 12 y 16 velas al mes (Figura 37), algunos llegan a usar hasta 41 velas (7%) al mes.

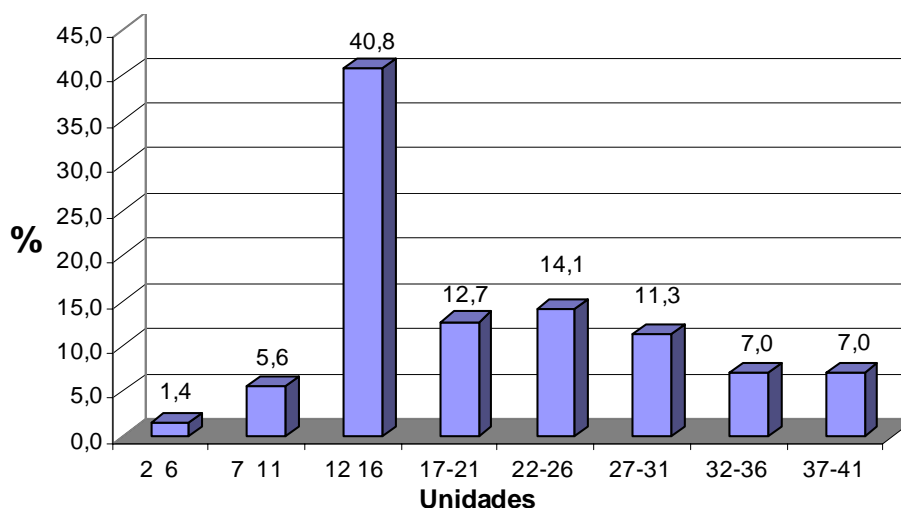


Figura 37. Consumo Mensual de Velas.

Fuente: Elaboración propia

Otra opción utilizada es la iluminación con gas, que en zonas tan distantes como las comunidades rurales de Bolivia es un lujo, por las distancias que tienen que transportar una garrafa de gas desde los pocos puntos de venta, hasta la vivienda campesina donde no llega el camino carretero, aspecto que condiciona el uso de gas en iluminación a unas pocas horas aunque el campesino tenga capacidad de compra. De ahí que, a muchos campesinos (27,4%) una garrafa de 10 kilos les dura dos meses (Figura 4), cuando con una iluminación de 4 horas día no duraría ni 15 días; es curioso como algunas familias (17,7%) pueden alumbrarse con una garrafa de gas un poco más de 6 meses.

En lo que se refiere a las pilas en iluminación y radiorecepción. Las linternas son usadas principalmente para el riego de las parcelas en las noches, de las zonas agrícolas, por lo que su uso es intensivo en época de riego. La mayoría (38,5%) usa 4 pilas al mes por familia minimamente (Figura 38).



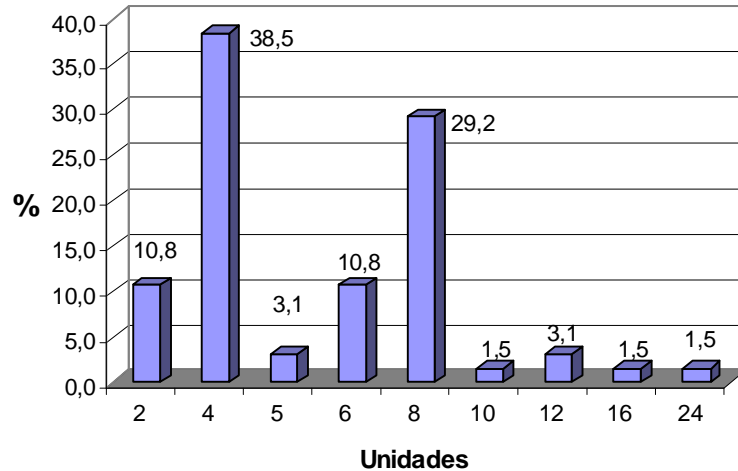


Figura 38. Consumo mensual de pilas seca en iluminación.

Fuente: Elaboración propia

Las radios están muy difundidas en la zona, es difícil encontrar una familia que no tenga una radio. La radio se ha constituido en un medio de comunicación importante con el mundo externo y a la vez con otras comunidades del entorno. La fuente energética más importante para las radios son las pilas secas, una gran parte de la población (33,8%) usa entre 2 y 4 pilas al mes (Figura 39).

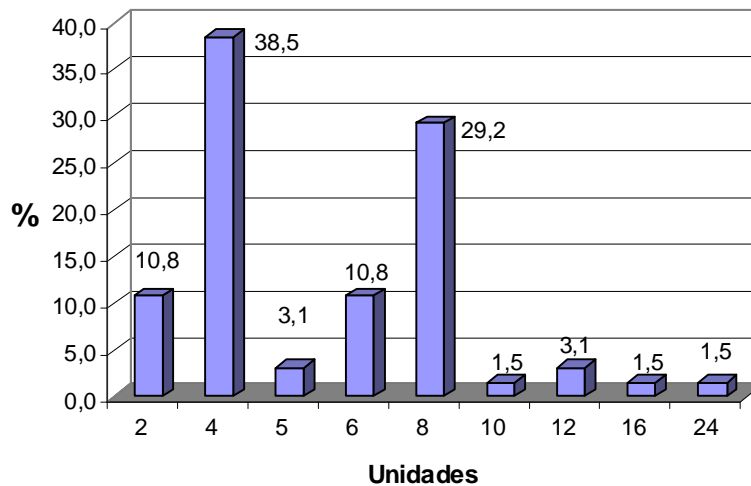


Figura 39. Consumo de Pilas secas en el mes.

Fuente: Elaboración propia.

Mediante este estudio se han identificado las energías utilizadas en la zona de estudio en (provincia Carrasco) Cochabamba, Bolivia. Datos recientes (2010) indican que aún existen 900.000 familias rurales (5 millones de personas) de las

cuales más de un 80% no tienen acceso a la energía eléctrica y están marginadas de los beneficios que conlleva esta energía, en términos de incrementar su calidad de vida y ofrecer oportunidades para una incorporación de esa población a la vida nacional en un marco de dignidad y de equidad social.

Concretamente, el presente estudio de muestra que en zonas de valle en el plano energético, solo un 16% de la población rural cuenta con energía eléctrica, la distribución de hidrocarburos, aparejada a la deficiente infraestructura vial, se estima que sólo llega a un 20% de la población rural. Predomina el consumo de energéticos tradicionales como la biomasa que cubren cerca del 89% de las demandas energéticas campesinas. También el 11% de las demandas restantes de energía, a nivel de las familias rurales, son cubiertas por energéticos de corte tradicional como ser las pilas, los mecheros, lámparas a GLP y las velas. En términos monetarios, la compra de estos energéticos, representan casi el 80% de los gastos energéticos totales que realizan las familias campesinas. La principal fuente energética es la biomasa que en promedio cubre el 80% de la demanda total rural de energía, existiendo algunas zonas donde este recurso cubre hasta el 97% de esta demanda (INE, ESMAP 1997).

Si diferenciamos por tipos de utilización, en las comunidades de los valles, el 91% de la demanda para la cocción de alimentos está cubierta por leña, mientras en el altiplano norte esta demanda está satisfecha en un 53% por estiércol. La escasez de biomasa en muchas zonas se torna crítica y el indicador más relevante de esta situación es el tiempo que se debe dedicar a la recolección. En promedio se emplea un valor en horas equivalente a más de una jornada completa por semana para la recolección de biomasa y en algunas zonas, como consecuencia de la poca disponibilidad de este energético, este tiempo tiende a incrementarse. Entre los energéticos comerciales utilizados para cocción de alimentos, el GLP es la fuente más utilizada en el área rural (38% de los hogares). Sin embargo, la cobertura del GLP en el sector rural está limitada por la mala calidad del servicio (irregularidad de abastecimiento, adulteración del peso, etc.), la inversión inicial (compra de cocinas y garrafas) y los costos de transporte que se incrementan en función de las distancias (Fernández, 2007).

En términos de gasto, los hogares rurales gastan más en pilas, velas o kerosén que en leña para cocción. Se puede decir que es energía cara que recibe un uso estratégico, pues la misma esta destinada a cubrir las demandas de iluminación y comunicación de las familias campesinas. En promedio, la compra de biomasa para uso energético, en aquellas zonas donde existe esta práctica, representa un 22% de los gastos en energía de una familia, mientras que la compra de energéticos como electricidad, velas, pilas y baterías representa el 78% del gasto energético familiar.

Las diferencias de consumo en biomasa de una familia rural son de 19 veces respecto a una familia urbana, en el kerosene la diferencia de consumo es 1,5 veces más en el sector rural, para el caso del GLP una familia urbana consume 12 veces más que su homóloga rural y finalmente, en el caso de electricidad una familia urbana consume 86 veces más energía eléctrica que una familia rural (INE, ESMAP 1997).

Totalizando físicamente el volumen de energético consumidos, una familia rural demanda 1,6 veces más que una familia urbana, sin embargo cuando se analiza los rendimientos de los energéticos y se calcula la energía útil que utiliza cada familia, la relación se invierte: una familia urbana dispone de 3 veces más de energía útil que una familia rural. Esta situación muestra la ineficiencia en el uso de la energía, consecuencia de la utilización de tecnologías energéticas de bajo rendimiento.

Por lo tanto se demuestra que el sector rural está prácticamente marginado de los sistemas convencionales de energía. En las zonas rurales donde la leña se compra, se observa una diferencia de precio de 3 a 1 en relación al GLP y una diferencia mayor aún en el caso del estiércol. Desde el punto de vista de equidad, es sensible en la población rural la falta de oportunidad de acceso a este combustible.

Para subsanar el estado de indigencia energética en el que se encuentra, las alternativas más viables son: la energía solar (utilizando la tecnología fotovoltaica que convierte directamente la radiación solar en electricidad y los biodigestores en energía radiante) y la de biogás consideradas que no incidirán de manera negativa sobre la capacidad de carga del medio ambiente debido a la forma de

utilización dispersa, aislada y de baja potencia, por un lado y la utilización de residuos orgánicos por otra (Fernández, 2007).

La utilización de energías renovables puede ser “rentable” si se compara en igualdad de condiciones con las energías convencionales y, si se les reconoce todo el beneficio ambiental que conlleva utilizar, en nuestro caso, la energía solar y de biogás en el esquema de la “vivienda autoenergética”. Esta situación puede permitir el diseño de incentivos que apuntalen a su utilización masiva. Para esto se debe evaluar detalladamente el rol y desempeño de las energías renovables, en todas sus dimensiones (política, social, económica y ambiental), identificando claramente sus limitantes y beneficios, y con todos estos elementos

Bajo esos conceptos, se propone un escenario de uso intensivo de la energía de familias campesinas del área rural en base al uso de biodigestores para disminuir el uso de la leña en la cocción de alimentos, a partir de una participación activa de la tecnología optimizando sobre todo el uso de biogás como fuente alternativa de energía.

## IV.2 RESULTADOS EN ÁREA RURAL (NIVEL FAMILIAR)

### V.2.1 Elección y funcionamiento del biodigestor

La presente sección de la Tesis es un documento resultado de una investigación llevada a cabo en el período de noviembre 2006 a abril de 2009, utilizando biodigestores diseñados en base al modelo Taiwán (tipo Plug Off), o biodigestor de PVC de bajo costo.

El digestor de plástico de flujo continuo se utiliza en Bolivia en instalaciones tamaño familiar desde el año 2001, para manejo de residuos orgánicos. Con el fin de validar los parámetros de diseño sugeridos por investigaciones internacionales se diseñó, adaptó e implementó un experimento que buscaba caracterizar este tipo de sistemas mediante la utilización de residuos orgánicos de ganado vacuno.

Se conoce que los materiales con diferentes niveles de C/N difieren notablemente en la producción de biogás y en su tiempo de degradación, por ejemplo, la relación de C/N en residual porcino es de 9 a 3; en vacunos de 10 a 20; en gallinas de 5 a 8; para humanos es de 8 y para residuos vegetales es de 35. La relación óptima se considera en un rango de 30/1 hasta 10/1, una relación menor de 8/1 inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio (Werner, 1989). Por lo tanto se hace necesario el estudio inicial de la mezcla idónea con la que se va a alimentar el reactor.

Otro factor fundamental, es que además de una fuente de carbón orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. Sin embargo, la deficiencia de nutrientes no debe ser un problema con los alimentos concentrados, pues estos aseguran cantidades adecuadas de nutrientes. Esta última situación, es decir, el uso de alimentos concentrados en la cría de animales (principalmente ganado vacuno de leche), es una tendencia muy difundida en las zonas priorizadas por el proyecto, lo que permite estimar que la deficiencia de nutrientes no es un problema en la funcionalidad de los biodigestores instalados.

Se conoce que un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. En el caso del nitrógeno, es importante mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos.

En los sistemas estudiados no se han encontrado cantidades que varíen significativamente de los valores normales por lo que no se ha realizado un especial seguimiento. La explicación inicial de este hecho se centró en el análisis del tipo de carga utilizada en el biodigestor. Las características fisiológicas de la digestión de residuos orgánicos de animales, así como los hábitos y tipo de alimentación que reciben, generan excretas con una composición más compleja de elementos en comparación a otras excretas (como ser la de vacunos con mayor uso en las áreas priorizadas por el proyecto en Bolivia). Este hecho repercute en las etapas de la fermentación metanogénica, donde se presume que los compuestos generados en la etapa de la acidogénesis superan el rango ideal requerido para alcanzar el equilibrio dinámico y armónico de los cuatro grupos tróficos de bacterias más importantes para la biodigestión. Una alta producción de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), es un elemento que confirma la dominancia de la acidogénesis sobre las otras etapas mencionadas.

Para lograr mayor confiabilidad sobre esta deducción, se instaló un dispositivo de retención de  $H_2S$  que precede a los dispositivos de combustión. El diseño de este consiste en un contenedor cilíndrico de 50 cm de largo, fabricado a partir de una sección de tubería de PVC de 3 pulgadas, selladas en ambos extremos con tapas a cosca en las que se instalan las conexiones de entrada y salida del biogás. El interior del dispositivo se rellena con viruta de hierro, obligando a que el biogás entre en contacto con este material produce la fijación del azufre como sulfato de hierro.

La optimización de sistema se realizó en base a la determinación del volumen y producción de biogás bajo diferentes condiciones de temperatura ambiente y alturas de instalación del biodigestor, tomando la temperatura interna, de salida y entrada del biodigestor. El análisis experimental incluyó las siguientes variables: se hicieron mediciones de los siguientes parámetros de funcionamiento del digestor: pH, Temperatura, humedad y composición del biogás obtenido ( $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ).

Como se comentó en el Capítulo III, la materia prima utilizada para este estudio fue la mezcla de residuo orgánico de ganado vacuno en un 95% y un 5% humano. Conocidos todos los datos en base al muestreo de campo. Los datos son tabulados y se adjuntan a este análisis en base a un estudio realizado en base a los resultados de la correlación entre variables.

#### IV.2.2 Seguimiento de los parámetros medidos

##### IV.2.2.1 *Temperaturas de entrada, salida e interna*

La temperatura del sustrato es un parámetro muy sensible en la digestión anaeróbica, así, una reducción en 3 grados, de 36°C a 33°C, determinó una reducción de 60% en la producción de biogás (Rodríguez, 1996). Este mismo autor recomienda mantener el proceso a 36°C con la menor fluctuación posible.

Teniendo en cuenta que el rango mesofílico disminuye de hecho la actividad bacteriana y ralentiza los procesos químicos que se derivan de esta actividad se comprende que el proceso es muy sensible a pequeñas o moderadas alteraciones de la temperatura del medio ambiente anaeróbico y por consiguiente, se modifica totalmente con alteraciones elevadas.

En este estudio las condiciones climáticas son preponderantes en determinar la temperatura de equilibrio. A menudo, se desestima la inclusión del calor de reacción anaeróbico debido a se supone inferior al 15% del contenido energético del sustrato alimentado (Deublein y Steinheuser 2008), lo que representa una aportación poco significativa respecto a los flujos de calor en relación con el ambiente. Gallert y Winter (2005) reportan un valor del 4,6 % procedente del calor de reacción cuando el sustrato posee un alto en contenido de glucosa. Un control externo de la temperatura, para que la temperatura interna sea lo más adecuada posible, es de fundamental importancia para el correcto desarrollo del proceso.

Con objeto de una mejor exposición de los datos obtenidos, los gráficos que se muestran en los siguientes apartados corresponden a las medias obtenidas en periodos de 60 días durante los tres años de experimentación. Las variaciones, respecto a la media, de los datos son menores del 10%.

La experiencia realizada en la región altiplánica, además de las bajas temperaturas ambientales, los sistemas estuvieron sometidos al efecto de la altura.

Esto establece una sustancial diferencia respecto a otros estudios expuestos en bibliografía. En el presente estudio se refleja el resultado de sistemas instalados a una altura de 4000 msnm, con una temperatura promedio diaria de 10°C, temperaturas mínimas por debajo de los 0°C y una amplitud térmica considerable entre el día y la noche. Tecnologías en Desarrollo puede atribuirse este logro como una contribución para la investigación científica en biodigestores impulsada a nivel mundial, ya que no se tienen registros de experiencias exitosas similares en otras regiones.

Debido a que en esta zona las especies animales utilizadas para cría doméstica son la oveja y la llama (especies adaptadas a las condiciones ambientales rigurosas del altiplano), la carga del biodigestor fueron los excrementos de estos animales y los correspondientes humanos. Cada biodigestor tuvo un comportamiento distinto, aunque todos seguían el patrón medio que es el que se ha modelizado para su optimización.

Como se ha indicado en el Capítulo 1, la temperatura en la cual funciona el sistema de biodigestión anaerobia y donde las bacterias son mesófilas completando su ciclo biológico en el ámbito de 15 a 40°C con una temperatura óptima de 35°C (Hayes *et al.*, 1979). En nuestro caso se cumple con esta función en la mayoría de los datos tomados en campo, pero con una leve inclinación hacia un sistema termófilo, debido fundamentalmente a la época del año de la toma de datos (primavera – verano). Las temperaturas, en régimen estacionario para la entrada, salida y temperatura interna del sustrato se muestran en la Figura 40.



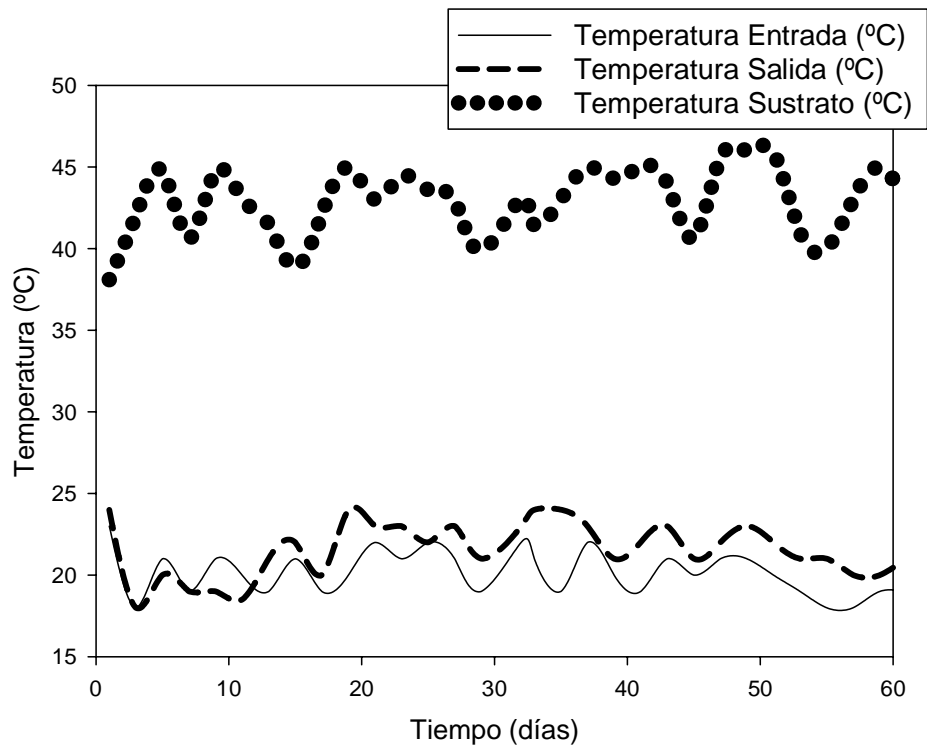


Figura 40. Temperaturas de entrada, salida y sustrato.

Fuente: Elaboración propia.

Los niveles de reacción química y biológica aumentan normalmente con el incremento de la temperatura. Para los digestores de biogás esto es cierto dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos (Schmid y Lipper, 1969). Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas; y esto es crítico para la vida de las células. Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen de la termoestabilidad de la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo. En la Figura 40, se puede observar que las temperaturas de entrada y de salida (temperatura ambiental) son similares aunque, como es previsible, la temperatura de salida es ligeramente superior a la de entrada. La temperatura del sustrato es significativamente superior a las anteriormente señaladas manteniendo una media de 42,7°C durante la fase estacionaria. Tras carga de residuos se alcanza un máximo, posteriormente la temperatura del sustrato baja rápidamente tras la próxima carga, produciéndose, de nuevo otro incremento de la temperatura. Este ciclo se repite durante toda la

vida útil del biorreactor. Los picos que se observan en la evolución de la temperatura (Figura 40), como se ha indicado, coinciden con los días de carga, indica que existe una respuesta positiva de la temperatura a las variaciones de carga de reactor ayudándole a mantener la producción de biogás en un proceso semi-continuo.

La evolución de las temperaturas tanto de entrada como de salida al y desde el biodigestor fueron tomadas de manera que exista una relación directa entre estas variables y la temperatura interna del sistema, siendo al final esta relación insignificantes para realizar un análisis más detenido de sus interacciones (estas temperaturas no generaron diferencias muy apreciables como para analizarlas). Las temperaturas de entrada y salida para cada uno de los materiales no presentaron diferencias significativas con variaciones mínimas entre las medias y comportamientos similares.

La actividad bacteriana tanto a la entrada como a la salida se supone en un estado de latencia, al no contar con las condiciones ambientales mínimas requeridas para la activación celular, con temperaturas bajas menores a 10°C, por lo que el crecimiento microbiano se realiza totalmente dentro de reactor. En invierno, donde las condiciones ambientales son muy difíciles también se ha notado una generación de biogás. Esto puede ser debido a que al suscitarse una disminución significativa en las capacidades de degradación y síntesis orgánica, es muy probable que las poblaciones bacterianas logren generar el material necesario para garantizar su mantenimiento o subsistencia sin la posibilidad de alcanzar la situación adecuada que permita la multiplicación vegetativa y por tanto lograr un equilibrio para la producción de biogás.

Si se analiza la temperatura interna en comparación con la concentración del metano generado (Fig. 41), se observa que la producción de biogás es mayor para los digestores con temperatura interna superior a 42°C. Esto puede ser debido a que este valor está muy cerca del recomendado para el rango mesofílico (Duque *et al.*, 2006). Para los digestores con temperatura interna entre 40°C y 50°C la composición de metano en el biogás tiene un valor promedio de 35%, con valores máximos de hasta 80%.

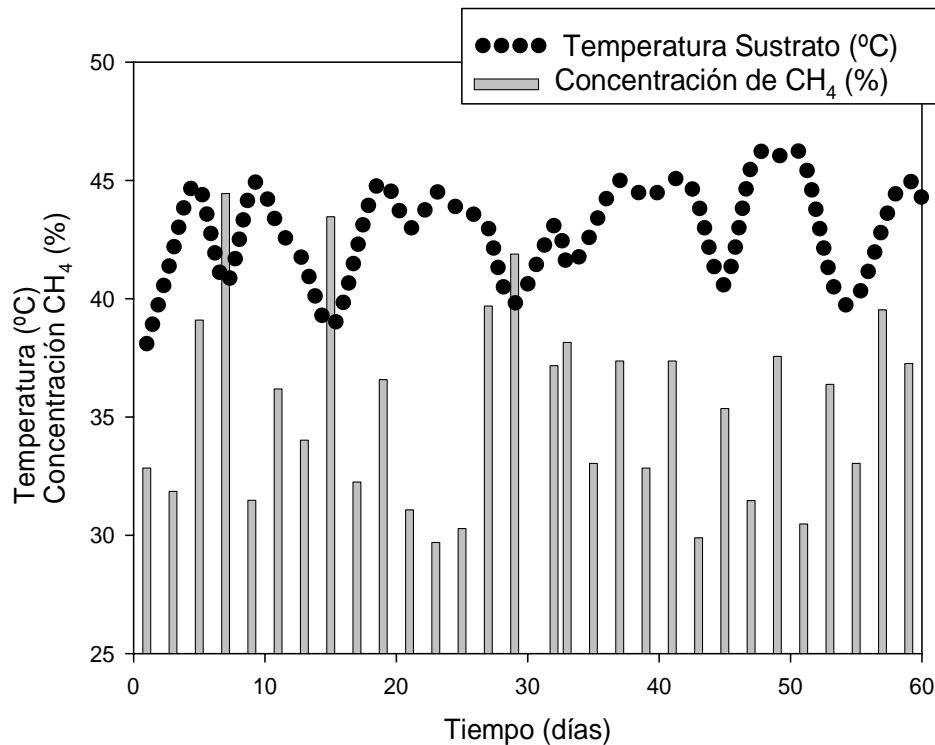


Figura 41. Producción de metano y la temperatura interna del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

No se tienen identificados elementos y/o factores científicos que permitan establecer la relación existente entre este tipo de excretas, la actividad bacteriana y la influencia de la temperatura. Entre las experiencias realizadas se han encontrado relaciones polinómicas entre la temperatura del sistema y la concentración de metano obtenido (Figura 42). En este sentido, se comprueba que la mayor cantidad de metano emitido se genera en condiciones mesófilas y que, en estas condiciones, se puede considerar constante a lo largo del tiempo. Este hecho coincide con los datos expuestos por (Rodríguez, 1996) en los que también las mayores producciones de metano se comprueban en condiciones similares a las consideradas idóneas en este estudio. Es preferible por tanto, la digestión mesofílica, con temperatura controlada.

Sin embargo, tomando en cuenta que los cuatro grupos tróficos de bacterias más importantes para la biodigestión están presentes en las excretas y forman parte de la flora microbiana de todas las especies animales aprovechadas por el hombre, es un hecho que la relación simbiótica entre estas bacterias y su huésped tiene raíces en los procesos adaptativos de este último con su medio ambiente. En

este contexto, es posible que estas bacterias hayan desarrollado mecanismos que les permitió alcanzar mayor eficiencia en el desempeño de sus roles naturales en el ámbito de la relación simbiótica con su huésped.

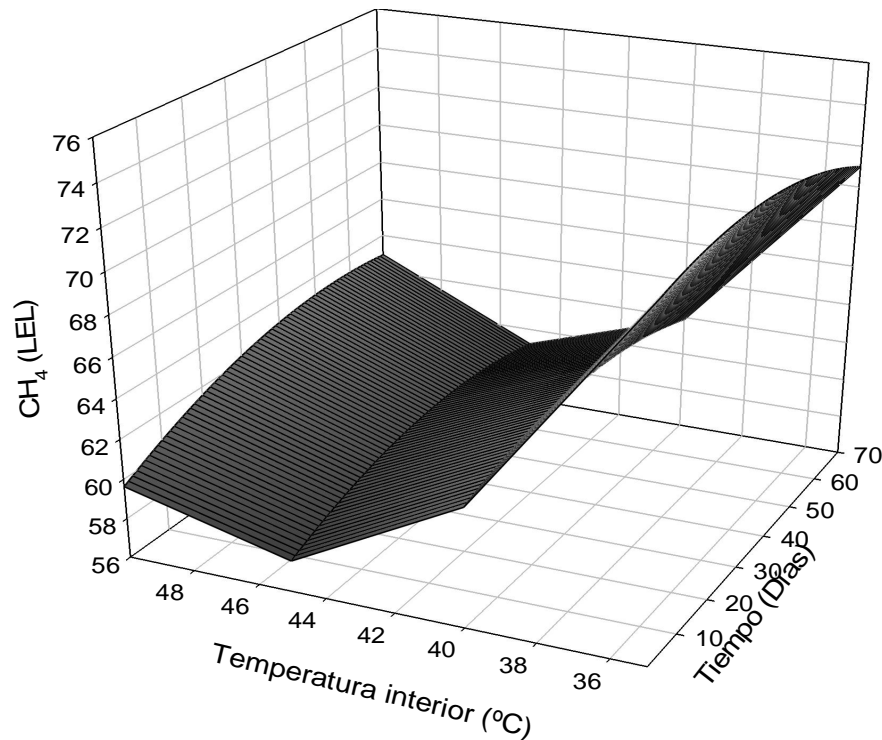


Figura 42. Relación entre la temperatura y la cantidad de metano emitido durante el tiempo seleccionado.

Fuente: Elaboración propia.

La influencia que tiene el comportamiento de la temperatura en los biodigestores provocó modificaciones en el tipo de materiales utilizados para la instalación del dispositivo principal, con el fin de minimizar el efecto de estos cambios en el ambiente interior del biodigestor al incrementarse la tasa de retención térmica del biodigestor y reducirse la tasa de intercambio térmico entre este y el ambiente externo (se refiere a la transferencia de calor desde el biodigestor hacia el medio externo debido a la disminución de la temperatura exterior en determinadas horas del día o la noche).

Comparativamente, con las reseñas bibliográficas encontradas, se observó que debido a que el rango de temperatura de la digestión en los sistemas de Bolivia es del tipo mesofílico (de 20 a 45°C) se entiende que el nivel de producción de biogás

en es bajo en comparación al rango de temperatura del tipo termofílico. En este sentido si se compara con otros sistemas mesófilos, Alvarez, (2006) reporta una producción de 0.02-0.04 m<sup>3</sup> biogás m<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup> como resultado de la digestión de estiércol de vacuno a 11°C en laboratorio.

En una revisión del programa chino de biogás, Daxiong *et al.* (1990) reportan una producción media de biogás de 0,05-0,1 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup> durante el invierno (6-10 °C). En efecto, la disminución en la cantidad de biogás producida durante los meses fríos es considerable: puede pasar de 1,7 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> durante el verano (26 °C) a 0,1 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> durante el invierno (12 °C) (Kalia y Singh 1996). En condiciones climáticas como las de la Sierra Andina en Bolivia, la temperatura media anual difícilmente supera los 10 °C (Senamhi, 2010). En consecuencia, puede estimarse que un digestor familiar no aislado debería ser de un volumen tal que resultaría inviable económicamente.

#### IV.2.2.2 Seguimiento del pH

El pH es una variable fundamental en los sistemas anaerobios, cuyo comportamiento dinámico influye en multitud de los procesos que ocurren en un reactor anaerobio, tanto biológicos como físico-químicos (An, 1996). El pH alcanza un óptimo en un pH en torno a la neutralidad (Clark y Speece, 1989), por lo que la mezcla de residuos iniciales ha de ser también tal que sea lo más próximo posible a este valor. Por otro lado, la acumulación de ácidos grasos (presentes de manera significativa en los residuos de origen) puede provocar la inhibición del proceso enzimático de hidrólisis (Angelidaki *et al.* 1993), lo que resulta en una menor eliminación de materia orgánica. En general, se considera que el pH del medio afecta a la velocidad máxima de crecimiento de los microorganismos, siguiendo una función de Michaelis normalizada (Angelidaki *et al.*, 1993; Kalyuzhnyi, 1997) o similar (Siegrist *et al.*, 1993; Vavilin *et al.*, 1995). En base a esto se analizaron los datos tomados dentro la investigación resultado en una variabilidad no significativa ( $p < 0,05$ ) con respecto al pH en el sistema, fundamentalmente porque el sistema ya estaba en equilibrio y no presenta mucha variación en el proceso.

En estas experiencias (Figura 43), el pH se mantuvo dentro de los rangos deseables para un proceso de biodigestión adecuado, ya que el valor de pH

mínimo fue de 6,7 y el máximo fue a 7,0 en el proceso de la biodigestión. Se puede preveer una generación de gas de alta calidad y estable. Según Raven y Gregersen (2004), en el caso de la digestión anaerobia toma importancia el balance de los electrones equivalentes que entran al proceso de degradación de la materia orgánica. Todos estos electrones se conservan en el metano por lo que a través de la formación de metano los electrones equivalentes se eliminarán del proceso y el residuo se estabilizará.

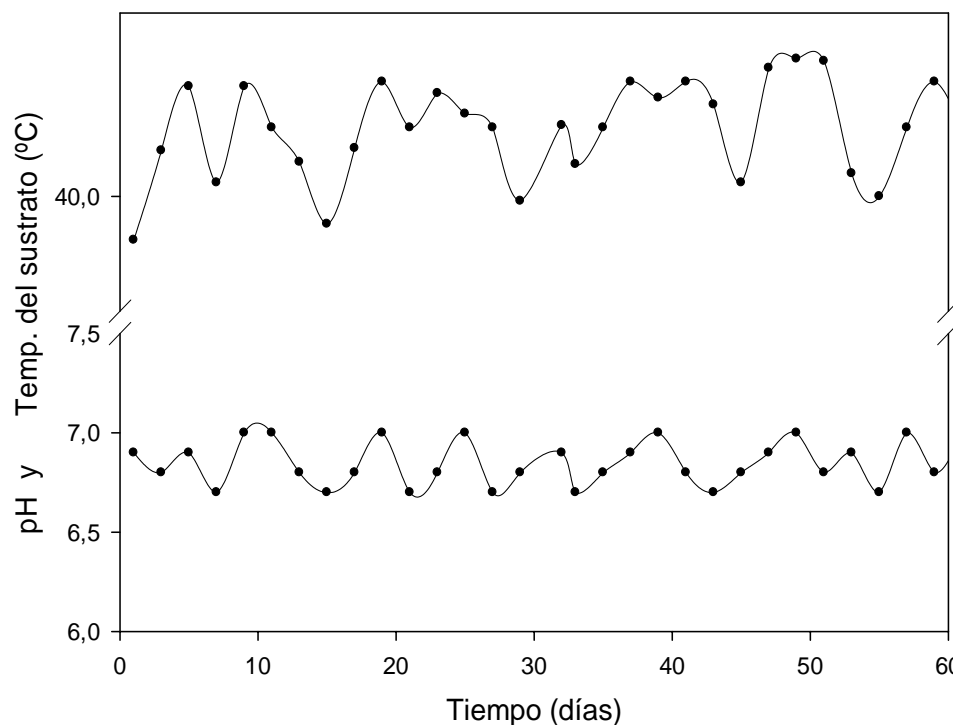


Figura 43. Evolución del pH y temperatura del sustrato en el reactor.

Fuente: Elaboración propia.

Esta pequeña variación indica un correcto proceso debido a que aunque los ácidos grasos volátiles (AGV), tienden a disminuir el pH del sustrato (Marchaim, 1992), si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV como lo hacen las bacterias acetogénicas, éstos se acumulan y disminuyen el pH en el digestor. Sin embargo, el equilibrio  $\text{CO}_2$ -bicarbonato opone resistencia al cambio de pH.

Los pH iniciales varían entre 6,8 y 7,4. Al introducirse los residuos en el biorreactor sufren una ligera acidificación, atribuida a la formación de ácidos orgánicos, que

se mantiene durante todo el proceso de digestión no superando los 7,1 en el reactor. Como se observa en la figura, las ligeras variaciones de pH coinciden con las de temperatura debido a las cargas de material en el reactor. Como se observa, el pH en los biodigestores instalados varía de 6 a 7, enmarcándose en el rango óptimo mencionado anteriormente. Dentro de este rango, la funcionalidad de los sistemas alcanza niveles aceptables de eficiencia que se refleja en la producción de biogás por al menos cinco horas al día -en sistemas con una cadencia de uso intenso- y tiempos mayores en sistemas con cadencias moderadas.

Cabe anotar que el pH de la mezcla de entrada al digestor fue constante durante toda la prueba con un valor de 6,7. Durante los primeros días del funcionamiento del biodigestor (datos no mostrados), este tiene un comportamiento variable, sin embargo el patrón presentado es: una etapa ácida (pH=6), seguida de una etapa básica (pH=8), para luego estabilizarse en un valor neutro (pH=7). Este fenómeno es normal y esperado, ya que la mezcla introducida al digestor es un poco ácida y en la primera etapa de la descomposición del estiércol se forman compuestos también ácidos (acidogénesis), produciendo un equilibrio microbiano que permite la estabilización del proceso (Ly et al., 2004).

Es necesario decir que los tres procesos ocurren siempre simultáneamente, sin embargo al inicio es más evidente la influencia de cada uno de ellos. En nuestro caso como el sistema se encuentra en equilibrio los resultados si bien denotan muy poca variabilidad, existe un promedio de 6,84 un valor que demuestra que el sistema ha alcanzado un estado estable de producción de biogás.

No se apreciaron, en general, diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los valores medios de pH de las muestras en los distintos reactores ensayados. En ninguno de estos reactores se ha encontrado aumento neto del pH por la presencia de altas concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  en los momentos iniciales del proceso como ha sido descrito por otros autores (Rodríguez, 1996).

La relación entre el pH y la concentración de metano generado se observa en la Figura 44. En este caso, la alteración del pH hacia valores que denotan la acidez del medio, se considera el factor determinante para la generación del biogás.

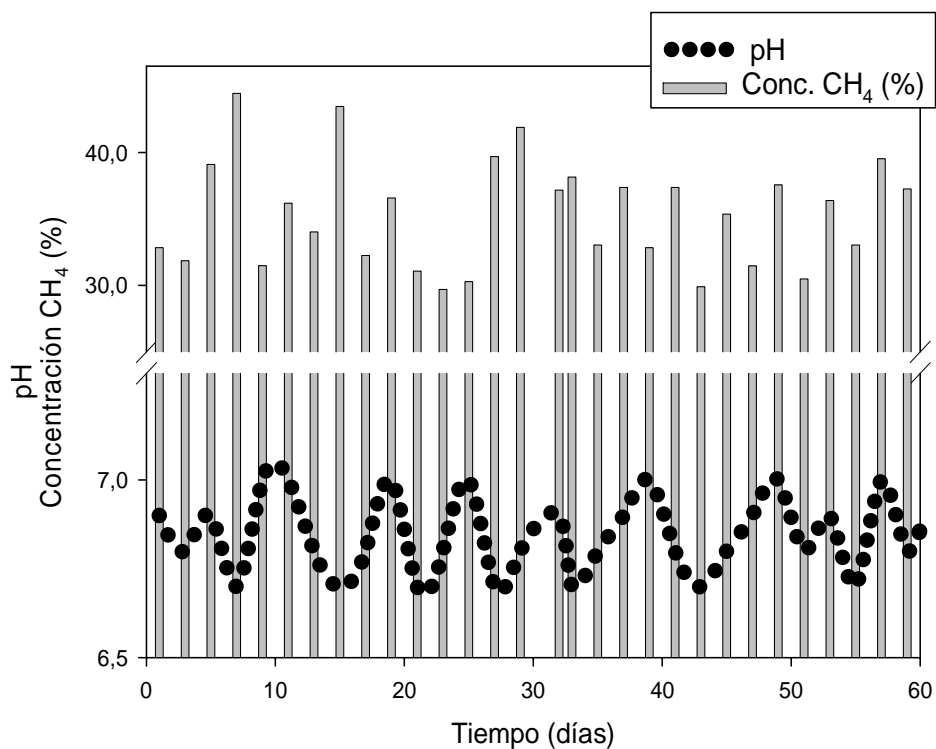


Figura 44. Producción de metano y el pH del sistema.

Fuente: Elaboración propia

#### IV.2.2.3 Humedad del sustrato

Tal y como se observa en la Figura 45, la humedad del sustrato no es constante, comprobándose variaciones en la entrada de hasta un 15%. Está comprobado que existe una relación entre la humedad del sustrato y la cantidad de metano emitido. Al realizar un análisis, en las condiciones ensayadas, de la relación entre la humedad del sustrato con la producción de CH<sub>4</sub>, se puede observar que, en primer lugar existe una estrecha correlación entre la humedad del sustrato y la producción de CH<sub>4</sub>, pudiendo advertir que a ciertas humedades (entre las ensayadas) la cantidad de metano aumenta en el sistema de biodigestión.



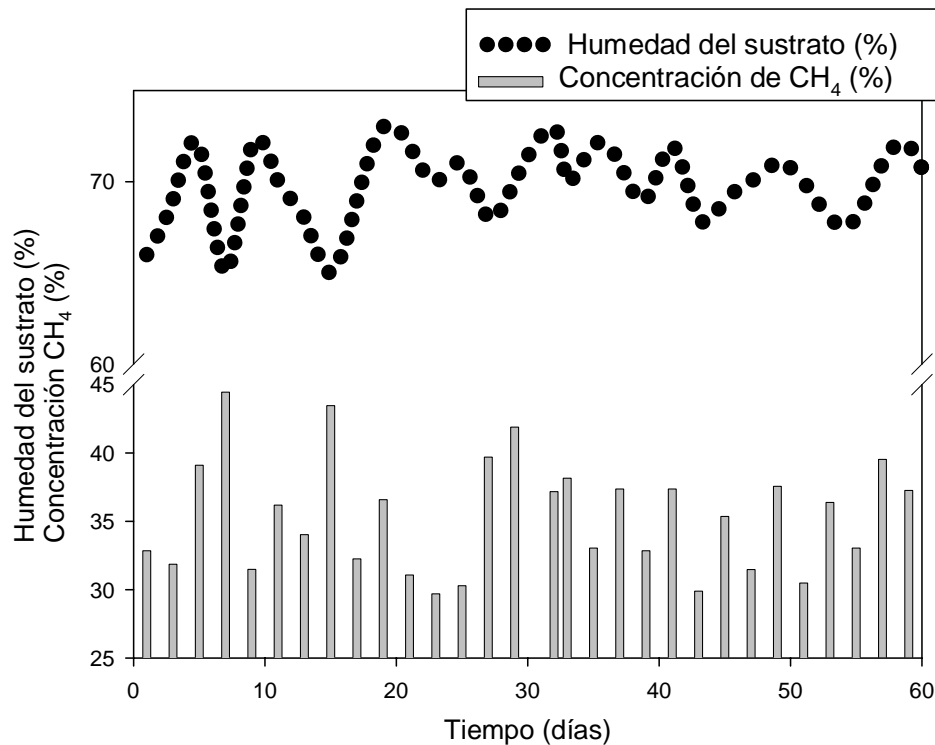


Figura 45. Producción de metano y la humedad interna del sistema.

Fuente: Elaboración propia

Los valores promedio de humedad pueden ser considerados en torno a 60,77% como valores óptimos para la producción de biogás de buena calidad (Rodríguez, 1996).

Por otra parte, en la Figura 44 se observan los resultados de la modelización entre el metano generado, el tiempo de equilibrio del reactor y la humedad de sustrato demostrándose que la cantidad de metano está significativamente relacionada con la de humedad del sustrato y a temperatura del propio sistema. Se observa una respuesta positiva para el incremento de temperatura hasta un nivel umbral de 35°C, siendo el umbral para el tema de humedad relativa entre 60 a 70%.

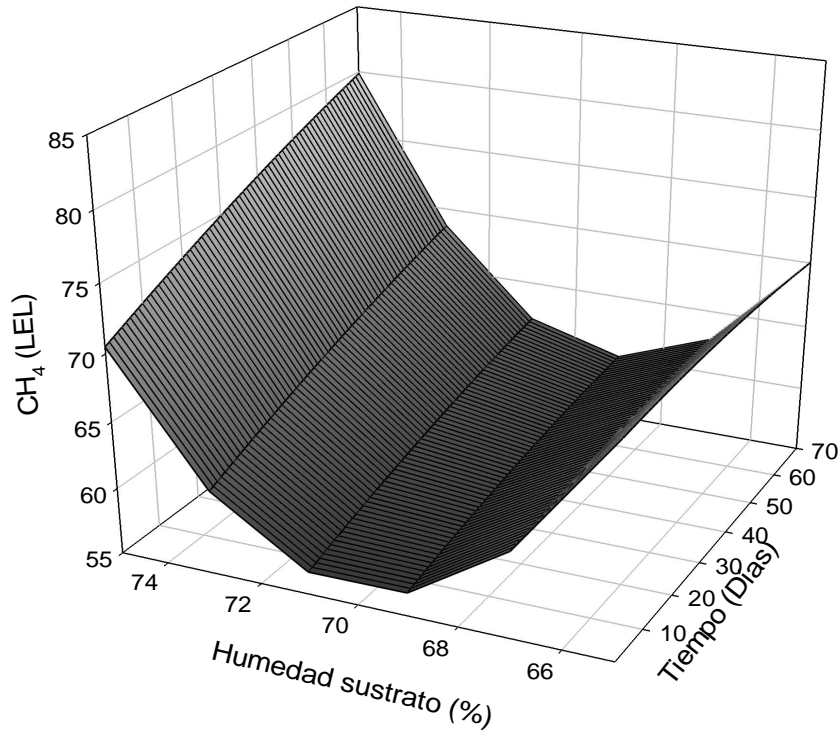


Figura 46. Correlación entre la producción de metano y la humedad interna del sistema, en el periodo de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, si se realiza una modelización de los valores obtenidos para cada temperatura y humedad del sustrato como variables independientes en función de las cantidades de metano obtenido (Figura 47), se puede observar las tendencias en dichas interacciones. Se puede decir que la sensibilidad de ambas variables son de dependencia cuadrática. También puede observarse que a humedades cercanas al 70% se producen mínimos de emisión de metano aumentando las emisiones tanto a humedades menores como mayores. Cuando se analiza el periodo de tiempo estudiado, se comprueba que a mayor humedad se produce biogás en mayor cantidad y de mejor calidad (metano), siendo, por lo tanto, positivo el mantener la humedad a niveles altos dentro el biodigestor fortaleciendo y mejorando las cualidades del biodigestor.

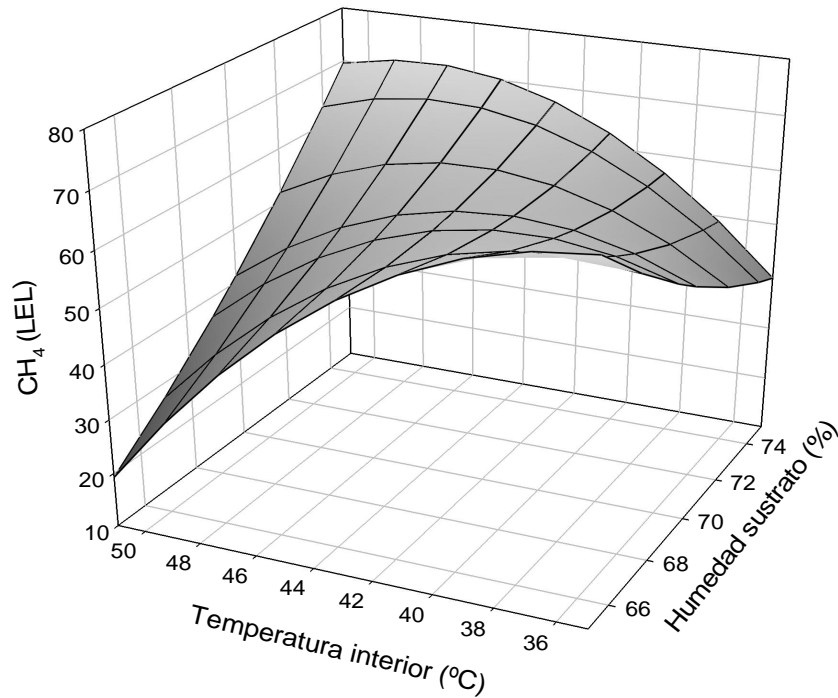


Figura 47. Correlación entre la producción de metano con la humedad interna del sistema y la temperatura interna del sistema en la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

También la modelización demuestra claramente el incremento y la producción de metano en cuanto al aumento de temperatura interior del biodigestor, manteniéndose la óptima entre 40°C, de manera que en sistemas en equilibrio la temperatura interior del sistema no debe exceder de 40°C, pues se tiende a disminuir la calidad y la cantidad de metano y de biogás en general. Al comparar con la humedad se puede evidenciar un funcionamiento adecuado en un rango de 68 a 72 %, como se evidencia en la gráfica.

Como se puede inferir en nuestro caso al tomar un biodigestor en pleno funcionamiento se estabiliza entre los días 22 y 25 en un valor de 60% de metano, valor parecido al presentado en varias referencias, según las cuales este estaría entre 65 y 80% (Mandujano *et al.*, 1999).

#### IV.2.2.4 Emisión de gases

La degradación del residuo genera una cantidad mayor o menor de biogás dependiendo de diferentes factores tales como, por ejemplo, su composición, almacenamiento, etc. Existen otros condicionantes que influyen no en la cantidad de biogás que se genera sino en la velocidad de generación. Así, si se reduce el contenido en humedad de la muestra, disminuye la velocidad de la degradación anaerobia, pero se mantiene durante más tiempo la metanogénesis, pues la cantidad final de biogás es la misma (Sasse 1989).

En el biogás existe normalmente alrededor de 50-70% de metano ( $\text{CH}_4$ ), 20-40% de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) < 1% de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) siendo el resto agua de saturación (Rodríguez, 1996). En la Figura 48, se muestra la evolución media de los principales gases emitidos durante el tiempo seleccionado. La composición media coincide, en gran manera, con los datos expuestos en bibliografía. Cada gas emitido se comentará por separado y se comprobará la existencia de correlaciones entre las variables medidas.

La cantidad de metano que será utilizado como referencia en este estudio fue propuesto por Nogueira y Zurn (2005), ya que varios autores informaron que la concentración de metano en el biogás generalmente varían entre el 55-60% (Costa, 2006; Coldebella *et al.*, 2006; Teixeira, 1985). Aunque otros autores como Silva *et al.* (2005) y Lucas Junior (1987) con digestores tipo India y chino, en ensayos seguidos durante un año encontraron un promedio de 57,7-34,2% de metano en el biogás obtenido.

##### IV.2.2.4.1 Emisión del $\text{O}_2$

La ausencia de oxígeno libre es esencial para las bacterias anaerobias que producen el metano y dióxido de carbono. Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a esta variable, exigiendo potenciales REDOX inferiores a -330 mV (Christensen *et al.*, 1996). Además, el oxígeno no es estrictamente un componente del biogás, ya que el biogás es fruto de una degradación anaerobia. Los residuos recién vertidos pueden retener aire, también es posible la difusión de aire desde la atmósfera hacia la capa más superficial de los residuos cuando la actividad metanogénica es baja. No obstante, la aportación de oxígeno debida a estos

factores debe ser mínima, tanto por la poca cantidad que se retiene, como por el hecho de su rápido consumo en las primeras fases de la degradación de los residuos y por su arrastre inmediato con la corriente de biogás cuando se conecta el sistema de aspiración.

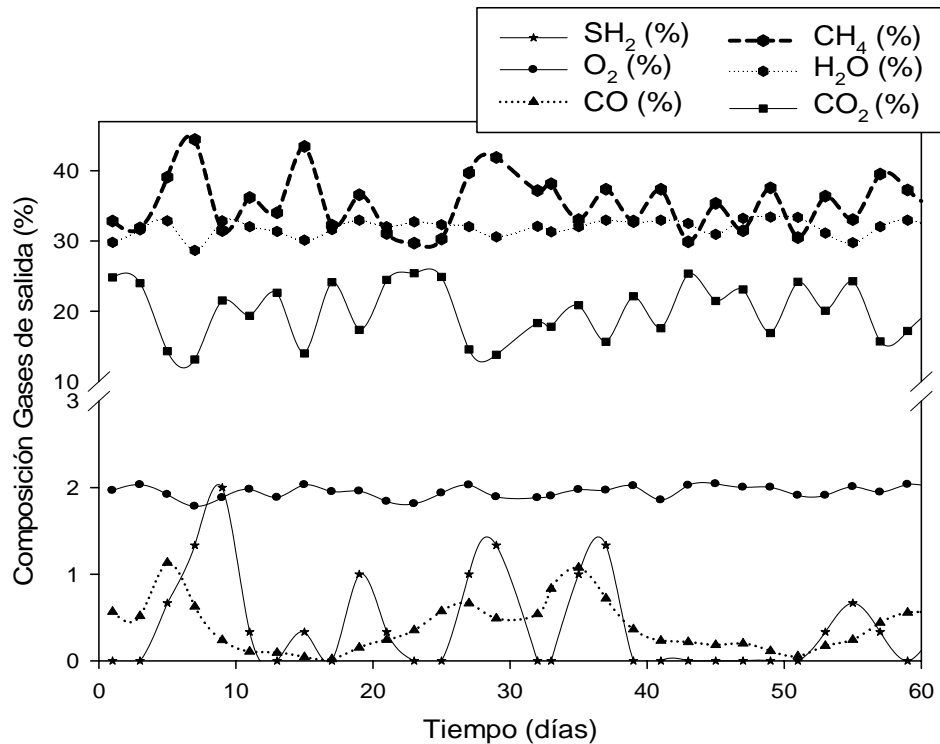


Figura 48. Evolución de la media de los principales gases emitidos por los biodigestores en el área rural.

Fuente: Elaboración propia.

Coincidiendo con los datos expuestos por Eden (1990) y Brown y Maunder (1994) existen algunos días en los que los niveles de oxígeno a la salida son mayores del 1% en volumen, esos altos niveles pueden ser debidos a que los sistemas de extracción provocan la entrada de aire y, por tanto, de oxígeno por fenómenos de convección.

#### IV.2.2.4.2 Emisión de CO

Su concentración en el biogás es también muy baja, de hecho no supera el 1% en volumen en ninguno de los biorreactores (Figura 48). Proviene de la actividad de las bacterias metanogénicas que consumen el CO<sub>2</sub> transformándolo en otros

compuestos como monóxido de carbono y otros de menor importancia como metanol, y metilaminas que no han sido medidas.

#### IV.2.2.4.3 Emisión de CO<sub>2</sub>

La evolución del dióxido de carbono también se muestra en la Figura 48. En dicha figura se observa una relación inversa (sin alta significación estadística) entre las cantidades de CO<sub>2</sub> y de metano. Los valores obtenidos de producción de metano y CO<sub>2</sub> son del mismo orden de magnitud que los obtenidos al digerir purín de cerdo (Hansen *et al.*, 1998). Las cantidades emitidas pueden ser consideradas como estables y en torno al 20% en volumen. Las variaciones respecto a la media pueden ser debido a las cargas, que introducen variaciones en el sistema y pueden desplazar el equilibrio líquido-gas.

#### IV.2.2.4.4 Emisión de SH<sub>2</sub>

Las emisiones de SH<sub>2</sub> pueden ser consideradas como no significativas, aún existiendo puntos en los que se alcanzan valores superiores al 0,1%. Estas variaciones pueden ser debidas a la variación en la composición del material de partida. Sin embargo la eliminación de H<sub>2</sub>S del biogás se consigue por diferentes métodos, que básicamente se basan en una oxidación a azufre elemental, sólido. Se puede eliminar usando gran variedad de absorbentes en medio líquido u oxidantes en fase sólida (Fernández *et al.*, 2008).

#### IV.2.2.4.5 Humedad del gas

La evolución de la humedad del gas dentro el sistema de biodigestión anaerobio, es decir la humedad en el ambiente interno del birreactor es importante para comprobar las condiciones de saturación del gas y que la humedad de los residuos de partida sea adecuada para una correcta digestión anaeróbica. Según las referencias bibliográficas encontradas, en la mayoría de las investigaciones sobre el tema se toma simplemente la humedad del material a ser degradado (estiércol y purines), en ese sentido se analizó esta variable como una parte del ambiente que rodea al biogás. En las referencias utilizadas, no se ha encontrado información sobre la humedad del gas como variable.

El biogás suele estar saturado completamente de vapor de agua en los procesos de biodegradación (Crescenti *et al.*, 1985; Tomasini, 1986; Eden, 1990; Uriarte *et al.*, 1992 y; Brown y Maunder, 1994). En el presente estudio (Figura 46), se comprueba que, según la presión de vapor para saturación a la temperatura del sustrato, el gas se puede considerar saturado en agua durante todo el proceso.

Debido al enfriamiento del biogás al ser extraído del biorreactor (la temperatura ambiente es normalmente inferior a la del gas) se producen condensaciones en las líneas que pueden obstruirlas por lo que, tras el análisis de los datos, necesario instalar purgas automáticas en los puntos más bajos de las conducciones. La condensación producida por el biogás contiene disueltos distintos compuestos, lo que hace necesario un tratamiento adecuado de la misma, previo a su vertido (Gandolla *et al.*, 1992).

#### IV.2.2.4.6 Emisión de CH<sub>4</sub>

La eficiencia real del biorreactor se determina generalmente expresando el volumen de biogás y concretamente del metano producido por unidad de peso de MS o SV. La fermentación de biogás requiere un cierto rango de concentración de MS que es muy amplio, usualmente desde 1% al 30%.

Como se observa en la Figura 48, las cantidades de metano sufren alteraciones en su concentración que superan, a veces el 20%. Esto fue debido al carácter heterogéneo tanto de la temperatura de ingreso del sustrato, la naturaleza y el tipo de dosificación del sustrato. Aún con las variaciones mencionadas, el metano producido en los biorreactores investigados supera ampliamente el 30% en volumen en todos los casos. Las dependencias de esta cantidad con los distintos parámetros independientes han sido discutidas en los anteriores apartados.

En general, con respecto a las variables ya expuestas, se observa que hay unas tendencias positivas y negativas no debiéndose superar los 40 grados ya que existe un proceso de lisis celular. De manera que existe una relación de dependencia positiva entre ambas variables, de manera que la producción de biogás se ve afectada directamente con esta variable. Los Sistemas de biodigestión anaerobia analizados de carga continua consiguen la lisis celular de la materia prima, lo tarda unas semanas en una digestión mesófila, entro el tiempo de retención hidráulica.

### IV.2.3 Optimización del sistema

El proyecto de investigación cuenta con recursos naturales típicos de la eco-región como fuente de energía, la leña, arbustos y demás fuentes energéticas de biomasa utilizadas en el proceso de cocción de alimentos. Problemas añadidos al estudio son: la heterogeneidad en las fuentes, el manejo de residuos provenientes de la explotación pecuaria, una diversa carga animal así como la variable contaminación hídrica y atmosférica.

En la región, se tiene estimado que en esta zona existen alrededor de 3000 pequeñas granjas productoras de leche, con 8 cabezas de ganado vacuno por familia. Contando con los problemas antes señalados, se hace necesaria una optimización del sistema de tal manera que sea eficiente en todas las condiciones posibles de tal manera que acuse levemente la variabilidad de residuos, humedades, temperaturas, etc. dentro del rango ensayado.

Para encontrar las condiciones idóneas de funcionamiento se ha de realizar un estudio estadístico de los datos de concentración de los gases emitidos de tal manera que la matriz de correlación de los datos se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Matriz de correlación de las variables consideradas como independientes (media de los reactores ensayados).

Variables	Día	Temp. Entrada (°C)	Temp. Salida (°C)	Temp. Interna (°C)	Humedad (%)	pH	CH <sub>4</sub> (%)	SH <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CO (%)
Día	1,00	-0,40	0,10	0,29	0,19	0,08	-0,05	-0,27	0,30	-0,12
Temp. Entrada (°C)	1,00	0,60	0,13	0,05	0,08	-0,13	0,03	-0,16	0,06	-0,40
Temp. salida (°C)	0,60	1,00	0,16	0,16	-0,17	-0,12	-0,18	-0,04	0,11	0,10
Temp. Interna (°C)	0,13	0,16	1,00	0,74	0,48	-0,30	-0,08	0,11	-0,04	0,29
Humedad (%)	0,05	0,16	0,74	1,00	0,38	-0,15	0,12	-0,15	0,20	0,19
pH	0,08	0,08	-0,17	0,48	0,38	1,00	-0,23	0,02	0,14	-0,06
CH <sub>4</sub> (LEL)	-0,05	-0,13	-0,12	-0,30	-0,15	-0,23	1,00	0,18	0,04	0,33
SH <sub>2</sub> (%)	-0,27	0,03	-0,18	-0,08	0,12	0,02	0,18	1,00	-0,22	0,21
O <sub>2</sub> (%)	0,30	-0,16	-0,04	0,11	-0,15	0,14	0,04	-0,22	1,00	-0,06
CO (%)	-0,12	0,06	0,11	-0,04	0,20	-0,06	0,33	0,21	-0,06	1,00

Fuente: Elaboración propia.



Este análisis estadístico en base a los datos de campo muestra las correlaciones que existen entre lo que es la temperatura interior del sistema, la humedad y el pH, aunque este último en muy poca variabilidad debido fundamentalmente a que es un sistema totalmente en equilibrio del cual se sacaron los datos de funcionamiento del sistema de biodigestión anaerobia.

En realidad la producción de CH<sub>4</sub> está relacionada, aunque muy levemente, con la temperatura interior fundamentalmente por la relación que existe entre la temperatura del sistema y la producción de biogás en general. También existe una cierta relación negativa entre el CH<sub>4</sub> y la Humedad. El pH también posee una leve influencia en la producción de metano. La leve relación entre las variables puede ser debida a que al ser un sistema estable la producción y en equilibrio la producción de metano es estable.

Otro aspecto, difícil de cuantificar, pero que juega un rol importante en la producción de metano es la agitación, acción que se produce a consecuencia del problema de la capa de espumas de los digestores. Una agitación eficaz intenta conseguir la rotura de dicha capa o evitar su formación. En consecuencia, se han ensayado muchos sistemas de mezclado fundamentalmente basados en el bombeo del fango, bombeo del gas a través del licor mezcla del digestor y agitación mecánica del contenido de la instalación.

Por otra parte, para asegurar la relación entre las variables independientes, en la Figura 49, se muestran las distancias euclídeas para demostrar las interdependencias entre los datos encontrados durante el estudio.

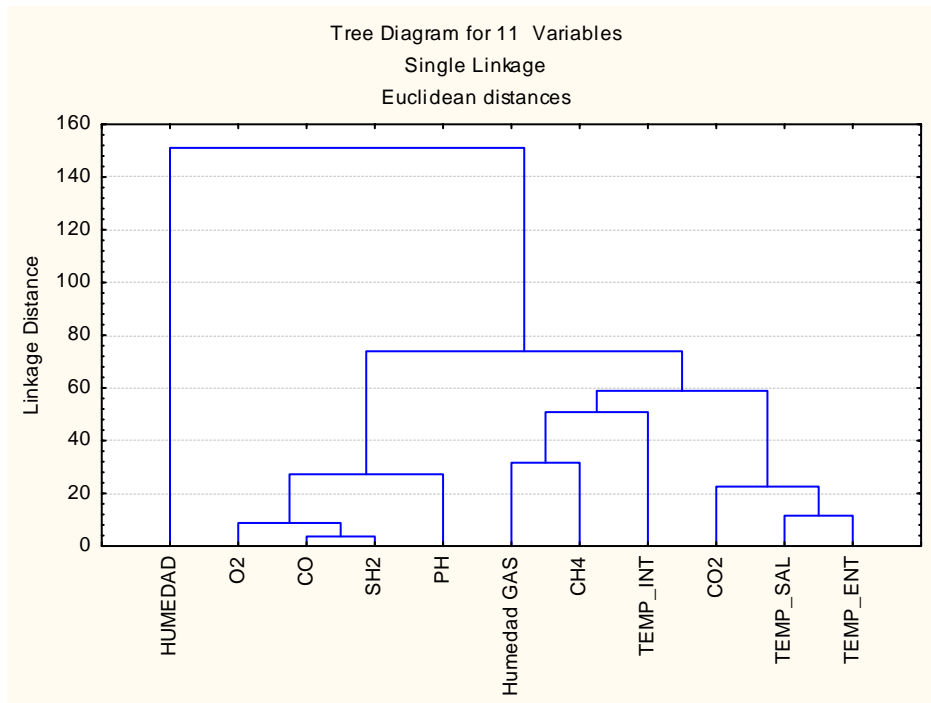


Figura 49. Distancias euclídeas encontradas en los datos analizados.

Fuente: Elaboración propia

Se observa claramente que las variables más importantes para explicar la evolución del sistema son la humedad del residuo seguida de la temperatura interna. La degradación de la materia orgánica se ve favorecida por la presencia de agua (Attal *et al.*, 1992; Suflita *et al.*, 1992). La producción de metano exige un contenido en humedad de los residuos depositados de al menos un 40-60% (Pacey y DeGier, 1986); Rao y Suflita, 1993; Brown y Maunder, 1994). Contenidos altos de humedad aceleran la velocidad de degradación de las basuras y, por tanto, la producción de biogás (Marticorena *et al.*, 1993; Pohland y Al-Yousfi, 1995). No obstante, los niveles altos de humedad en los residuos plantean problemas en el sistema de captación de biogás (Eden y Eden, 1992). Las variables referentes al gas de salida se muestran como pocos importantes respecto a las variables de entrada.

Por otra parte, haciendo un análisis de componentes principales (Tabla 20), se puede apreciar mediante un análisis de la variabilidad de los datos, se obtiene una varianza del 29,11 % para un primer componente y un 50% para el segundo componente, estos valores pueden ser analizados y comprendidos en base a dos

factores (componentes) que explican el 29% y el 50% de la variabilidad de los datos.

Tabla 20. Valores de los Componentes principales.

	% total		Cumul.	Cumul.
	Eigenval	Eigenval	Varianza	%
1	2,328831	29,11039	2,328831	29,11039
2	1,655211	20,69013	3,984042	49,80052

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 21, se puede observar los valores tras la extracción de los componentes de los factores en componentes principales.

Tabla 21. Extracción de los componentes de los factores en componentes principales.

Parámetro	Factor 1	Factor 2	Múltiple R-Media
Día	0,205442	0,377496	0,224330
Temp, Interna (°C)	0,799484	0,828159	0,673749
Humedad res, (%)	0,553672	0,820127	0,662887
pH	0,448319	0,466761	0,270502
CH4 (%)	0,227152	0,288848	0,229305
SH2 (%)	0,036630	0,503675	0,173059
O2 (%)	0,036637	0,314800	0,246748
CO2 (%)	0,021495	0,384175	0,224352

Fuente: Elaboración Propia

Al realizar un análisis de estos valores se puede observar que en el factor 1, la variable con más peso es la temperatura interior y la que más influencia ejerce sobre la evolución de las demás, siendo este factor muy importante debido al aumento que provoca en la actividad microbiana del sistema. Por lo que el correcto aislamiento o adecuación térmica, mantener la temperatura interna de los sistemas de biodigestión anaerobia de flujo continuo, es la variable más importante para la correcta proliferación microbiana. Estos datos están en concordancia con los encontrados por Metcalf y Eddy (1996) en biodigestores industriales.

La fermentación es un proceso de producción de energía menos eficiente que la respiración; como consecuencia de ello, los organismos heterótrofos

estrictamente fermentativos se caracterizan por tasas de crecimiento y de producción celular menores que las de los organismos heterótrofos respiratorios donde la temperatura interna juega un rol preponderante, a la hora de la multiplicación microbiana. Cuando analizamos el factor 2 las variables que tienen más peso son la temperatura interior y la humedad (que a su vez son los que más  $r^2$  tienen). Por lo que se demuestra que una correcta humedad inicial de los residuos es básica para un correcto proceso. El pH no parece que pese demasiado (aunque pesa incluso más que el día de evolución), en procesos estabilizados debe funcionar de esta manera para que este se encuentre en equilibrio y produzca la suficiente energía para los usos que se le darán (coccción de alimentos, iluminación, calefacción, y otros).

Por lo tanto, el sistema de biodigestión anaerobia de flujo semicontinuo o Taiwán (Flexible de PVC), propuesto y trabajando en las condiciones consideradas como ideales (Tabla 21) pude generar  $6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  de producción de Biogás.

Los resultados del efecto de la temperatura en la producción de biogás demuestran la gran influencia de la temperatura, una reducción de 3 grados Celsius reducen la producción de biogás en 59.61% y 61,8% en el rendimiento de producción de metano. En este sentido Nilson (2003) demostraron que las poblaciones de microorganismos aeróbicos son altamente influenciados por el medio ambiente y la temperatura.

## IV.3 RESULTADOS A NIVEL INDUSTRIAL (MATADERO)

### IV.3.1 Elección de los biodigestores

La metodología para la elección de los biodigestores que se usó está basada en la adaptación al análisis de Sondeo Rural Rápido (SRR), conjuntamente a la metodología de Levantamiento de Información Secundaria (modelos usados en la investigación para verificar cuales son las condiciones antes de implementar biodigestores en diferentes regiones; Schönhuth, 1994), que fueron las bases para la implementación de los sistemas de biodigestión en el matadero, tomando en cuenta, a los propietarios, el municipio y la población circundante, de manera que dieran criterios y referencias para poder implementar el sistema de biodigestores al interior del matadero.

Dentro de los aspectos más relevantes de la investigación preliminar se menciona las características que se tomó en cuenta para la realización de esta, como los antecedentes de la carga animal en el matadero, características de la zona de proyecto, estudios previos de la zona y otros (Yapu, *et al.*, 2006).

En ese sentido los resultados obtenidos dentro esta adaptación de tecnología de la investigación preliminar son la

1. Caracterización de la zona y del matadero visitas in-situ y recopilación de información.
2. Estudios previos de inicio de proyecto (Análisis de muestras, Análisis de sustratos, investigación sobre aspectos climáticos).
3. Investigación in situ del terreno características de suelo, topografía, y definición de lugar de emplazamiento, con identificación del lugar de emplazamiento de los biodigestores, lugar en el cual actualmente se encuentran los biodigestores instalados (Figura 50), identificación de tipo de suelo, Verificación de la topografía y el posible movimiento de tierras y finalmente implementación final de las obras civiles. Para esto se analizó in situ las características de la zona del proyecto de investigación y las similitudes con los proyectos realizados a nivel familiar y se emplazó las obras civiles del matadero para los tres tipos de sistemas Figura 51.



Figura 50. Identificación del lugar de emplazamiento.

Fuente: Elaboración propia

El diseño permitió dar como recomendación para los tres sistemas de biodigestión expuestos en el Capítulo III: Biodigestores 1, 2, 3.



Figura 51. Emplazamiento de obras civiles.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, tal y como se observó en la actividad anterior es indispensable cuidar la temperatura exterior por lo que se añadió un invernadero para proteger los biodigestores (Figura 52), y aumentar la temperatura de entrada mediante una infraestructura que brindara las mismas condiciones climáticas a los tres sistemas de biodigestión anaerobia. Existe en el sector del emplazamiento del biodigestor pilotes que permitirán la construcción y soporte de los pilares de invernaderos que

cubrirán a los tres sistemas, cuya función es la de brindar un clima idóneo para la actividad microbiana de fermentación anaerobia, en los reactores.



Figura 52. Emplazamiento del Invernadero.

Fuente: Elaboración propia

Las cantidades de materia orgánica cargada interdiariamente a cada digestor se muestra en la Tabla 22, donde se puede apreciar cada uno de las materias primas que fueron tratadas por medio de tratamientos de biodigestión, en condiciones de invierno.

Tabla 22. Características de la carga a los sistemas.

Materia orgánica	Biodigestor 1		Biodigestor 2		Biodigestor 3	
	%	Cantidad (kg)	%	Cantidad (kg)	%	Cantidad (kg)
Sangre	29	95	37	125	23	77
Rumen	48	159	63	208	38	128
Estiércol	24	79	0	0	38	128
Sub Total		333		333		333
Agua		500 L		500 L		500 L
Total volumen		833 L.		833 L		833 L

Fuente: Elaboración propia

La carga interdiaria se realizó los días martes, jueves y sábado de cada semana, momento en que el personal del matadero no tenía mucha actividad dentro del matadero y que podían colaborar en las tareas de carga del material (rumen, sangre y estiércol). El tiempo de retención de los biodigestores fue de 60 días, como

periodo de activación y generación de inóculo. En base a las características de los residuos tratados en los biodigestores industriales, se evaluó (Tabla 23), que no existe riesgo de posibles sustancias que inhiban el proceso de biodigestión en su inicio.

Tabla 23. Resultado del Análisis de laboratorio y concentraciones inhibitoras.

INHIBIDORES	CONCENTRACION INHIBIDORA	Presencia en muestra
SO <sub>4</sub>	5.000 ppm	NO
NaCl	40.000 ppm	NO
Cu	100 mg L <sup>-1</sup>	NO
Cr	200 mg L <sup>-1</sup>	NO
Ni	200-500 mg L <sup>-1</sup>	NO
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg L <sup>-1</sup>	NO
Na	3.500-5.500 mg L <sup>-1</sup>	NO
K	2.500-4.500 mg L <sup>-1</sup>	NO
Ca	2.500-4.500 mg L <sup>-1</sup>	NO
Mg	1.000-1.500 mg L <sup>-1</sup>	NO

Fuente: Elaboración propia

El estudio se basa en el seguimiento durante los meses más fríos en pleno invierno (abril, mayo, junio, julio), en los que las condiciones son menos ideales para la biodigestión, y la optimización de este período. Durante las estaciones cálidas el sistema de biodigestión anaeróbico en las condiciones estudiadas en Bolivia, dan lugar a mayores producciones de metano con las óptimas condiciones encontradas.

#### IV.3.2 Seguimiento de los parámetros medidos

##### IV.3.2.1. Temperaturas

En la Figura 53, se pueden observar las temperaturas de invernadero, ambiental, del sustrato y del gas de salida para los biodigestores 1, 2 y 3 respectivamente. La temperatura es un parámetro muy sensible en la digestión anaeróbica, así, una reducción en 3 grados, de 36°C a 33°C, determino una reducción de 60% en la producción de biogás. Se recomienda mantener el proceso a 36°C con la menor fluctuación posible (Alvarez, 2008).

La temperatura del invernadero se situó entre 5-10°C más alta que la ambiental, aunque dependía en gran medida del viento y su dirección (datos no mostrados).



## Biodigestor 1

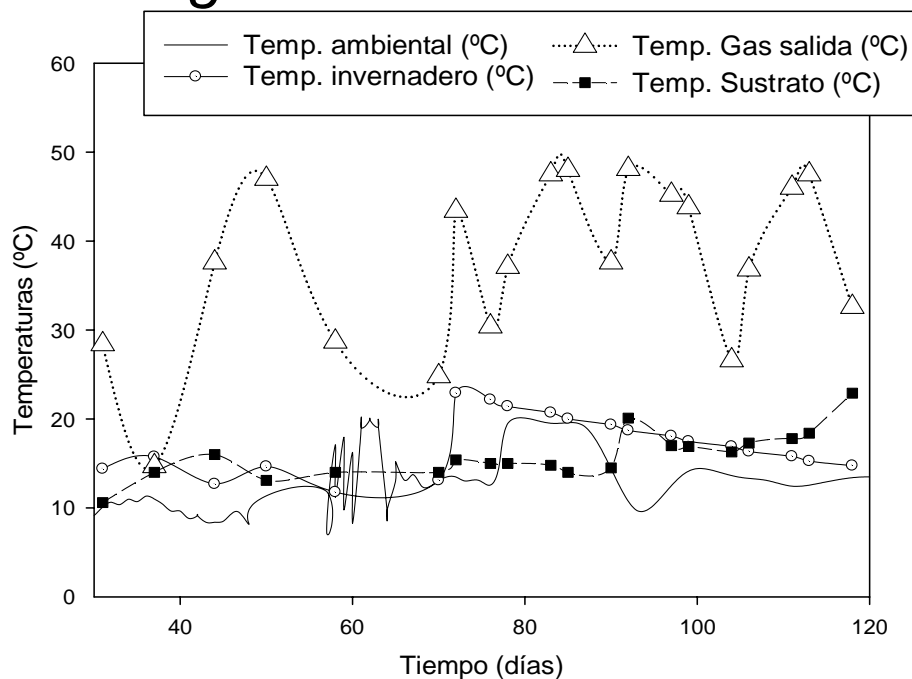


Figura 53. Evolución de las temperaturas obtenidas en el biodigestor 1.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 53, se observa que la temperatura del sustrato encontrada en el biodigestor 1 no superó los 25°C. Durante el estudio la temperatura del invernadero igualó e incluso superó en algunos casos la temperatura del sustrato. Esto puede ser debido al tipo de instalación en el suelo del biodigestor. Durante los meses más fríos, el suelo baja en gran medida la temperatura del sustrato y con ello el rendimiento del biodigestor. Se observan importantes variaciones que pueden ser debido a dos causas: la bajada de temperatura del suelo durante la noche y la adición de sustrato que realiza cuando aún no se ha incrementado suficientemente la temperatura del suelo provocando también importantes variaciones en la temperatura del biodigestor.

La temperatura ambiente tiene una apreciable influencia en la temperatura del sustrato y, por tanto, en la generación del biogás. Si la temperatura de los residuos está por debajo de los 10°C o por encima de los 60°C, la producción de biogás cae rápidamente. Los rangos óptimos de temperatura de los residuos son: 20 a 45°C

para las bacterias mesófilas y 45 a 75°C para las termófilas (Pacey y DeGier, 1986). Las temperaturas habituales que se han medido en el interior de los biodigestores industriales están entre 20 y 50°C (Stegmann y Spendlin, 1986; Suflita *et al.*, 1992; Rao y Suflita, 1993). En los casos estudiados estamos en el límite inferior de este rango.

La temperatura del gas, por otro lado se alcanzaron valores superiores a los 45°C durante gran parte del estudio. Los datos sugieren un alto gradiente térmico en el reactor estando la parte superior del sustrato a mucha más alta temperatura que la parte inferior. Con gradientes mayores de 40°C entre la temperatura medida del sustrato y la correspondiente del gas. Así, a 20°C, temperatura aproximada del biogás en el punto muestreado en La Zoreda, la humedad absoluta es de 15,0 g kg<sup>-1</sup>. Enfriando el gas hasta 5°C, estos valores descienden a 5,5 g kg<sup>-1</sup>. El condensado producido es de 9,5 g kg<sup>-1</sup>. Este valor, ligeramente superior al obtenido, corresponde al máximo teórico, con las aproximaciones que se han realizado.

La evolución de las temperaturas del biodigestor 2 y 3 se observan en las Figuras 54 y 55 respectivamente. Como se puede observar la evolución de las temperaturas en estos biodigestores fue similar a la del biodigestor 1. En este caso, fundamentalmente para el reactor 3, la temperatura del gas, alcanzaron valores superiores a los 45°C llegando incluso a los 50°C para el reactor 3. Se hace más significativo el alto gradiente térmico en el reactor estando la parte superior del sustrato a mucha más alta temperatura que la parte inferior.

Se conoce que un factor importante, para la determinación del volumen de los digestores, es la temperatura interna que puede alcanzar durante la fase estacionaria del proceso. La digestión termofílica permite una permanencia menor en los tanques, pero, debido a su excepcional sensibilidad a los cambios de temperatura, exige un gran control y no es aconsejable. Es preferible por tanto, la digestión mesofílica, con temperatura controlada (Montes, 2008).

## Biodigestor 2

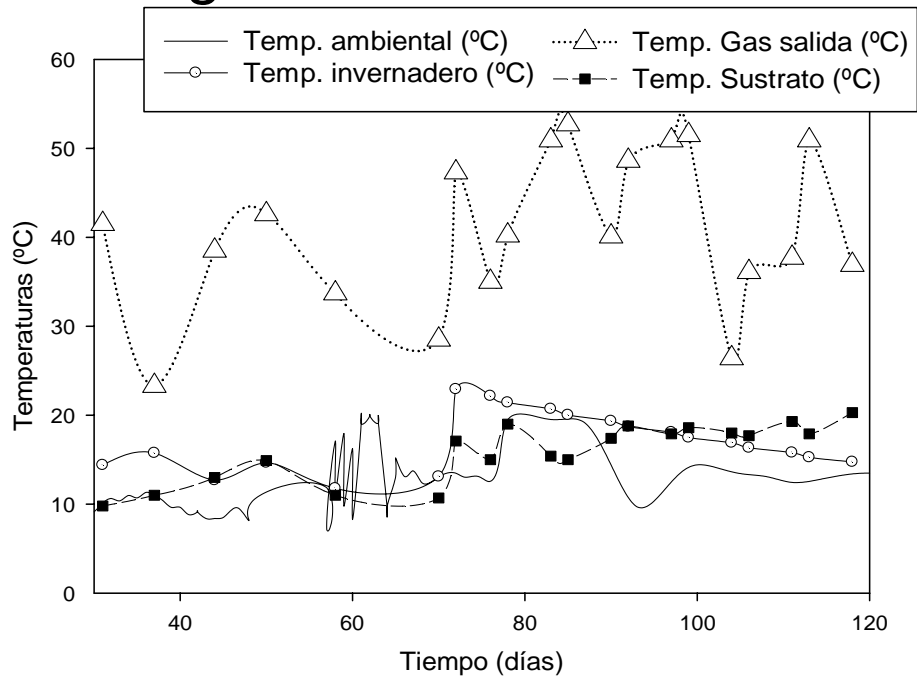


Figura 54. Evolución de las temperaturas obtenidas en el biodigestor 2.

Fuente: Elaboración propia

## Biodigestor 3

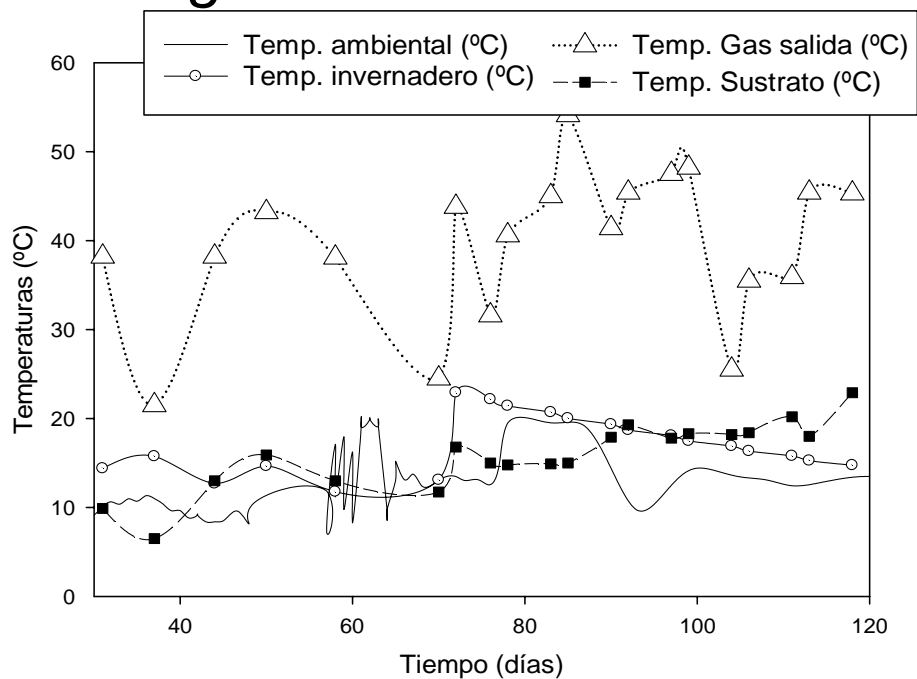


Figura 55. Evolución de las temperaturas obtenidas en el biodigestor 2.

Fuente: Elaboración propia

Tras el análisis de la evolución de las temperaturas en los biodigestores se observa claramente que en biodigestores sin sistema de calefacción hay una alta dependencia de la temperatura ambiente que, en la zona y estación invernal estudiados, es inferior al rango de temperaturas óptimas. A menores temperaturas se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta. A temperaturas inferiores a 5°C se puede decir que las bacterias cesan su actividad metabólica y ya no producen biogás (Álvarez, 2008).

La evolución comparada de las temperaturas del sustrato (a) y del gas de salida (b) en los tres biodigestores se puede observar en la Figura 56.

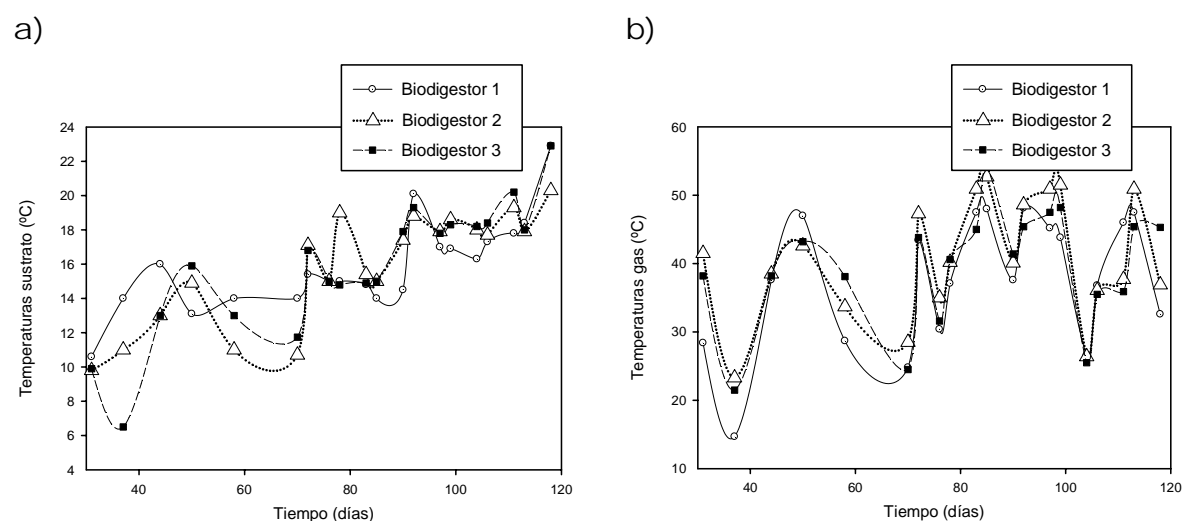


Figura 56. Evolución de la temperatura del sustrato en los tres biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

En dichas figuras se puede observar que, si bien al inicio del proceso, hasta los dos meses, existían diferencias significativas entre las temperaturas de los sustratos en los biodigestores, con el paso del tiempo estas diferencias se minimizan, no existiendo diferencias significativas a partir de los 70 días. En el caso de las temperaturas del gas no existen diferencias significativas durante todo el tiempo de estudio.

La velocidad del proceso de digestión y el grado de conversión de biomasa en biogás (producción específica de metano) dependen directamente de la

temperatura, puesto que la tasa de crecimiento de las bacterias incrementa con la misma. Así, en el óptimo mesofílico entre 32° y 38 °C (Kashyap, 2003) el proceso es más rápido que en el rango psicrófilico (< 25°C). Al mismo tiempo, la producción de metano depende de otros parámetros, incluyendo: tipo y cantidad de inóculo, composición y características del sustrato, retención y adaptación de la biomasa bacteriana, y periodicidad de la variación de la temperatura.

#### IV.3.2.2. Seguimiento del pH

La evolución del pH en los biodigestores se muestra en la Figura 57. En dicha gráfica se observa inicialmente que los residuos ingresan con un pH ligeramente básico, siendo el más básico el del bioreactor 2. También el residuo inicial tiene gran importancia debido a que en residuos ganaderos, que presentan altas alcalinidades, la bajada de pH será poco importante incluso aunque se produzcan importantes acumulaciones de ácidos (Lay *et al.*, 1997).

El pH tiene un importante efecto sobre las tasas de crecimiento de los microorganismos anaerobios, hidrolíticos, acidogénicos, acetogénicos y metanogénicos (Clark y Speece, 1989), que alcanzan un óptimo de equilibrio para un pH en torno a la neutralidad, presentando problemas graves si el pH baja por debajo de 6 o sube por encima de 8,3 (Lay *et al.*, 1997). En los casos estudiados, el pH estuvo constante en torno a la 6,7.

En general, la evolución de los valores de pH no presenta diferencias significativas entre los biodigestores estudiados y sitúan los datos de pH dentro del intervalo considerado como adecuado para la generación de biogás. Por otro lado, el pH es un importante modulador del sistema puesto que influye en varios equilibrios químicos, pudiendo desplazarlos hacia la formación de una determinada componente que tenga influencia en el proceso. Su papel fundamental en el equilibrio amonio-amoniaco, teniendo, por tanto, una gran importancia en el proceso general, por ser el amoniaco libre un importante inhibidor de la fase metanogénica (Zeeman *et al.*, 1985).

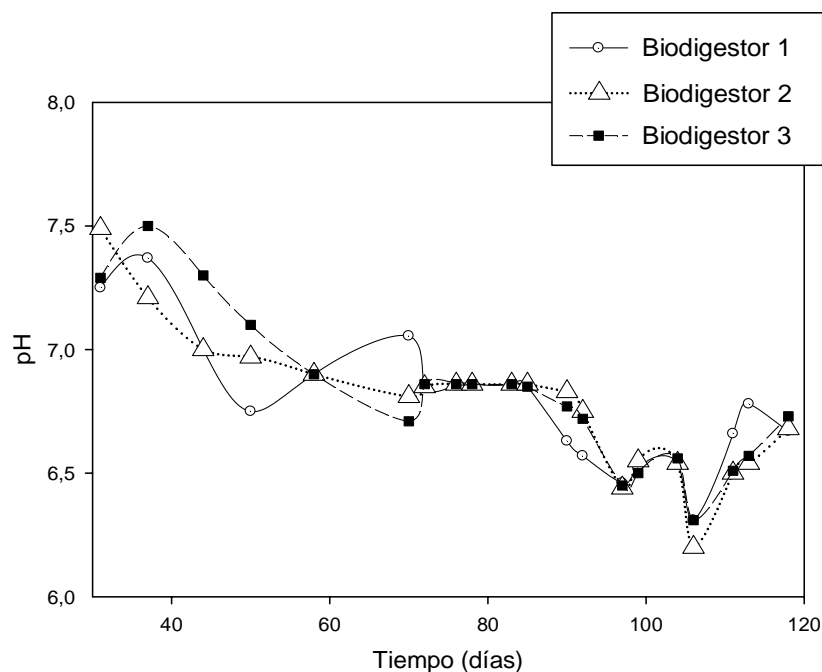


Figura 57. Evolución del pH en los tres biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

El pH es también una importante variable de diagnóstico de los sistemas anaerobios, pues muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Para los tres biodigestores se presenta un proceso de acidificación constante hasta el día 100 a partir del cual se observa una tendencia a la neutralidad que se consigue sobre el día 180. Esto puede ser debido a las sobrecargas orgánicas, o la presencia de un inhibidor de la etapa metanogénica, que pueden provocar desequilibrios entre la producción y el consumo de ácidos grasos volátiles, produciendo la acumulación de éstos y el consiguiente descenso del pH, produciéndose la acidificación del reactor.

La bajada del pH será más o menos acentuada en función de la capacidad tampón del medio. La bajada del pH, sin embargo, provoca una bajada en la concentración de amoníaco libre, y por tanto, la reactivación del proceso, con una tasa de producción de metano menor (Angelidaki y Ahring, 1993). En cualquier caso, el pH no se considera una buena variable de control por resultar demasiado lenta: una vez detectada una variación importante del pH, el fracaso del sistema es quizá irreversible (Iza, 1995).

Por ello se consideran otras variables como mejores indicadores del estado del proceso anaerobio, como la producción de biogás y su contenido en metano (Hill y Holmberg, 1988), el contenido de ácidos grasos volátiles o la relación entre ellos (Hill *et al.*, 1987; Ahring *et al.*, 1995), la presión parcial de hidrógeno, o indicadores basados en el número de bacterias o actividad bacteriana (Angelidaki *et al.*, 1997b). Como el pH debe mantenerse en torno a 7 para que la producción de metano sea la óptima y siendo beneficioso un nivel alto de la humedad, se hace recomendable la adición de sustancias ligeramente ácidas para optimizar estos efectos.

#### IV.3.2.3. Seguimiento de la evolución de los gases

La evolución de los principales gases durante el tiempo estudiado se presenta en las Figuras 58, 59 y 60 para los Biodigestores 1, 2 y 3 (B1, B2 y B3) respectivamente.

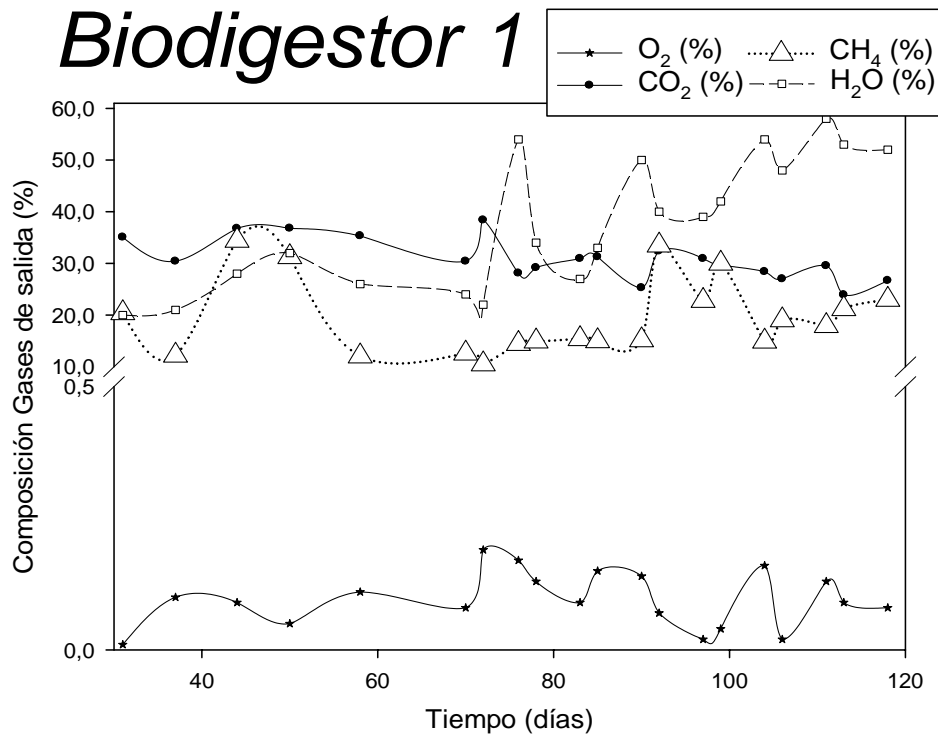


Figura 58. Evolución de los gases en el biodigestor 1.

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura anterior, se han conseguido concentraciones entre el 15-30% en CH<sub>4</sub> para mezclas de residuos ganaderos con varios tipos de residuos

de la industria de carne y mataderos, ricos en grasas, estos datos indican producciones de CH<sub>4</sub>, del orden de 47 m<sup>3</sup> T<sup>-1</sup> de residuo introducido. Sin embargo, estos residuos pueden presentar problemas de digestión, como deficiencia de nutrientes necesarios para el desarrollo de microorganismos anaerobios, acidez o excesivo contenido en sólidos que pueden provocar problemas de funcionamiento (Montes 2008).

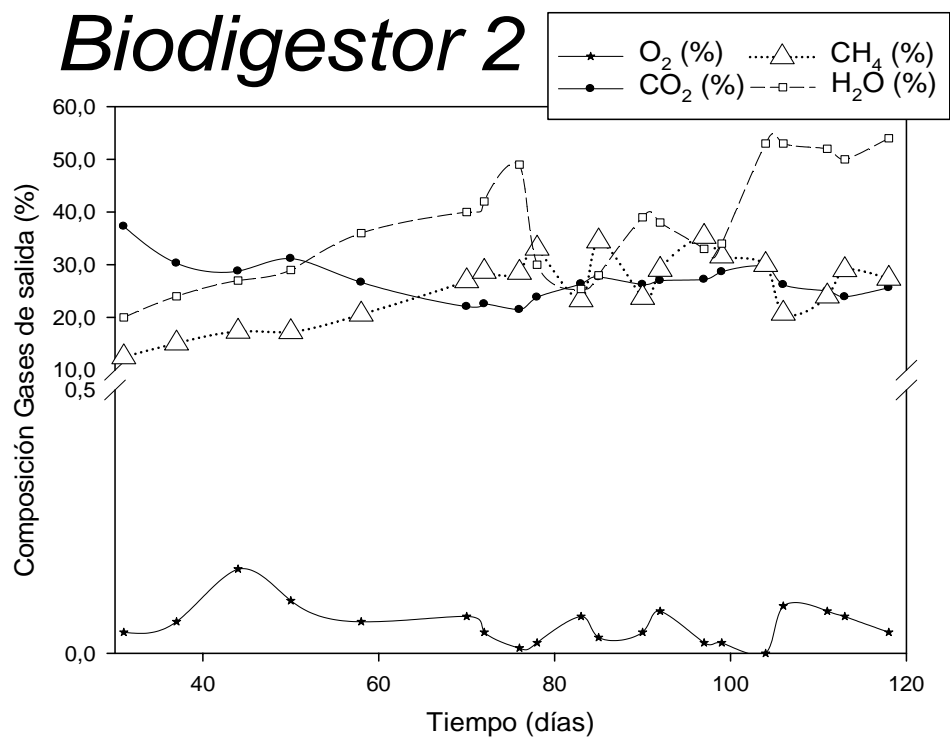


Figura 59. Evolución de los gases en el Biodigestor 2.

Fuente: Elaboración propia

Comparativamente, la evolución de los gases en los tres biodigestores fue similar con contenidos mínimos de oxígeno libre y concentraciones similares de dióxido de carbono, metano y humedad, salvo en el caso del B3, donde por las conexiones de las sondas de medición de variables introducidas al biodigestor se permitió la introducción de una gran cantidad de oxígeno como se puede evidenciar en la última gráfica, pero que después se pudo estabilizar y generar las condiciones óptimas para la generación de biogás en su interior.

Las variaciones entre los biodigestores para cada una de las variables estudiadas se comentan a continuación.



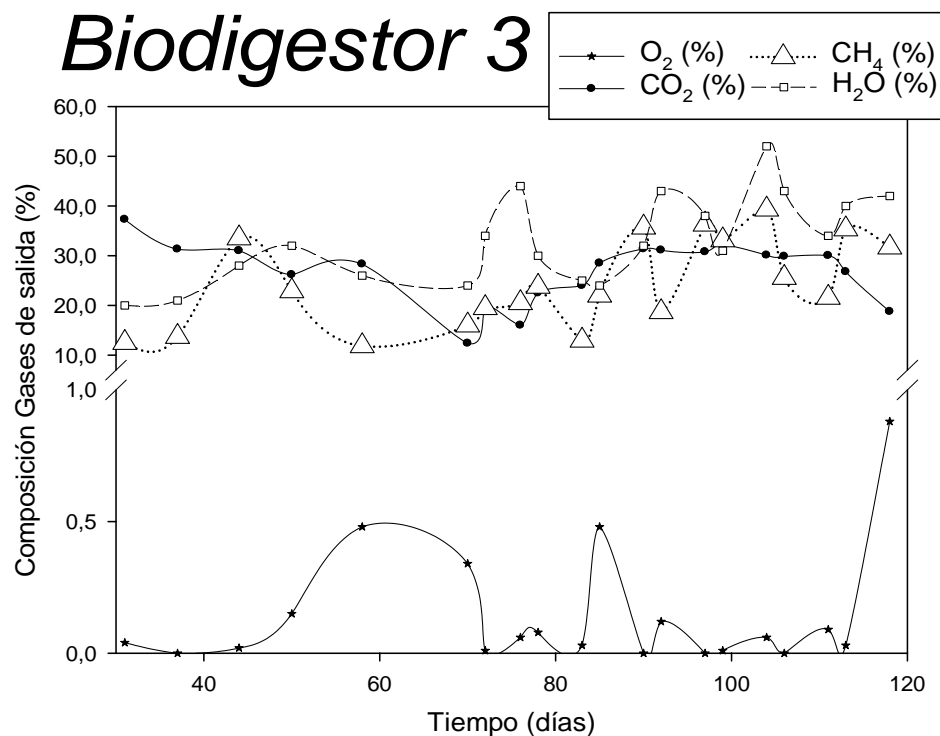


Figura 60. Evolución de los gases en el Biodigestor 3.

Fuente: Elaboración propia

#### IV.3.2.4. Seguimiento de la evolución de la humedad interna, oxígeno y dióxido de carbono de los biodigestores

Normalmente la humedad dentro el sistema de biodigestión anaerobio (Figura 61), es decir la humedad en el ambiente interno del birreactor, no se toma en cuenta al momento de analizar un sistema en equilibrio, pues en la mayoría de las investigaciones sobre el tema se toma simplemente la humedad del material a ser degradado (estiércol y purines), en ese sentido se analizó esta variable como una muestra del ambiente que rodea al biogás, al interior del sistema.

Las características naturales de generación del biogás hacen que este sea un gas naturalmente húmedo y que en las cañerías se almacene un elevado porcentaje de humedad, una excesiva humedad no siempre es conveniente ya que disminuye el potencial de emisión de gases, produce oxidación de materiales y además obstruye cañerías de distribución, por lo que es conveniente su eliminación.

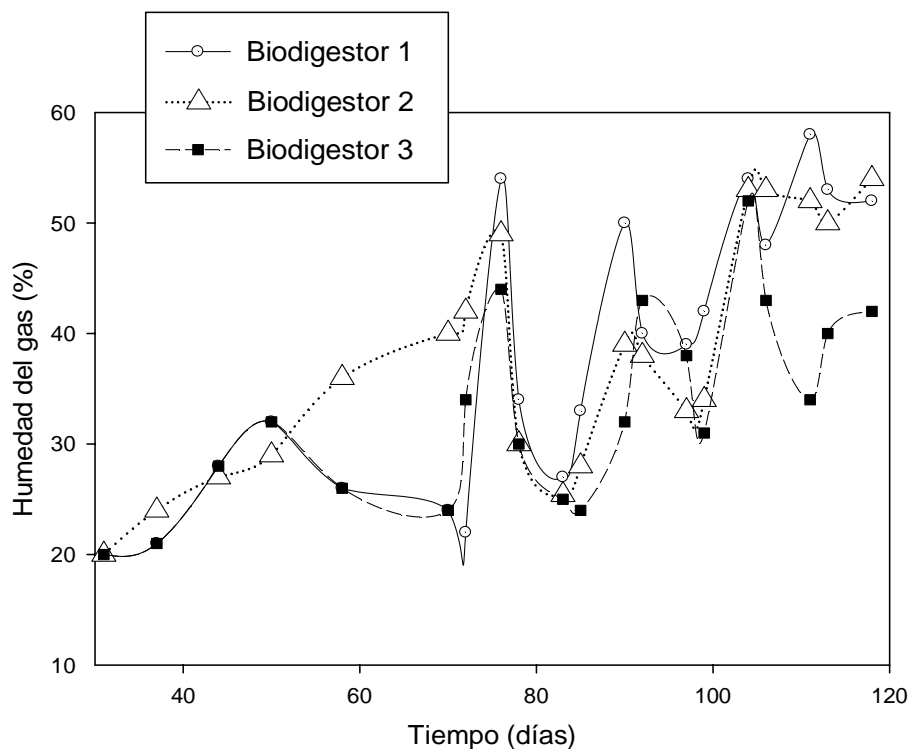


Figura 61. Evolución comparativa de la humedad del gas en los biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

Los tres biodigestores comienzan con una misma humedad en el gas de salida sufriendo ligeras variaciones durante el proceso de estabilización. Durante la evolución se observa un creciente aumento en la humedad de los tres biodigestores hasta su estabilización a los 100 días. La estabilización se situó en el 55% para B1 y B2 y en un 45% para el B3.

Al analizar la temperatura y humedad en el sistema se puede evidenciar que los valores promedio de humedad están en torno a 55,67% un valor que si bien no es el óptimo contribuye positivamente a para la producción de biogás.

La evolución del O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> fueron similares en los biodigestores ensayados con cantidades inferiores al 1% en oxígeno durante la mayor parte del proceso, excepto en el B3 por similares motivos a los expuestos en el apartado anterior. La concentración de CO<sub>2</sub> se puede considerar constante en torno al 25-30% para los biodigestores durante el tiempo estudiado. La comparación entre la producción de CO<sub>2</sub> y el metano producido se comentará en el Apartado V.3.6., de optimización del proceso.

#### IV.3.2.5. Seguimiento de la evolución del CH<sub>4</sub>

Uno de los parámetros que permite evaluar la eficiencia del proceso de fermentación de la materia orgánica es la productividad de metano o productividad metanoica (cantidad de metano generado en la unidad de tiempo respecto de la materia dispuesta en el reactor, Weiland 1995). La evolución del metano para los tres biodigestores se muestra en la Figura 62.

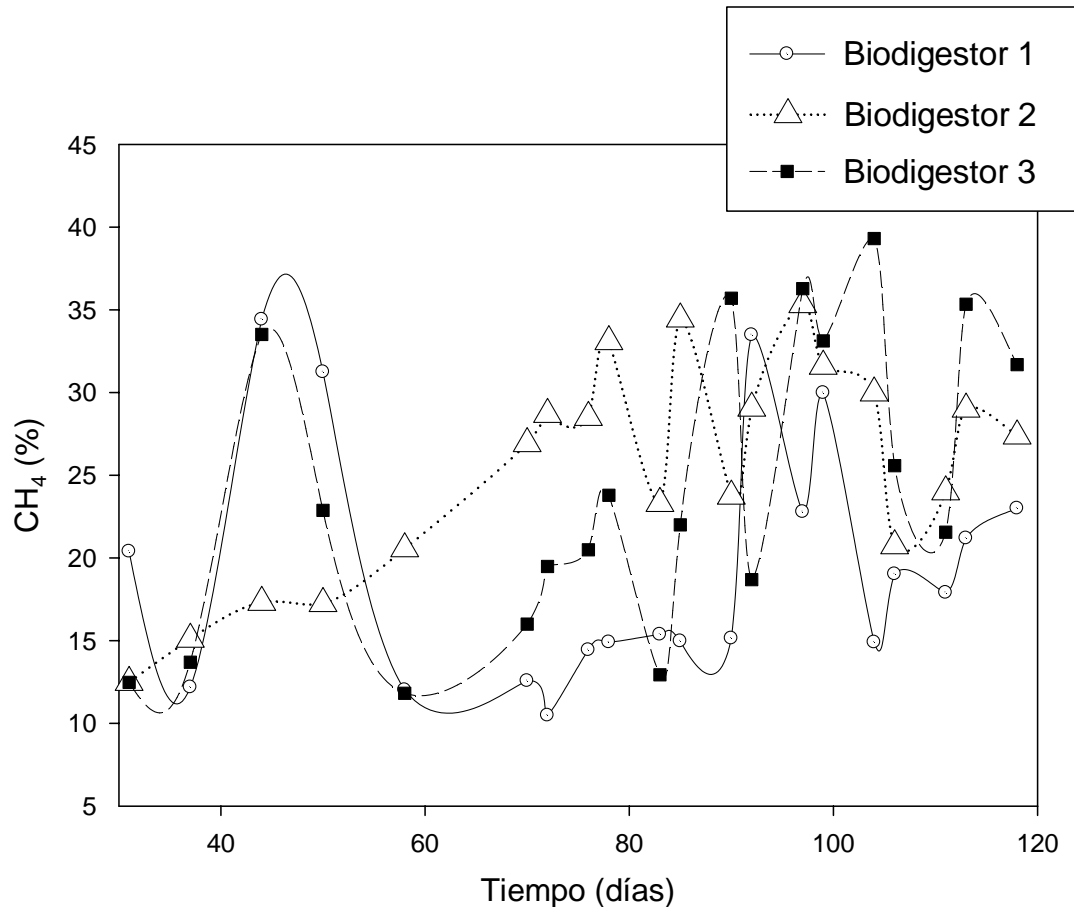


Figura 62. Evolución del metano para los tres biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

En dicha figura se observa diferencias en la evolución inicial de los tres biodigestores. Los biodigestores 1 y 3 ofrecen grandes variaciones al comienzo del proceso observándose una evolución más lenta para el B2. Las variaciones entre los reactores no fueron significativas a partir de los 90 días.

Las variaciones en la evolución pueden ser atribuibles a la adición de los residuos, con los cambios de pH y temperatura que ocasiona. Estas relaciones se comentarán en el Apartado V.3.6 de optimización del sistema

Por otra parte, los vertidos de la industria cárnica presentan un alto contenido en materia orgánica (DQO y DBO<sub>5</sub>), grasas, sólidos en suspensión y nutrientes (nitrógeno y fósforo) y con altas variaciones, por lo que se necesita una referencia para obtener la carga óptima en los biodigestores. La variable de referencia más utilizada son los sólidos volátiles presentes en los residuos (Burton, 2003). Su valor corresponde aproximadamente, y de forma general, al 77% del sólido total introducido por día, independientemente del reactor. Producción de biogás ( $\text{m}^3 \text{kg}_{\text{ST}}^{-1} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ ).

Como las cantidades introducidas interdiariamente no son constantes, la producción de biogás diaria depende de la cantidad de sólidos volátiles que haya en la carga interdiaria de estiércol, se realizó el análisis de las muestras y se obtuvo un valor que alcanza valores promedio para los 3 sistemas de 894,33 L de CH<sub>4</sub>  $\text{kg}_{\text{ST}}^{-1}$ . En base a los datos obtenidos de los residuos (rumen, sangre y estiércol) se obtuvo en conclusión que, si es posible usarlos en la proporción en la que son producidos, con un tiempo e retención hidráulico de más de 90 días; un promedio de producción específica de 2017 L  $\text{kg}_{\text{ST}}^{-1}$  y un contenido promedio de 50,4 % de generación de metano.

El análisis para cada uno de los biodigestores indica que B1 tiene una producción de metano de 1640 L  $\text{kg}_{\text{ST}}^{-1}$  lo cual supone un 41 % de metano en el biogás; para B2 un valor de 1760 L  $\text{kg}_{\text{ST}}^{-1}$  que supone un 44 % y el B3 obtuvo 2652 L  $\text{kg}_{\text{ST}}^{-1}$  con un 66,3 %. Estos datos evidencian que, con valores medios en temperatura, se pudo alcanzar niveles aceptables en la producción de biogás.

El análisis de la investigación se realiza en base a 3 periodos a) periodo de activación b) periodo de producción c) periodo total de generación.

a) En este periodo se analiza una carga inicial diaria de 25,72  $\text{kg d}^{-1}$ , una relación sólido/líquido de 2,78, un tiempo de retención de 58 días y un rendimiento esperado de 50% en la degradación y generación de metano.

La producción de metano obtenida fue: 25 L<sub>CH<sub>4</sub></sub>  $\text{d}^{-1}$  para B1, con un promedio de producción de metano de 16,96%, para B2 de 20,82 L<sub>CH<sub>4</sub></sub>  $\text{d}^{-1}$  con un promedio de

CH<sub>4</sub> de 14,12% y finalmente para B3 de 23,85 litros de metano por día, con un promedio de 16,18%.

b) Un segundo análisis se realizó en base al periodo de producción, se obtuvo en análisis en base a una carga diaria de 135 kg d<sup>-1</sup>, (la carga interdiaria fue de 333 kg, 3 veces por semana), con un tiempo de retención hidráulico de 52 días, una relación sólido/líquido (Biomasa/agua) de 1,5. Los resultados obtenidos en la producción de metano en una primera instancia al 50% de producción ideal en condiciones de altiplano se muestran en la Tabla 24. En los valores obtenidos en la fase de estabilización de los biodigestores se puede apreciar un descenso de lo estimado para B1b, en este reactor se obtuvo un caudal entre 197 L<sub>CH<sub>4</sub></sub> d<sup>-1</sup> - 1059 L<sub>biogás</sub> d<sup>-1</sup> con una media de 18,67% de CH<sub>4</sub> en el biogás; para el B2b entre 308 L<sub>CH<sub>4</sub></sub> d<sup>-1</sup> - 1048 L<sub>biogás</sub> d<sup>-1</sup>s con 29,45% de CH<sub>4</sub> y para B3b entre 290 L<sub>CH<sub>4</sub></sub> d<sup>-1</sup> - 1081 L<sub>biogás</sub> d<sup>-1</sup>. con un 26,85% de CH<sub>4</sub>.

Tabla 24. Producción de CH<sub>4</sub> al 50% de producción ideal con 135 kg d<sup>-1</sup>.

Valores obtenidos 50% de de CH <sub>4</sub>				
Produc- ción por c/sistema al 50%	Sistema	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> d <sup>-1</sup>	L <sub>biogás</sub> d <sup>-1</sup>	
	B1a	547,98	1095,96	
	B2a	539,58	1079,10	
	B3a	1121,00	2242,20	
Valores obtenidos % CH <sub>4</sub> obtenidos				
Produc- ción por c/sistema al %	Sistema	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> d <sup>-1</sup>	L <sub>biogás</sub> d <sup>-1</sup>	
	B1b	197,70	1058,81	
	B2b	308,42	1047,82	
	B3b	290,23	1080,74	

Fuente: Elaboración propia

c) Periodo total de generación que se realizó en base a los dos anteriores periodos, donde se obtuvo en análisis en base a una carga diaria de 160,72 kg d<sup>-1</sup> (carga inicial promedio de todo el proceso), con un tiempo de retención hidráulico de 110 días, una relación sólido/líquido (Biomasa/agua) de 1,91 y un rendimiento CH<sub>4</sub> de 50% teórico (promedio de producción de biogás en condiciones de altiplano).

Los resultados obtenidos en la producción de metano en esta tercera fase al 50% de producción ideal en condiciones de altiplano se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. Producción de de CH<sub>4</sub> al 50% de producción ideal con 161 kg d<sup>-1</sup>.

Valores obtenidos 50% de de CH <sub>4</sub>				
Producción por c/sistema al 50%	Sistema	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> d <sup>-1</sup>	L <sub>biogás</sub> d <sup>-1</sup>	
	B1a	501,80	1003,17	
	B2a	583,99	1167,98	
	B3a	1334,61	2669,21	
Valores obtenidos % CH <sub>4</sub> obtenidos				
Producción por c/sistema al %	Sistema	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> d <sup>-1</sup>	L <sub>biogás</sub> d <sup>-1</sup>	
	B1b	132,15	727,00	
	B2b	251,82	1004,43	
	B3b	226,54	952,31	

Fuente: Elaboración propia

De los valores obtenidos en la fase de producción de los biodigestores se puede apreciar un descenso en la producción estimada para B1b por el que, con un porcentaje de CH<sub>4</sub> de 18,18%, se obtuvo el valor de 132 L<sub>CH<sub>4</sub></sub> d<sup>-1</sup> y 727 L<sub>biogás</sub> d<sup>-1</sup>; para el segundo sistema B2b con un porcentaje de 25,07% se obtuvo 252 L<sub>CH<sub>4</sub></sub> d<sup>-1</sup> y 1004 L<sub>biogás</sub> d<sup>-1</sup>, finalmente para B3b se obtuvo un valor de 290 L<sub>CH<sub>4</sub></sub> d<sup>-1</sup> y 1081 L<sub>biogás</sub> d<sup>-1</sup>, para un % obtenido de CH<sub>4</sub> de 23,80.

Los valores obtenidos en la fase de laboratorio el análisis del LCA (UMSA), mostraron variables con una significativa relación entre la producción de metano y los sólidos totales introducidos en los residuos estudiados. Como se puede observar en la Tabla 26, en la que se muestra un resumen de los datos obtenidos, se comprueba la alta influencia de las condiciones de proceso en la generación de biogás. Como ejemplo resaltar el caudal emitido por B1a (685 mg L<sup>-1</sup>) y por B3a (7379 mg L<sup>-1</sup>) con similares residuos de entrada.

Tabla 26. Producción media de biogás en los diferentes períodos para los tres biodigestores

	Promedios de producción de biogás %		
	B1	B2	B3
Periodo de inoculación	16,96	14,12	16,18
Periodo de producción	18,67	29,45	26,85
Periodo total	18,18	25,07	23,80

Fuente: Elaboración propia

Analizando los valores promedio en toda la producción general del proyecto, de cada uno de los biodigestores se pudo evidenciar que para el B1 con un promedio de 18,18% de metano la producción de biogás es de 727 L kg<sub>ST</sub><sup>-1</sup>, para B3 con un promedio de 23,8% la producción de biogás fue de 952 L kg<sub>ST</sub><sup>-1</sup>, en el último caso B2 con un promedio de 25,1% la producción de biogás fue de 1004 L kg<sub>ST</sub><sup>-1</sup>, valores que definitivamente son muy bajos y atribuibles fundamentalmente a la época de instalación (invierno) que pese a contar con un sistema de incremento de temperatura como es el invernadero, no pudo incrementar adecuadamente la temperatura que mejore estos valores.

Los resultados mostraron que se presenta mayor producción de biogás a niveles de pH cercanos al punto neutro (pH= 6,7 en promedio para los tres sistemas). Bajo similares pH, en los digestores con temperatura interna mayor se generó la mayor cantidad de biogás: En B1 con temperatura media de 47°C se generó 41,24 %de metano; en B2 a 52,7°C se formó 44 % de metano y en B3 a 47,5°C se produjo 66,3 % de metano.

Se puede comprobar que, a mayor porcentaje de sólidos totales, la cantidad de biogás producido se mantiene constante, cuando la temperatura es alta, y además, se pudo determinar también la gran influencia que tiene el pH, la temperatura externa y la humedad en la producción de biogás para este tipo de influente y de digestor.

#### IV.3.2.6. Equilibrio hidráulico y tiempo de retención hidráulico (TRH)

El tiempo de retención, junto con la velocidad de carga, determinada por el tipo de substrato, son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor. Los tiempos de retención usuales tratando residuos ganaderos varían mucho según la fuente consultada y van de 10 a 30 días (Hobson, 1990). Rosenwinkel y Meyer (1999) mostraron que con residuos de estomago de cerdo y colas de flotación de matadero, la digestión anaeróbica de los contenidos de estomago fue posible con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 44 días aunque el sistema mostró acidificación y la metanogénesis fue incompleta. Reduciendo el tiempo de retención a 25 días la metanogénesis se detuvo completamente. Estos autores concluyeron que la digestión anaeróbica de solo

residuos de estomago no es recomendable. La co-digestión de los residuos de estomago (25%) con colas de flotación de matadero sufrieron un tiempo de retención de 17 días para obtener datos estable de producción de CH<sub>4</sub>.

El biodigestor tubular es de flujo continuo, y por tanto no es necesario vaciarlo normalmente a lo largo de su vida útil por lo que el TRH varía en función de la carga de residuos al reactor. En realidad, se produce un equilibrio hidráulico por el que cada día al realizar la mezcla de carga por la entrada, desplazará el lodo interior, y rebosará por el otro extremo, la salida, la misma cantidad pero del material ya digerido.

El TRH de los biodigestores, es directamente proporcional al incremento de la producción de metano y en los tres casos se evidencia esta tendencia (Figura 62, donde se aprecia la de evolución del metano con el tiempo), atribuida a la presencia de materia orgánica de mataderos cuya degradación demanda largos periodos de tiempo para su digestión.

Para el resto de gases generados también se observa una relación directa (aunque no significativa) en entre la generación de gases y el tiempo de retención hidráulica, ya que el sistema debe trabajar en condiciones anóxicas vale decir en ausencia de aire, fundamentalmente de oxígeno, es así que se puede evidenciar que en un inicio si existía bastante de este último pero que con el pasar de los días se fue estabilizando y entrando en un sistema anóxico.

La relación, aún siendo positiva, entre el TRH y la generación de metano tampoco se muestra como significativa, debido a la alta influencia de otras variables como la temperatura, el pH, etc., así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención. Este TRH será necesario para que las bacterias que con menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás. Los TRH varían significativamente según la zona geográfica donde se instalen los biodigestores tal y como se observa en la Tabla 27.

Como se puede evidenciar el ensayo realizado llegó a cumplir el rango de trabajo de producción de biogás trabajándose, en ciertos momentos, al límite de las posibilidades en cuanto a temperatura, incrementándose casi al doble el TRH, en la experimentación.



Tabla 27. Identificación de ecorregiones según temperatura ambiente y altura.

Ecoregión	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Trabajo (invernadero)(°C)	Altura sobre el nivel del mar (m)	TRH medio (d)
Trópico	-12 a 20	6 – 15	2900 – 4500	15
Valle	5 a 30	15 – 20	1800 – 2900	50
Altiplano	13 a 38	25 – 30	0 - 1800	60

Fuente: Elaboración propia

La fracción de materia orgánica degradada aumenta al aumentar el TRH, sin embargo la producción volumétrica de metano (producción por unidad de reactor) disminuye, una vez superado el óptimo. Es por tanto necesario cambiar para cada tipo de residuo y de digestor el tiempo de retención que optimiza el proceso.

#### IV.3.3. Optimización del sistema

Con objeto de desarrollar un sistema que sea eficiente en todas las condiciones y que acuse levemente la variabilidad de residuos, humedades, temperaturas, etc. dentro del rango ensayado se hace necesaria la optimización del mismo.

Para ello se realiza un estudio estadístico de la influencia relativa de las variables medidas en los biodigestores. En la Figura 63, se observan las distancias euclídeas con todos los datos disponibles. Las distancias euclídeas dan una pauta muy específica del comportamiento de los sistemas de biodigestión en cuanto a sus variables, siendo estas las que muestran la significación de las interacciones entre ellas. Se han considerado como independientes todas las variables en los tres reactores.

En dicha figura se observa una muy alta influencia del tiempo que invalida las demás relaciones por lo que en los siguientes diagramas se observan las distancias euclídeas sin el tiempo para cada biodigestor.

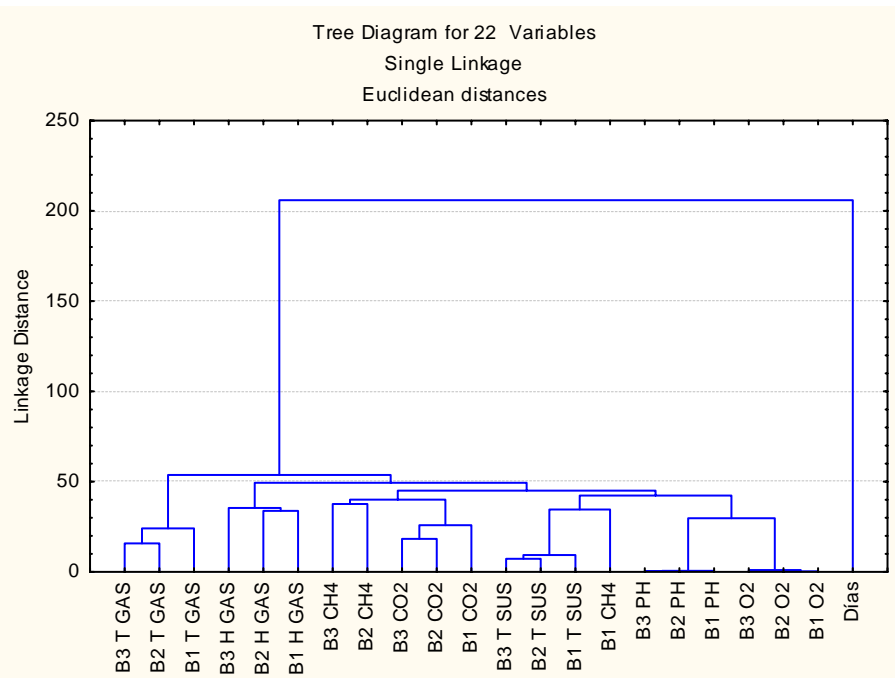


Figura 63. Distancias euclídeas de las variables consideradas como independientes.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 64, correspondiente al B1 se observa una alta importancia de la humedad del gas para explicar la evolución del biodigestor. Las siguientes variables en importancia son la temperatura del gas y el dióxido de carbono emitido que se observan con el mismo nivel de significación. También, aunque a otro nivel, se observa que también tienen el mismo nivel de significación la temperatura del sustrato y el metano emitido. Se ha encontrado muy baja significación para el pH y el oxígeno emitido.

Por otra parte, en la Figura 65, correspondiente al B2 también se observa una alta significación de la humedad del gas para explicar la evolución del biodigestor pero en este caso con la misma distancia euclídea que la temperatura del gas. Del mismo modo, aunque a otro nivel, se muestra que también tienen semejante nivel de significación el dióxido de carbono y el metano emitido, muy cercano a la temperatura del sustrato. También se muestra una muy baja significación para el pH y el oxígeno emitido.

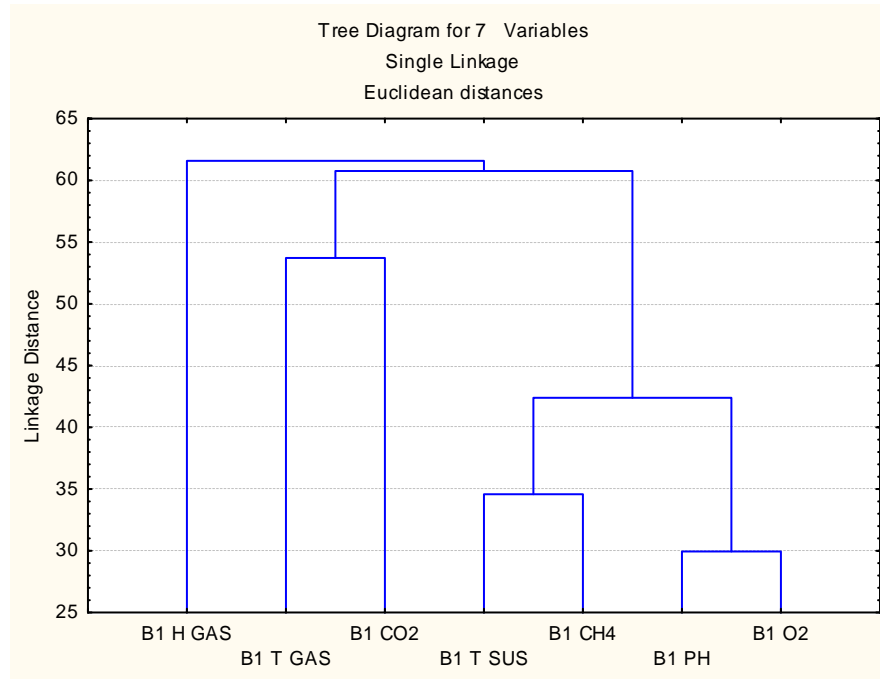


Figura 64. Distancias euclídeas de las variables del Biodigester 1 consideradas como independientes.

Fuente: Elaboración propia

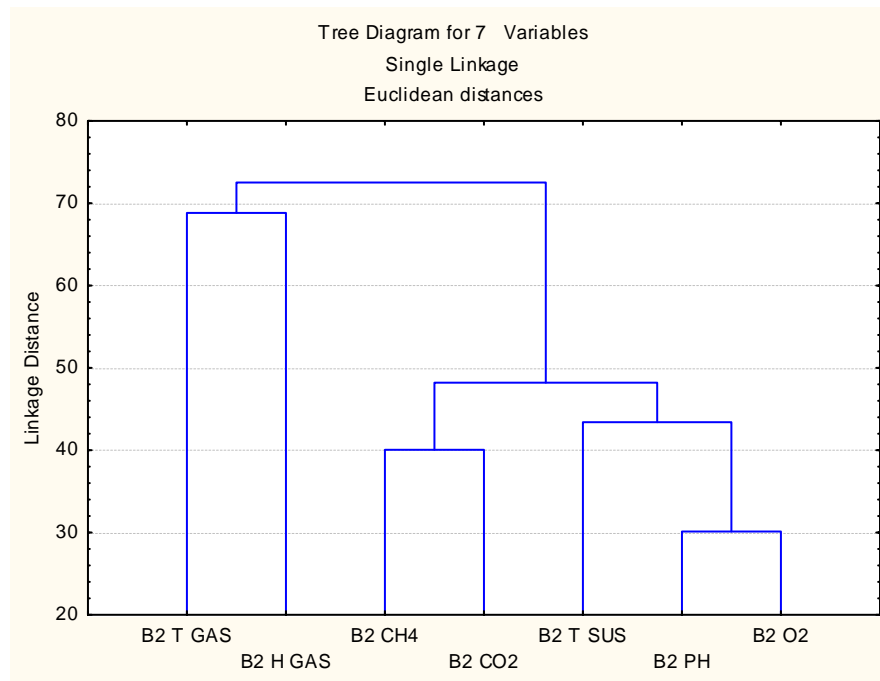


Figura 65. Distancias euclídeas de las variables del Biodigester 2 consideradas como independientes.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 66, correspondiente al B3 se muestra un cambio en el comportamiento de las variables con una alta significación de la temperatura del gas y a más bajo nivel la humedad del gas, el dióxido de carbono y el metano emitido, muy cercano a la temperatura del sustrato. También se muestra una muy baja significación para el pH y el oxígeno emitido.

En general se observan ciertas similitudes en el comportamiento de los biodigestores siendo la temperatura y humedad del gas las variables importantes para explicar la evolución de los datos Y sin embargo tanto el pH como el oxígeno emitido se muestran como poco significativos.

Por otra parte, haciendo un análisis de componentes principales para cada biodigestor (Tablas 28, 29 y 30, para los Biodigestores 1,2 y 3 respectivamente), se puede apreciar que se obtiene una varianza de sólo un 14,9 % para un primer componente y un 25,5% para el segundo componente en el B1, un 16,4 % para un primer componente y un 25,4% para el segundo componente en el B2 y un 15,0 % para un primer componente y un 24,3% para el segundo componente en el B3. En la suma de los nueve primeros componentes sólo explican el 61% de los datos para los tres reactores por lo que se demuestra que ninguno de los factores estudiados se considera como predominante en el comportamiento de los biodigestores a nivel industrial.

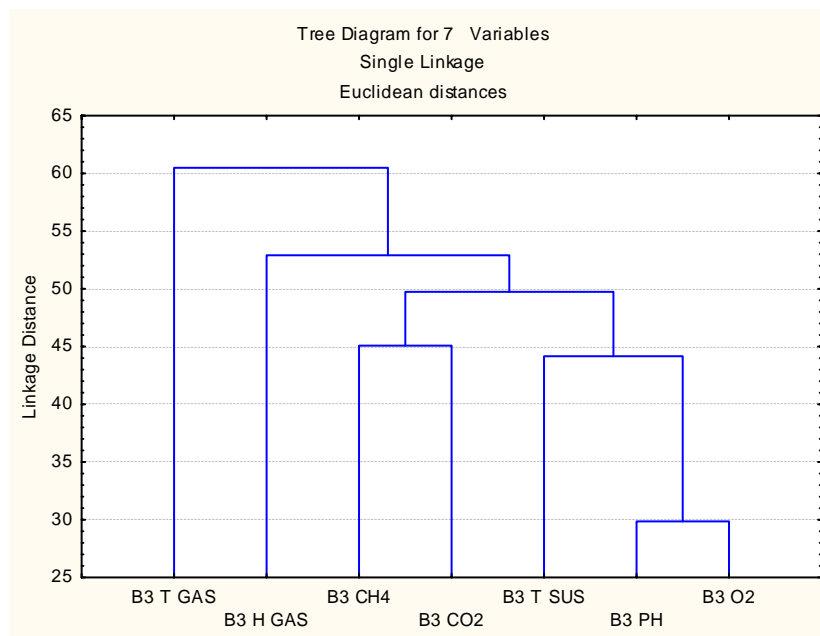


Figura 66. Distancias euclídeas de las variables del Biodigestor 3 consideradas como independientes.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Factores evaluados en el análisis de componentes principales para el Biodigestor 1.

Principal Component Analysis Summary (biodig inds.sta)								
Number of components is 9								
61.0095% of sum of squares has been explained by all the extracted components.								
Component	R <sup>2</sup> X	R <sup>2</sup> X(Cumul.)	Eigenvalues	Q <sup>2</sup>	Limit	Q <sup>2</sup> (Cumul.)	Significance	Iterations
1	0.149028	0.149028	4.023750	0.056257	0.087719	0.056257	S	15
2	0.106558	0.255586	2.877066	0.187194	0.091880	0.232920	S	8
3	0.074837	0.330422	2.020588	0.266969	0.096471	0.437707	S	18
4	0.058885	0.389308	1.589903	0.335568	0.101563	0.626395	S	27
5	0.050950	0.440257	1.375644	0.390324	0.107246	0.772222	S	50
6	0.050221	0.490479	1.355976	0.443798	0.113636	0.873309	S	28
7	0.041642	0.532120	1.124322	0.490725	0.120879	0.935480	S	50
8	0.038988	0.571108	1.052663	0.532128	0.129167	0.969813	S	2
9	0.038987	0.610095	1.052647	0.571116	0.138756	0.987053	S	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Factores evaluados en el análisis de componentes principales para el Biodigestor 2.

Principal Component Analysis Summary (biodig inds.sta)								
Number of components is 9								
61.0110% of sum of squares has been explained by all the extracted components.								
Component	R <sup>2</sup> X	R <sup>2</sup> X(Cumul.)	Eigenvalues	Q <sup>2</sup>	Limit	Q <sup>2</sup> (Cumul.)	Significance	Iterations
1	0.164416	0.164416	4.439233	0.076634	0.087719	0.076634	S	9
2	0.090527	0.254943	2.444240	0.182663	0.091880	0.245298	S	37
3	0.077514	0.332458	2.092888	0.267872	0.096471	0.447462	S	17
4	0.063625	0.396083	1.717872	0.342810	0.101563	0.636877	S	20
5	0.047930	0.444013	1.294109	0.397571	0.107246	0.781244	S	26
6	0.045907	0.489920	1.239502	0.445639	0.113636	0.878730	S	50
7	0.042217	0.532137	1.139859	0.490280	0.120879	0.938186	S	48
8	0.038987	0.571124	1.052636	0.532146	0.129167	0.971080	S	2
9	0.038987	0.610110	1.052645	0.571138	0.138756	0.987597	S	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Factores evaluados en el análisis de componentes principales para el Biodigestor 3.

Principal Component Analysis Summary (biodig inds.sta)								
Number of components is 9								
61.0115% of sum of squares has been explained by all the extracted components.								
Component	R <sup>2</sup> X	R <sup>2</sup> X(Cumul.)	Eigenvalues	Q <sup>2</sup>	Limit	Q <sup>2</sup> (Cumul.)	Significance	Iterations
1	0.150451	0.150451	4.062169	0.066480	0.087719	0.066480	S	14
2	0.093265	0.243715	2.518147	0.164490	0.091880	0.220034	S	15
3	0.082457	0.326173	2.226352	0.258526	0.096471	0.421676	S	13
4	0.059736	0.385909	1.612875	0.329603	0.101563	0.612293	S	36
5	0.054396	0.440305	1.468693	0.388228	0.107246	0.762812	S	35
6	0.049715	0.490020	1.342304	0.443239	0.113636	0.867943	S	21
7	0.038986	0.529006	1.052635	0.490029	0.120879	0.932655	S	2
8	0.042116	0.571122	1.137124	0.529329	0.129167	0.968303	S	50
9	0.038992	0.610115	1.052793	0.571135	0.138756	0.986406	S	2

Fuente: Elaboración propia

En el análisis estadístico se observan pocas diferencias que se consideren significativas en el comportamiento de los reactores y tampoco ninguna variable se revela como predominante frente al resto por lo que se realizará un análisis de superficie de respuesta mediante modelos polinómicos para cada una de las variables estudiadas y cada reactor. Este análisis puede llevarse a cabo una vez demostrado la normalidad de todas las variables independientes y su similitud estadística entre los biodigestores. Los análisis se llevan a cabo considerándose la producción de metano como variable objetivo a optimizar dentro del sistema. En la Figura 67, se observa la relación entre la temperatura del sustrato y la producción de metano en función del tiempo para los biodigestores estudiados.

En dicha figura se observa una neta relación positiva entre la temperatura del sustrato y la producción de metano en los tres biodigestores. Este hecho coincide con los datos encontrados en bibliografía. En base a este análisis se puede inferir que la temperatura interna del sustrato es una de las variables más importantes en el sistema de biodigestión, y como vemos la temperatura lleva un rango promedio de 13,06°C. Aunque aumentando con respecto al tiempo.

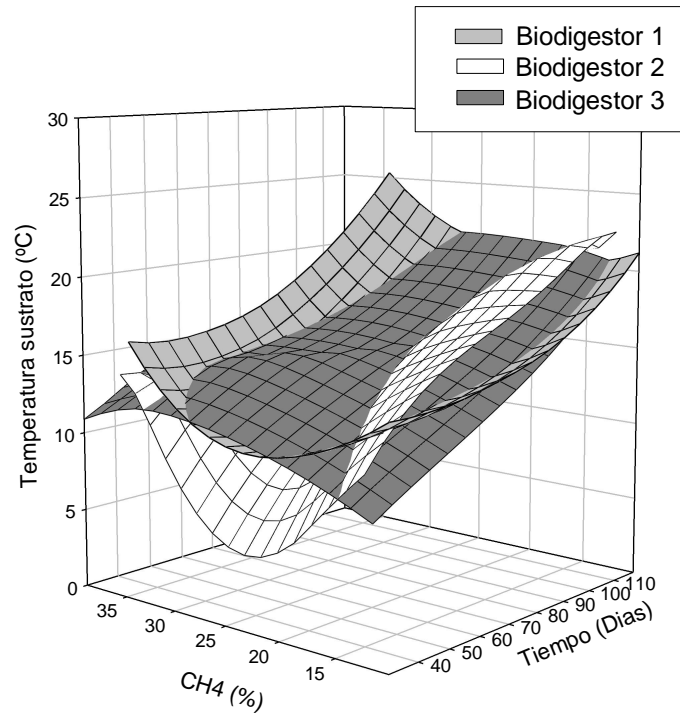


Figura 67. Evolución de la Temperatura del sustrato y el metano emitido en los biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

El intervalo de temperaturas en la que las bacterias mesófilas completan su ciclo biológico está entre 15-40°C. En nuestro caso se incumple por debajo según datos iniciales aunque con una leve inclinación hacia un sistema mesofílico, debido fundamentalmente a la época del año de la toma de datos (invierno). La evolución de las temperaturas tanto de entrada como de salida al y desde el biodigestor fueron tomadas de manera que exista una relación directa entre estas variables y la temperatura interna del sistema, siendo al final estas insignificantes para realizar un análisis más detenido de sus interacciones.

Las temperaturas de entrada y salida para cada uno de los materiales no presentaron diferencias significativas con variaciones mínimas entre las medias y comportamientos similares. En este sentido, inicialmente se observa una menor eficiencia del B2 frente al B1 que puede ser considerado como el más eficiente aunque no se han encontrado diferencias significativas entre los biodigestores.

En la Figura 68, por otra parte, se observa la relación entre la temperatura del invernadero y la del sustrato en función del tiempo. Es claro que el invernadero

tiene una importancia en la evolución de la temperatura del sustrato por lo que se considera también en este estudio la relación entre la temperatura del sustrato (directamente dependiente de la cantidad de metano emitido) y del invernadero.

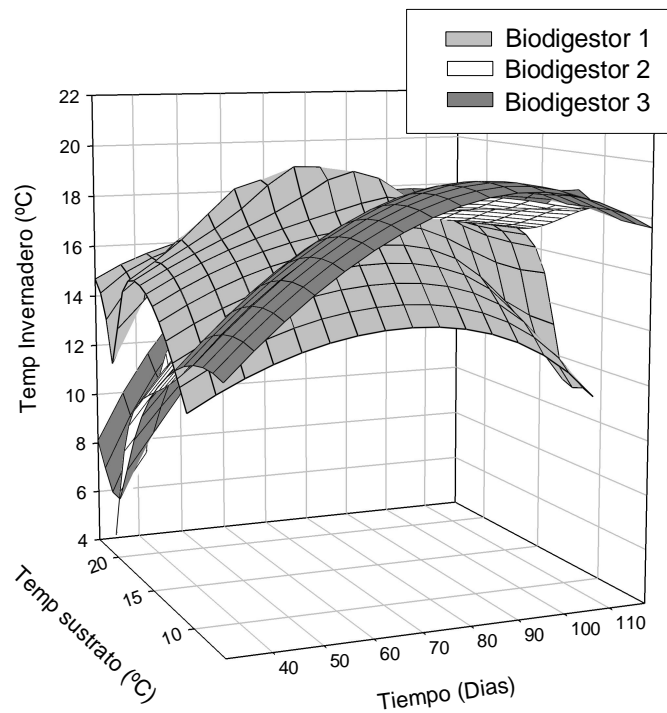


Figura 68. Evolución de la Temperatura del invernadero y la del sustrato en los biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 68, se observa que inicialmente el B1 es el que alcanza mayor relación entre ambas temperaturas, por lo que se puede considerar que la temperatura interna se incrementa más rápidamente que en el resto de los biodigestores o que posee un mejor aislamiento del entorno. Aunque esta evolución decae durante la estabilización de los biodigestores. En este sentido B2 y B3 tienen un comportamiento similar (ligeramente superior para el B3) en el que va aumentando progresivamente la temperatura del sustrato respecto a la del invernadero situándose, durante la estabilización, en valores netamente superiores al B2.

Como se puede evidenciar en aquellos momentos donde la temperatura se incrementó, el porcentaje de biogás también aumentó su productividad. De tal manera que, para incrementos de temperatura de más de 5°C, el incremento en la



productividad de biogás se incrementó un 30 a 50%, en ese sentido se puede afirmar que la relación temperatura y producción de biogás se cumplió adecuadamente en el sistema, siendo nuestra limitante la época de inicio del ensayo que fue en invierno.

Con respecto a la temperatura del gas, en la Figura 69, se observa la relación entre la temperatura del gas la producción de metano en función del tiempo para los biodigestores estudiados.

En la Figura 69 se observa muy poca dependencia de la temperatura del gas respecto a la generación de metano fundamentalmente para B1 y B3 exhibiendo un comportamiento diferente para el B2. En este biorreactor se aprecia una dependencia positiva de la temperatura del gas respecto a la producción de gas siendo esa relación cuadrática ante el aumento de temperatura. . De manera similar a lo observado en anteriores figuras, el B2 presenta un comportamiento diferente respecto al B1 y B3, de tal manera que en cuanto a la producción de metano, ante la misma temperatura del gas, suele ser menor estadísticamente.

Por otra parte, en la Figura 70, se observa la relación entre el pH y la producción de metano en función del tiempo para los biodigestores estudiados.

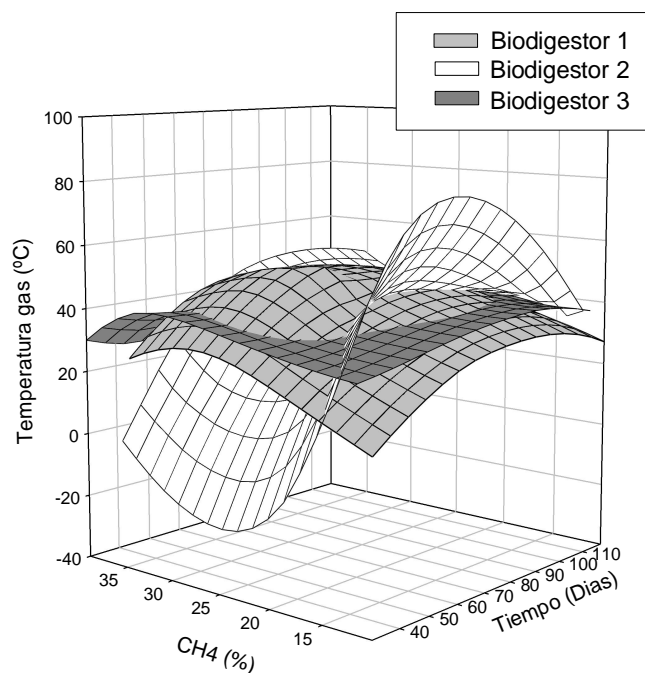


Figura 69. Evolución de la Temperatura del gas y la producción de metano en los biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

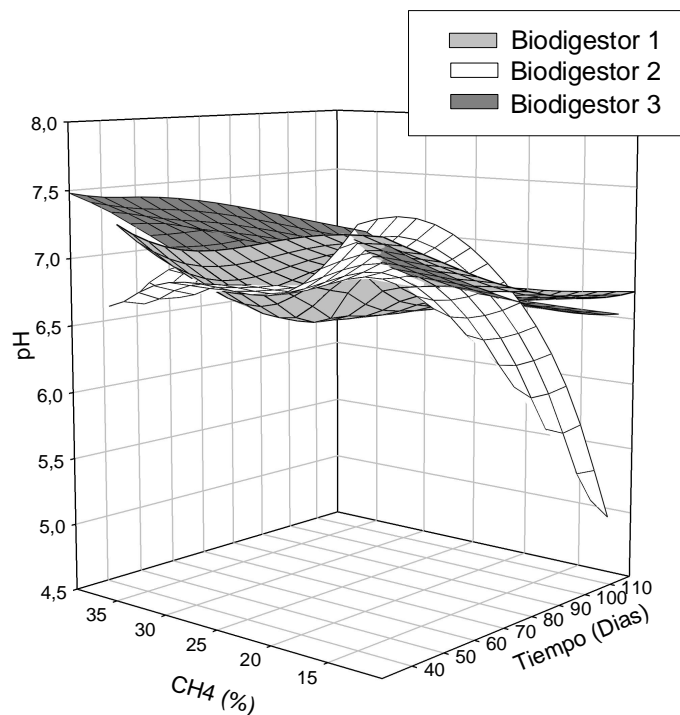


Figura 70. Evolución del pH y la producción de metano en los biodigestores.  
Fuente: Elaboración propia

También el comportamiento del B2 es diferente en el comportamiento del pH respecto al B1 y B3. En la figura anterior se observa una leve dependencia negativa del pH en la producción de metano para los biodigestores. Según la experiencia en los biodigestores industriales, estos sufren una tendencia a la acidificación, que se hace determinante en el B2 en el que la producción del metano cae drásticamente. Para explicar este hecho se puede destacar que la digestión anaerobia depende de las interacciones de varias subpoblaciones microbianas que coexisten manteniendo un equilibrio en el pH y otros parámetros de respuesta del proceso. También, el diferente comportamiento del B2 puede ser debido a la acumulación de ácidos grasos volátiles que puede provocar la inhibición del proceso enzimático de hidrólisis (Angelidaki *et al.* 1993), lo que resulta en una menor producción de metano.

Otro efecto importante es la variación de pH del sustrato. Al incrementar la concentración de SV en el sustrato se observa una mayor reducción en el pH, esta reducción de pH provoca la inhibición de la reacción metanogénica explicando en parte la disminución del rendimiento de producción de metano (Dinsdale, 2000).

Como se esperaba al ser ambos productos de degradación, también se observa una relación positiva entre el dióxido de carbono y la producción de metano en función del tiempo (Figura 71).

En general se aprecia un aumento en la cantidad de metano generado durante la estabilización de los biodigestores. Aunque la eficiencia del proceso también puede ser media en función de la relación entre ambas. También en este caso se obtiene una baja relación  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  para el B2 (menor eficacia) que puede estar relacionado con los problemas en el estancamiento y la falta local de anaerobiosis que tuvo lugar en algunos momentos en este reactor. El comportamiento de B1 y B3 sigue siendo similar estadísticamente. Aunque durante el primer periodo de estabilización de los biodigestores el B1 presenta rendimientos mayores.

Al realizar un análisis de la relación entre la Humedad con la producción de  $\text{CH}_4$ , (Figura 72) se pueden observar las siguientes respuestas al análisis realizado.

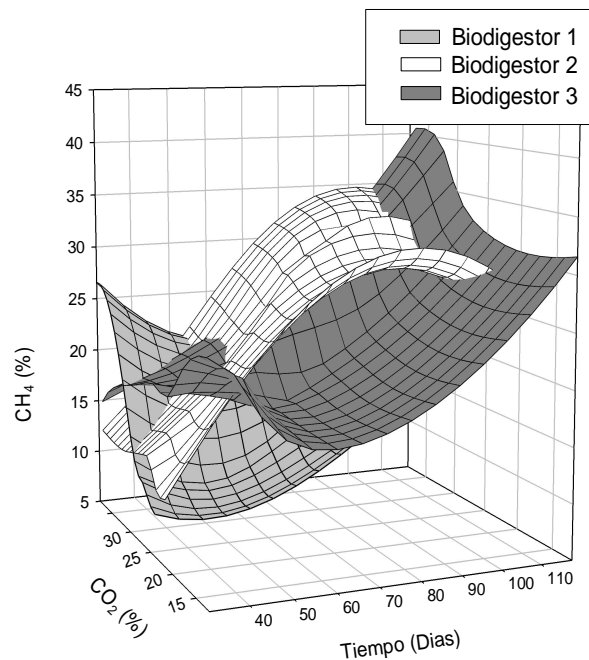


Figura 71. Evolución del dióxido de carbono y la producción de metano en los biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

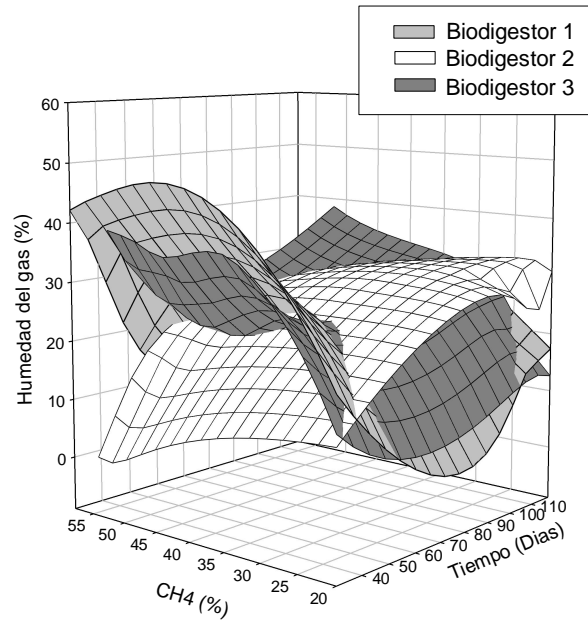


Figura 72. Evolución de la humedad del gas y la producción de metano en los biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar existen diferentes correlaciones entre la humedad y la producción de  $\text{CH}_4$ , pudiendo advertir que a una mayor humedad la cantidad de metano aumenta en el sistema de biodigestión. Aunque la respuesta fue diferente de nuevo para el B2 respecto a B1 y B3 que tuvieron comportamientos similares respecto a esta variable. El comportamiento de los biodigestores no presenta, en general una tendencia clara con respecto a este parámetro debido fundamentalmente a que el biogás suele estar saturado completamente de vapor de agua y esta saturación depende de la temperatura del gas (Brown y Maunder, 1994).

Información bibliográfica de plantas en funcionamiento de co-digestión anaeróbica de residuos de matadero e industria de alimentos en Suecia, indican rendimientos de metano de  $160 \text{ m}^3 \text{ T}^{-1}$  residuo para mezcla de residuos de matadero en digestión batch y  $860 \text{ m}^3_{\text{biogas}} \text{ T}^{-1} \text{ SV}$  el rendimiento en proceso semicontinuo en laboratorio y  $700 \text{ m}^3_{\text{biogas}} \text{ T}^{-1} \text{ SV}$  el rendimiento en proceso semicontinuo a nivel piloto. El rendimiento de metano obtenido en proceso batch ( $86.4 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}^{-1}_{\text{residuo}}$ ) corresponde a 66% del reportado para la co-digestión de residuos de matadero mezclado con residuos de industria de alimentos.

#### IV. 4. INTERACCIONES TECNOLÓGICAS ENTRE LOS DOS SISTEMAS

##### IV.4.1. Potencial metodológico de la tecnología de biogás en dos diferentes escenarios

La tecnología de biogás tiene cada vez más importancia en el panorama bioenergético actual. Además, todavía no ha desarrollado todo su potencial de rendimiento. Tal como demuestran las investigaciones recientes, existen numerosas posibilidades de mejora, especialmente en el ámbito de los procesos de optimización de la fermentación, sobre todo para países en vías de desarrollo como Bolivia.

Por otro lado, resulta importante decidir qué tipo de tecnología, en particular, debe ser la más apropiada para aplicar en cada caso, su costo, su eficiencia y su viabilidad, para proceder a la construcción y explotación de las instalaciones diseñadas, ya que muchas veces sólo se tiene en cuenta el importe a pagar por consumo de energía, y no se analiza que entre la fuente bruta del portador energético y el consumidor directo (ya sea a nivel familiar o a nivel industrial).

Se debe tener en cuenta tres ideas centrales para la implementación de la tecnología estudiada en los diferentes escenarios:

- a) La investigación de esta tecnología debe enmarcarse dentro un contexto de una optimización de procesos sobre desarrollo y energía, tanto en el medio rural como en el industrial.
- b) El desarrollo de la tecnología no debe realizarse en forma aislada del contexto socio-cultural y económico que caracteriza el medio en el cual se aplicará.
- c) La aplicación metodológica de esta tecnología en dos niveles (familiar o industrial) depende del esquema de escalonamiento y de aspectos técnicos de adaptabilidad.

Es importante también recordar que se requiere un estudio previo del medio en los distintos ecosistemas Bolivianos, para fijar las áreas con características favorables, así como asegurar la materia prima (residuos orgánicos) y agua. Una vez definidas estas áreas o sectores se deberán implementar unidades demostrativas para poder extraer los datos concretos que permitan una precisa evaluación del biogás en interacción con los distintos factores del medio. Sólo con esta información podrá encararse una proyección a mayor escala.

En particular el objetivo de optimizar y maximizar el rendimiento en metano deberá compatibilizarse con los requerimientos del sector a quien va dirigida esta técnica. La tendencia a una reducción general de los costos del sistema constituyen una prioridad general debiéndose evaluar en zonas templadas y frías la alternativa de trabajar con mayores tiempos de retención y grandes volúmenes de digestores o el aumentar la temperatura de funcionamiento con la inclusión de sistemas de aislamiento (p.e. Totorá en altiplano Boliviano) y brindar calefacción (calor extra, sistemas de invernadero), lo cual reducirá los tiempos de retención requeridos y la eficiencia de los bioreactores mejorará.

La información actualmente disponible sobre la viabilidad, operatividad y eficiencia de las plantas de biogás a nivel rural no es altamente confiable, por lo que surge la necesidad de contar con unidades demostrativas convenientemente monitoreadas para definir los parámetros fundamentales que permitan realizar los estudios económicos. La viabilidad de las plantas se verá también influenciada por la relación costo-beneficio presente en las distintas zonas o actividades, por lo tanto se necesitará realizar para cada caso el estudio integral. Dichos estudios podrán ser realizados siguiendo alguno de los patrones enunciados en el presente trabajo prestando particular atención a la predisposición del hombre de cada lugar para adoptar esta técnica, tanto para su operación como para la utilización de los productos generados (Hilbert, 2003).

La tecnología de producción de biogás todavía ofrece mucho espacio para la mejora e investigación, sobre todo en sistemas de altura, donde las condiciones climáticas son más extremas y los materiales que se usan como insumos (estiércoles) son de diversa fuente y sobre todo en condiciones de más de 4000msnm. Los investigadores que trabajan en el tema de biogás siempre destacan el desafío que supone simular los procesos de fermentación de varias capas bajo las condiciones más variadas y poder obtener normas concretas para la aplicación práctica a partir de parámetros de proceso reproducibles.

Asimismo, también debe resolverse la cuestión cuáles son los rivales de un proceso de fermentación eficiente, es decir, qué sustancias tienen efectos inhibidores o incluso tóxicos en la obtención del gas (Hilbert, 2003).

#### IV.4.2. Interacciones y sinergias entre las tecnologías a distintos niveles en Bolivia

La aplicación del biogás en el área rural ha sido muy importante en Bolivia desde la década del 80, pero ya en la actualidad, el avance en la optimización de los sistemas, y la continua investigación ha podido generar y diferenciar dos campos claramente distintos. En el primero, el objetivo buscado es dar energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los agricultores de zonas marginales rurales o al productor medio de los países con sectores rurales de muy bajos ingresos y difícil acceso a las fuentes convencionales de energía.

En este caso la tecnología desarrollada ha buscado lograr digestores de mínimo costo y mantenimiento fáciles de operar pero con eficiencias pobres y bajos niveles de producción de energía.

El segundo tipo de tecnología está dirigido al sector agrícola y agroindustrial de ingresos medios y altos. El objetivo buscado en este caso es brindar energía y solucionar graves problemas de contaminación. Los biodigestores industriales desarrollados para esta aplicación tienen un mayor costo inicial y poseen sistemas que hacen más complejo su manejo y mantenimiento.

Desde el punto de vista de la materia prima será necesario contar con un sistema de fácil recolección y manipulación evitándose en las zonas frías el lavado con agua de las instalaciones que produce grandes volúmenes con altas diluciones y bajas temperaturas. El medio ambiente con sus características climáticas y de suelo condicionan el tipo de digestor a construir incidiendo también en la selección del modelo y el monto de la inversión inicial necesaria ya que existen parámetros que pueden ser modificados como la temperatura de funcionamiento, el tiempo de retención hidráulica y la velocidad de carga volumétrica los cuales están relacionados entre sí y determinan la eficiencia final del digestor y la energía neta disponible (Hilbert, 2003).

Para las zonas templadas y frías existen dos opciones principales que deben considerarse a fin de dimensionar y diseñar el reactor. Estas opciones están determinadas fundamentalmente por la temperatura de trabajo del equipo pudiéndose optar entre temperaturas: ambiente psicrófila 10°C a 25°C, mesófila 30°C a 40°C, y para condiciones de trópico termófila 40°C a 55°C. El rango de temperatura en que finalmente trabaje el sistema determinará el tiempo de

permanencia de la materia en el digestor o tiempo de retención y la eficiencia de producción de biogás. En el Tabla 31, se observa como se modifican cada uno de los parámetros enunciados (Hilbert, 2003).

Tabla 31. Características de biogás a diferentes pisos ecológicos.

Temperatura (°C)	Tiempo de Retención (Días)	Eficiencia ( $m^3_{\text{biogas}} m^{-3}_{\text{digestor}}$ )	Aislamientos y calefaccion
10 - 25	50 - 70	0,01 - 0,30	SI
30 - 40	20 - 30	0,70 - 1,00	SI
40 - 55	10 - 20	1,00 - 2,00	NO

Fuente: Hilbert (2003)

La modificación de los tiempos de retención tiene una directa influencia sobre el tamaño del digestor requerido para un mismo volumen de material a digerir y con la temperatura ambiental con la consiguiente modificación de la inversión inicial necesaria.

Con respecto a los subproductos que el sistema genera durante la correcta utilización tanto del biogás como del biofertilizante cobra significativa importancia pues será en definitiva la retribución a la inversión y trabajos realizados. Existen distintas alternativas que deberán ser cuidadosamente evaluadas comparativamente desde el punto de vista técnico, económico y social para realizar una correcta elección (Hilbert, 2003).

Es importante tomar en cuenta, la estación invernal y de lluvias, para las dos aplicaciones de biogás tanto rural/familiar, como industrial. Debido a este fenómeno térmico, el tiempo requerido para la activación bioquímica de la biodigestión tiene un incremento estimado de hasta 45 días (50% más del tiempo registrado en primavera), aspecto que tuvo su influencia en la adecuada ejecución del proyecto pues inevitablemente se inicio los ensayos justo en esta época (Campero, 2009).

La digestión anaeróbica de residuos orgánicos tanto a nivel familiar (rural) como industrial puede ser trabajado en un proceso semicontinuo, es dependiente de la composición de la materia prima que se alimenta al biodigestor. La composición de la carga influye estableciéndose efectos de sinergismo y antagonismos. Se



estableció que residuos de matadero es sinérgico al incrementar la proporción de estiércol y sobre todo de rumen hasta alcanzar la concentración de 80%, mayores porcentajes de estos residuos producen efectos negativos reduciendo drásticamente la producción de biogás. , Es importante señalar que las cantidades de rumen y estiércol deben ser las optimas para que genere una adecuada biodegradación (Campero, 2009).

Otro importante aspecto a considerar son los costes, al momento de definir una tecnología y su escalonamiento, por ejemplo; el pasar de una tecnología eminentemente familiar hacia un sistema industrial, implica una extrapolación en el plano económico que deben ser tomados en cuenta para poder analizar el sinergismo entre las dos escalas de la tecnología.

Por ello es importante analizar los siguientes datos que han sido clasificados en el siguiente Tabla 32, teniendo en cuenta todos los pasos intervinientes desde la recolección del sustrato hasta la utilización de los productos.

Los costes clasificados como públicos tienen importancia vital para el desarrollo exitoso de esta técnica siendo los mayores montos, los involucrados en la asistencia técnica debido a la característica del medio rural y su extensión en el tiempo durante el cual se debe mantener este servicio. Éste no puede ser soportado por la actividad privada en forma completa ya que los beneficios obtenibles del diseño y construcción de un equipo no son suficientes para solventar un asesoramiento a distancia como el rural (Hilbert, 2003).

Tabla 32. Variables a ser tomadas en cuenta para el análisis de Biodigestores

Costos Asociados a la Operación	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diseño e instalación.</li> <li>2. Materiales.</li> <li>3. Mantenimiento.</li> <li>4. Mano de obra.</li> </ol>
Costos Públicos.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Unidades demostrativas.</li> <li>2. Instalaciones de bajo riesgo comparativo y medidas de fomento.</li> <li>3. Asistencia técnica.</li> </ol>
Costos de la Materia Prima.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mano de obra.</li> <li>2. Equipo para transporte.</li> <li>3. Materia prima, si se compra.</li> </ol>
Costos del Empleo del Efluente.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mano de obra.</li> <li>2. Equipo para transporte</li> <li>3. Almacenamiento.</li> <li>4. Transporte hasta el lugar de uso.</li> </ol>
Costos de Utilización del Biogás.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Almacenamiento</li> <li>2. Distribución.</li> <li>3. Adaptación de equipos.</li> <li>4. Purificación.</li> </ol>

Fuente: Hilbert (2003)

Según Hilbert, 2003 en una primera etapa las unidades demostrativas tendrán una gran importancia y deben implementarse con aporte del estado en su costo o financiamiento. Superada esta primera etapa de conocimiento será necesario un incentivo bajo la forma de créditos subsidiados, desgravaciones, etc.; para comenzar una difusión a mayor escala dichos incentivos irán disminuyendo con el tiempo, una vez establecida esta técnica en el medio, que es lo que se quiere en Bolivia con la venta de bonos de carbono, que generen los biodigestores en área rural en un sistema familiar.

Como se puede ver son previsibles cambios tecnológicos de importancia en biogás en los próximos años (como demuestra la presente investigación) es posible; y necesario definir, describir las zonas, regiones o sectores desde el punto de vista social, económico y físico donde esta tecnología pueda tener éxito (o donde sea mínima la posibilidad de fracaso). El resultado de estos estudios y la prevalencia de las zonas donde sea factible la tecnología propuesta darán una señal más clara para determinar la importancia del biogás en el desarrollo agropecuario y energético del país.

# V. CONCLUSIONES



# V. CONCLUSIONES

## V.1 LA ENERGÍA RURAL EN LA COMUNIDAD DE LA MAICA, PROVINCIA CARRASCO DE COCHABAMBA, BOLIVIA

- ✓ El acceso a servicios de energía en comunidades rurales depende principalmente del nivel de ingreso y de las fuentes energéticas viables en la zona. Por tanto la expansión de la cobertura de servicios de energía a zonas no interconectadas debe priorizar el fomento de la actividad económica local. En zonas no conectadas, se requiere de un aumento del ingreso familiar para hacer efectivo el consumo de servicios de energía.
- ✓ Las actividades principales de la zona son agricultura y ganadería.
- ✓ La implementación de sistemas tradicionales de energía para iluminación, radio recepción y cocción de alimentos se ha demostrado, actualmente, como insuficiente.
- ✓ La implementación de biodigestores se considera la opción energética más adecuada debido a que puede garantizar el abastecimiento de biogás para la cocción de alimentos y calefacción básica de una familia compuesta aproximadamente por cinco miembros (2 adultos y 3 Niños). También puede mejorar las condiciones higiénicas por la reducción de patógenos, reducir la cantidad de trabajo con respecto a la recolección de leña que realizan los componentes de la familia, sobre todo mujeres y niños y favorecer también la protección del suelo, agua, aire y vegetación, por la incorporación de biofertilizantes provenientes de los biodigestores.
- ✓ Según los datos de caracterización de residuos sólidos, el 63%, de media, son materiales reciclables, de estos, el 66% corresponde a la fracción orgánica fermentable, 16 % a la fracción reciclable y 18% a otros residuos. Este 66% hace posible el tratamiento de los residuos por medio de tecnologías de biodigestión tanto a nivel rural (familiar) e industrial (en nuestro caso mataderos).

## V.2. SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN EN CONDICIONES FAMILIARES

- ✓ La utilización de biodigestores tipo Plug off de PVC se presenta como muy adecuado para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias (granjas intensivas de ganado lechero, mataderos y otros) ofreciendo resultados positivos en todas las condiciones ensayadas.
- ✓ La adición de residuos de ganado a los humanos produce un efecto sinérgico hasta alcanzar concentraciones cercanas al 10%. El incremento de la proporción de estiércol produce efectos negativos reduciendo drásticamente la producción de biogás.
- ✓ La temperatura interna del biodigestor es el parámetro más importante para el buen funcionamiento del biodigestor. Se observa una relación directa (en las condiciones evaluadas) entre la temperatura y el volumen de biogás así, una reducción en 3 grados, de 36°C a 33°C, determino una reducción de 60% en la producción de biogás.
- ✓ El pH inicial es un parámetro determinante fundamentalmente en la puesta en marcha del biodigestor. El pH del biodigestor y del efluente confirmó el buen desempeño de los biodigestores empleados, ya que se mantuvo en un nivel neutro, en un pH promedio de 6.84, durante el seguimiento del sistema de biodigestión anaerobio.
- ✓ La temperatura exterior al biodigestor no presenta una gran influencia en el funcionamiento del mismo si el control de temperatura interna es eficiente.
- ✓ Condiciones de operación considerados más idóneos en el proceso semicontinuo, de biodigestión en el altiplano de Bolivia son: temperatura interna promedio de 36°C, tiempo de retención hidráulico de 40 d, la carga de sustrato al sistema (materia prima a degradar) de 20 kg d<sup>-1</sup>.
- ✓ El gas obtenido contiene entre 55 y 70 % de metano, y entre 30- 45 % de CO dado que el contenido energético del metano puro es 8556.2 Kcal m<sup>-3</sup>, en condiciones estándar de presión y temperatura.
- ✓ Este tipo de biodigestores en PVC, se considera adecuado para fincas y granjas rurales donde el clima es frío (10 a 18 °C) y que requieren autoabastecerse de energía.

### V.3. SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN INDUSTRIALES (MATADEROS)

- ✓ La utilización de biodigestores industriales se manifiesta como una alternativa viable en la transformación de desechos de matadero debido a su producción de biogás con mínimo mantenimiento.
- ✓ El tiempo de estabilización de los biodigestores industriales se establece en 70 d independientemente del tipo de biodigestor. Aunque en condiciones climatológicas adversas (invierno) puede llegar a los 90 d.
- ✓ En los tres biodigestores se realiza un proceso de degradación del material orgánico. Generando biogás y un líquido final que puede ofrecer un alto poder fertilizante. Casi todos los principales nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio así como los elementos menores son conservados en el efluente. El Nitrógeno del biodigestor B1, se incremento en 1,65 veces, en B2 se incremento en 1,9 veces, en B3 se incremento en 2,1 veces.
- ✓ El pH y la temperatura interna se muestran también como los parámetros más importantes en los biodigestores ensayados. El sistema muestra un pH estable, y una producción de biogás aceptable, aunque en el límite inferior de emisión, con respecto a sistemas de digestión similares.
- ✓ La mezcla residuos de matadero y de estiércol también ofrecen resultados positivos. Se muestra un efecto sinérgico al incrementar la proporción de estiércol y sobre todo a rumen hasta alcanzar la concentración de 80%, mayores porcentajes de estos residuos produce efectos negativos reduciendo drásticamente la producción de biogás.
- ✓ Se puede afirmar que no existieron diferencias significativas en cuanto al material de implementación de los tres biodigestores. Todos ofrecieron comportamientos similares considerándose, por lo tanto una gran ventaja la utilización del agrofilm debido al menor precio y a la mayor accesibilidad.





# VI. BIBLIOGRAFÍA



## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Qudais, Moh'd, y Hani A. Abu-Qdais. (2000). Energy content of municipal solid waste in Jordan and its potential utilization. *Energy Conversion and Management* 41, no. 9:983-991.
- AEMA, (2005). Cambio Climático y Protocolo de Kyoto; Causa del Problema: las emisiones de Gases de Efecto Invernadero.
- Afthinos, Y., Theodorakis, N.D. y Nassis, P. (2005). Customer's expectations of service in Greek fitness centres. Gender, age, type of sport center, and motivation differences. *Managing Service Quality*, 15 (3), 245-258.
- Agencia Internacional de Energía, (1998) Análisis energético de América del Sur. Bs.As. Argentina. pp 50-56.
- Ahring, B.K., Angelidaki, I., Johansen, K. (1992). Anaerobic treatment of manure
- Ahring, B.K., Sandberg, M., Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Applied microbiological Biotechnology*. Vol. 43 (3), pag. 559-565.
- Alvarez R, Villca S y Liden G. (2006). Biogas production from llama and cow manure at high altitude, *Biomass and Bioenergy* 30: 66-75.
- Alvarez R. and Liden G. (2008). The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude, *Bioresource Technology* 99: 7278-7284.
- Alvarez Rene, Liden Gunnar. (2008) Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy* 33 (726-734).
- Alvira, F. (1991). Metodología de la evaluación de programas. Madrid: Centro de Investigaciones Sociológicas.
- Alvira, F. (1996). Diseños de investigación social: criterios operativos. En M. García, M., J. Ibáñez y F. Alvira, (1996). *El análisis de la realidad social. Métodos y técnicas de investigación* (pp. 87-114). Madrid: Alianza.
- Amaral, F. L. M. (2004). La digestión anaeróbica de los residuos sólidos urbanos: Panorama actual de la tecnología. Tesis Doctoral, Instituto de Investigaciones Tecnológicas - IPT, São Paulo.
- An, B.X. (1996). The impact of low-cost polyethylene tube biodigesters on small farms in Vietnam. MSc Thesis. University of Uppsala. Uppsala. sp.
- An, B.X. y Preston, T. R. (1995). Low - cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in Vietnam. *Electronic Proceedings of the 2nd International Conference on Increasing Animal Production with Local Resources*. Zhajiang. pp 1.1.
- An, B.X., Man, N.V., Khang, D.N., Anh, N.D. y Preston, T.R. (1994). Installation and performance of low-cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in Vietnam. *Proceedings of the National Seminar-workshop in sustainable Livestock Production on Local Feed Resources*. Agricultural Publishing House. Ho Chi Minh. pp 95-103.
- ANAM – PAN – BID. (2005). Producción Más Limpia para el Sector de Beneficio de Ganado Bovino y Porcino. Programa Ambiental Nacional del Panama. Guia para el manejo de mataderos
- Anderson, G.K., Donnelly, T. y McKeown, K.J. (1982). *Process Biochem.*, 17: pp 28.

- Anderson, G.K., Donnelly, T. y McKeown, K.J., 1982. *Process Biochemical*.
- Angelidaki, I., Ahring, B.K. (1993). Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol. 38, pp 560-564.
- Angelidaki, I., Ahring, B.K. (1997). Monitoring and controlling the biogas process. III curso de Ingeniería Ambiental, pp, 270-282. Lleida, octubre de 1997.together with industrial waste. *Water Science Technology*. Vol. 25 (7).
- Anguera, M.T. (1991). Evaluación del comportamiento en contextos naturales. *Revista de Psiquiatría de la Facultad de Medicina de Barcelona*, 18(6), 277-287.
- Anguera, M.T. (1995). Diseños. En R. Fernández-Ballesteros (Ed.), *Evaluación de programas. Una guía práctica en ámbitos sociales, educativos y de salud* (pp. 149-172). Madrid: Síntesis.
- Anuario Estadístico (2005) Bolivia. Instituto Nacional de Estadística, INE 2005.
- AOAC. (1980). official methods of analysis of the Association of official Analytical Chemist. Washington, DC.
- AOAC. (1980). official methods of analysis of the Association of official Analytical Chemist, Washington, DC.
- AOAC. (1995). Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemist. 13a ed. Washington, DC.
- APHA, AWWA, WCF. (1995). Standard methods for examination of water and wastewater. 18 th. Ed. Washington, DC, USA.
- Attal, A.; Akunna, J.; Camacho, P.; Salmon, P.; Paris, J. (1992). Anaerobic Digestion of Municipal Wastes in Landfill" *Wat. Sci. Tech.*, 25, 243 – 253.
- Ávila, R. O. (2005), "Avaliação do desempenho de sistemas tanque séptico-filtro anaeróbico com diferentes tipos de meio suporte", Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Bajgain S. and Shakya I. (2005). The Nepal Biogas Support Program: A Successful Model of Public Private Partnership for Rural Household Energy Supply, Biogas Sector Partnership, Kathmandu, Nepal.
- Banks C.J. And Wang Z. (1999).Development of two phase anaerobic digester for the treatment of mixed abattoir wastes. *Water Science and Technology*; 40(1), 69-76.
- Banks, C.J., Humphreys, P.N.,(1998). The Anaerobic Treatment of a Lignocellulosic substrate offering little natural pH buffering capacity. *Water Science and Technology*. Vol. 38 (4-5), pp 29 35.
- Bardiya, N., Somayaji, D., Khanna, S. (1996). Biomethanation of banana peel and pineapple waste. *Bioresource Technology*. Vol. 58, pp 73-76.
- Bearden, W. O. y Teel, J. E. (1983). Selected Determinants of Consumer Satisfaction and Complaint Reports. *Journal of Marketing Research*, 20-30.
- Bentler, P. M. (1995). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling*.
- Bericat, E. (1998). La integración de los métodos cuantitativo y cualitativo en la investigación social. Barcelona: Ariel Sociología.
- Bidlingmaier, W. y Papadimitriou, E.K. (1998). Recovery of organics: Composting and anaerobic digestion. *Jornadas sobre el Aprovechamiento Integral de Residuos y la Jerarquía Europea de Gestión*. Club Español de Residuos, The European Waste Club y Generalitat Valenciana. Valencia, España.

- Bitrán & Asociados. (2006). Captura de Gases de Efecto Invernadero de Rellenos Sanitarios para su aprovechamiento económico. Recuperado el 3 de junio de 2009, de <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=927733>.
- Bizquera, R. (1987). Introducción a la estadística aplicada a la investigación educativa. Barcelona.
- Bodet, G. (2006). Investigating customer satisfaction in a health club context by an application of the tetraclasse model. *European Sport Management Quarterly*, 6 (2), 149-165.
- Botero R., Preston T.R. (1986). Low-cost biodigester for production of fuel and fertilizer from manure. Manuscrito no editado, Cali Colombia, pp. 1-20.
- Botero, B.M. y R.P. Thomas. (1987). Biodigester de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para instalación, operación y utilización. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia.
- Braun R, Wellinger A. (2003). Potential of Co-digestion. IEA Bioenergy.
- Bremner, J.M. (1965). Total nitrogen. pp. 1149-1178. In: C.A. Black (ed.). *Methods of soils analysis (Part 2)*. American Society of Agronomy. Madison, WI. CEMAT.
- Brinkman, J. (1999). Anaerobic digestion of mixed waste slurries from kitchens, slaughterhouses and meat processing industries. *Proceedings of the II International symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*. Barcelona, Junio de (1999), pp 190-19.
- Brown, K.A.; Maunder, D.H. (1994). "Exploitation of Landfill Gas: a UK Perspective" *Wat.Sci. Tech.*, 30, 143-15.
- Brummeler, E. T.; Koster, I. W. and Zevalkink, J. A. (1991). Dry digestion of the organic fraction of municipal solid waste in a batch process. *Journal Chem. Tech. Biotechnol.*, v.50.
- BSP - Biogas Sector Partnership (2003)a Mission Report for the High Altitude Biogas Reactor, Beni VDC, Solukhumbu, Informe preparado por: Khanal K N y Boers W, Biogas Sector Partnership, Kathmandu, Nepal.
- BSP - Biogas Sector Partnership (2003)b Construction Options for RABR Remote Area Biogas Reactor, Informe preparado por: Nienhuys N., Biogas Sector Partnership, Kathmandu, Nepal.
- Burton C.H., Turner C. (2003). *Manure Management: Treatment Strategies for Sustainable Agriculture*. Silsoe Research Institute. Bedford (UK).
- Buttle, F.A. (1996). SERVQUAL: review, critique, research agenda. *European Journal of Marketing*, 30 (1), 8-32.
- Campero M. José. (2005). Situación de los recursos zoogenéticos en Bolivia. Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios.
- Campero Oliver et. al, (2009) *Tecnologías Alternativas y Medio Ambiente, BIOGAS EN BOLIVIA PROGRAMA "Viviendas autoenergéticas"* Una nueva forma de ver el futuro energético-ambiental del país, en área rural, Cochabamba, Bolivia.
- Campero. O.J. (2007), Optimización de reactores flexibles en el área rural de Bolivia, UNIA, II Premio Resur.
- Campos P. A, (2001). Optimización de la Digestión Anaerobia de Purines de Cerdo Mediante Codigestión con Residuos Orgánicos de la Industria Agroalimentaria TESIS DOCTORAL Memoria presentada por: Para optar al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universidad de Lleida, España (Julio de 2001).

- Capehart, Barney L., William J. Kennedy, y Wayne C. Turner. (2003). *Guide to Energy Management*. Fourth. United States of America.
- Carmine, E. y McIver, J. (1981). Analyzing models with unobserved variables: Análisis of covariance structures. En G. Bohrnstedt y E. Borgatta (Eds.), *Social measurement: Current issues* (pp. 65-115). Beverly Hills, CA: Sage.
- Carretero-Dios, H. y Pérez, C. (2005). Normas para el desarrollo y revisión de estudios instrumentales. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 5 (3), 521-551.
- Carretero-Dios, H. y Pérez, C. (2007). Standards for the development and the review of instrumental studies: Considerations about test selection in psychological research. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 7, 863-882.
- Castanón, N.J.B. (2002), *Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais, Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização*, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CEPAL. (2000). *La Energía en América Latina, II informe anual para Latinoamérica y el Caribe*. México D.F.
- Chacón, S., Anguera, M.T. y López, J. (2000). Diseños de evaluación de programas: bases metodológicas. *Psicothema*, 12 (Supl. 2), 127-131.
- Chernicharo, C. A. L. (1997). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. volume 5, 10 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. Belo Horizonte.
- CIPAV. (1996). *Informe Actividades y Proyectos realizados entre 90- 95´*. Bogota, Colombia.
- Clark, R.H., Speece, R.E. (1989). The pH tolerance of anaerobic digestion. *Advanced water pollution research*. Int. Conf. 5th, pp 1-27.
- Clausen, E. C., Gaddy, J.L. (1983). Methane production from agricultural residues by anaerobic digestion in batch and continuous culture. In: *Fuel Gas Systems*, Ed.D.Wise, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. pp 111-140.
- Colás, P. y Buendía, L. (1994). *Investigación educativa*. Sevilla: Alfar.
- Conde N, Giraldo S y Giraldo L 1987 *Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino*, *Livestock Research for Rural Development*.
- Cortina, J.M. (1993). What is coefficient alpha? An examination of theory and applications. *Journal of Applied Psychology*, 78, 98-104.
- Costa, D. F. (2006). *Generación de energía eléctrica a partir de biogás a partir de tratamiento de aguas residuales*. Tesis, USP, São Paulo.
- CPE, 2010, *Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia*.
- CPTS. 2008 *Diagnostico de produccion mas limpia: matadero municipal de La Paz*. Final inform. CPTS-03-07. La Paz.
- Craveiro, A.M. (1994). *Desempenho e estudos cinéticos de biodigestores híbridos com diferentes porcentagens de enchimento*. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. p. 246.
- Cronin J. y Taylor, S. (1992). Measuring Service Quality: A Reexamination and Extension. *Journal of Marketing*, 56, 55- 88.
- Cronin J. y Taylor, S. (1994). SERVPERF versus SERVQUAL: reconciling performance-based and perceptions-minus-expectations measurement of service quality. *Journal of Marketing*, 58, 125-131.

- Danés, R., Molina, V., Prats, I.L., Álamos, M., Boixadera, J., Torres, E. (1996). Manual de gestió dels purins i de la seva reutilització agrícola. Editado por la Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- Day, D. (1987). Management swine wastes. Asociación de Médicos Veterinarios Especialistas en Cerdos. Acapulco, Gro., México.
- De Baere, L.A., Devocht, M., Van Assche, P. and Verstraete, W. (1984). Influence of high NaCl and NH<sub>4</sub>Cl salt levels on methanogenic associations. *Wat. Res.*, 18(5), 543–548.
- Demuynck, M., Nyns, E.J., Palz, W. (1984). *Biogás Plants in Europe: practical Handbook*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands.
- Deublein D and Steinheuser A. (2008), *Biogas from Waste and Renewable Resources*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Devkota, G.P. (1986): Plástic Bag Biodigester; in *Biogás Newsletter*, Kathmandu (Nepal), No.23 (1986), pp.1-3.
- Dinsdale RM., et al. (2000). Two-stage anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digester. *Bioresource Technology*; 72, 159-168.
- Durán de la Fuente, Hernán. (1998). Gestión ambientalmente adecuada de residuos sólidos. Un enfoque de política integral. Cepal. Pagina electrónica <http://www.cepal.org/espanol/proyectos/qtz/duran1.html>. 45. EOI. 1996.
- Eden, C.P.; Eden, R.D. 1993. "The successful implementation of automatic borehole monitoring systems" *Proceedings of Envirotech'93*, Edinburgh, Gran Bretaña, (Obtenida de: UKPS Limited).
- Eden, R.D. 1990. "Utilisation of landfill gas" *Institute of Wastes Management*, Gran Bretaña, (Obtenida de: UKPS Limited, The Barclay Centre, University of Warwick Science Park, Coventry CV4 7EZ, Gran Bretaña).
- Eggeling, G., Mackensen, G., Sasse, L. and Stephan, B. (1985). *Installations Communautaires de Biogas - Manuql. - Germany* : Borda Breme,. Pp 5-17.
- EPA - LMOP. (1996). *Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook*. United States of America: Environmental Protection Agency. Recuperado el 16 de Abril de 2008, de <http://www.epa.gov/landfill/res/pdf/handbook.pdf>
- EPA (2008). *EPA -METHANE TO MARKETS. Landfill Methane Recovery and Use Opportunities*. Recuperado el 16 de Abril de 2008, de [http://www.methanetomarkets.org/resources/factsheets/landfill\\_eng.pdf](http://www.methanetomarkets.org/resources/factsheets/landfill_eng.pdf).
- España (2001). Sasse, L. (1986). Use of Digested slurry from Biogás Plants. *Biogás Forum* (27)-4.
- Esquerra, M. (1989). Practical experiences with low-cost biodigester. *Biogás Forum IV* (39): pp 4-9.
- Estévez, M., Arroyo, M. y González, C. (2004). *La investigación científica en la actividad física. Su metodología*. La Habana: Editorial Deportes.
- FAO-DOCREP (1990). *Análisis Energético de Sud América. 2do Informe Anual*.
- Fernández A. y Sánchez M. (2007). *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos*. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). [www.unido.org/fileadmin/import/72852\\_Gua\\_GestioIntegr\\_al\\_de\\_RSU.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/import/72852_Gua_GestioIntegr_al_de_RSU.pdf). Fecha de consulta: 18 de diciembre, 2009.

- Fernández J., Pérez M., Romero L. 2008. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource Technology* (artículo en prensa).
- Fernandez, M. (2007). Un país, dos realidades. *Energía y Pobreza, una relación olvidada*. Petropress. Número especial. Cochabamba, Bolivia.
- Fernández, Miguel; Eyzaguirre, Mónica, (2008). Uso de la biomasa por familias rurales en Bolivia: Diagnóstico y lineamientos para una propuesta. *ENERGÉTICA*.
- Fernández, Miguel; Rodríguez, Gustavo et ál. (2010). Diagnóstico del Sector Energético Boliviano y Lineamientos de Políticas. WWF.
- Ferrer I, Gamiz M, Almeida M, Ruiz A 2009 Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru), *Waste Management* 29(1): 168-173.
- Florencio, M.L. (1999). Sistemas de tratamiento anaeróbico. In: IV Curso de tratamiento biológico de residuos. Florianópolis / Santa Catarina CBAB, MCT/CNPq, CPGEQ/UFSC, CDB, p.24.
- Flotats, X., Bonmatí, A., Campos, E., Teira, M.R. (2000). El proceso de secado de purines en el marco de gestión integral de residuos ganaderos. *Residuos*. Vol. 53, pp 40.
- Gallert C and Winter J (2005). Bacterial Metabolism in Wastewater Treatment Systems. In: Jördening H J and Winter J (editors), pp. 1-48, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Gandolla, M.; Bressi, G.; Dugnani, L.; Baldi, M. (1992). Determinación de efectos de hundimiento en vertederos sanitarios municipales para residuos sólidos. 6° Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid,
- García, M. (1994). *Socioestadística. Introducción a la estadística en sociología*. Madrid: Alianza.
- García, M., Ibáñez, J. y Alvira F. (1990). *El análisis de la realidad social. Métodos y técnicas de investigación*. Madrid: Alianza
- Gaspar, R. M. B. L. (2003). *El uso de biodigestores en las propiedades pequeñas y medianas Rurales, con énfasis en el valor añadido: estudio de caso en la región de Toledo- PR*. Tesis, UFSC, Santa Catarina.
- Giugliano, M., M. Grosso, y L. Rigamonti. (2008). Energy recovery from municipal waste: A case study for a middle-sized Italian district. *Waste Management* 28, no. 1:39-50.
- Gómez Morales. (2006). *Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México*. Dr. Juan Cristóbal Mata Sandoval.
- González, P. (1986). Medir en las Ciencias Sociales. En M, García, J. Ibáñez y F. Alvira (Eds.). *El análisis de la realidad social. Métodos y técnicas de investigación*. (pp. 227-286) Madrid: Alianza.
- Gopalakrishnam, N.K. (1982): Novel Biogás Plant. in: *Biogás News Inaugural Issue*. Feb.1982. pp. 1-2.
- Gopalakrishnan N.K. (1984): *Biogás News*; in *Biogás News No.2*. June 1984 Lockstoke, (1983): Continuous Flow in Rubber Digester; in *Biogás Newsletter*. Kathmandu(NEPAL), No.18 (1983)
- Goswami, D. Yogi, y Frank Kreith. (2007). *Global Energy System*. In *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Ed. D. Yogi Kreith and Frank Goswami, 1560, United States of America: CRC Press.



- Gunnerson, C.G. and Stuckey D.C. (1986). Anaerobic Digestion-Principes and Practices for Biogás Systems. The world Bank Technical Paper #49, Washintong D.C., pp 93-100.
- Guzmán, J. (2000). Características de los Valles Mesotermicos de Bolivia. 1ra edic. II reunión de metodologías de investigación. Tarija Bolivia.
- Haandel, Van A. y Lettinga G. (1994) Tratamiento Anaeróbico de Esgotos. Editora EPGRAF. Campina Grande, Brasil www.uasb.gov
- Hayes, T.D., W.J. Jewell, D.S. Orto, K.J. Franconi, A.P. Genschener y D.F. Sherman. (1979). Anaerobic digestion of cattle manure. pp. 255-286. In: A. Stafford, B.I. Wheatley y D.E. Hughes. Anaerobic digestion. Applied Science Publishers. London, England.
- Haynes, S.N., Richard, D.C.S. y Kubany, E.S. (1995). Content validity in psychological assessment: A functional approach to concepts and methods. Psychological Assessment, 7, 238-247.
- Henning, R. (1986). Reduction of H<sub>2</sub>S in Biogás By Addition of Doses of Atmospheric oxigen. Biogás Forum. (25): pp 2-6.
- Henning, R. (1986). Reduction of H<sub>2</sub>S in Biogás By Addition of Doses of Atmospheric oxigen. Biogás Forum. (25): 2-6.
- Hernández M., A. (2001). Depuración y desinfección de aguas residuales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Quinta edición. España.
- Hernández, A. (2001). Un cuestionario para evaluar la calidad en programas de actividad física. Revista de Psicología del Deporte. 10 (2), 179-196.
- Hesse, P.R. (1983). Project Field Document No.23. Storage and Transport of Biogás. pp. 2 – 51.
- Hieu, L., Viet, L., Ogle, B. and Preston, T.R. (1994). Intensifying livestock and fuel production in Vietnam by making better use of local resources. Proc. National Seminar-workshop in sustainable Livestock Prod. On local feed resources. Agric. Pub. House Ho Chi Minh, pp 9-16.
- Hilbert, J. (2003). MAaual para la produccion de biogas. Instituto de ingenieria rural INTA Castelar, Buenos Aires.
- Hill D.T., Holmberg, R.D. (1988). Long chain volatile fatty acid relationship in anaerobic digestion of swine waste. Biological wastes. Vol. 23.
- Hill, D.T., Cobb, S.A., Bolte, J.P. (1987). Using Volatile fatty acid relationships to predict anaerobic digester failure. Transactions of the ASAE. Vol. 30 (2), pag. 496-50.
- Hobson, P.N. (1990). The treatment of agricultural wastes. En Anaerobic digestion: a waste treatment technology. Editado por Wheatley, A. Critical reports on applied chemistry. Vol. 31, pp 93-138. Elsevier applied science LTD.
- Hobson, P.N. (1990). The treatment of agricultural wastes. En Anaerobic digestion: a waste treatment technology. Editado por Wheatley, A. Critical reports on applied chemistry. Vol. 31, pp 93-138. Elsevier applied science LTD.
- Hontoria, E., Zamorano, M. (2000). Fundamentos del manejo de los Residuos Sólidos. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección señor 24. España.
- Hoyle, R. H. (1995). Structural equation modeling: Concepts, issues and applications. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Hu, L. y Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. Structural Equation Modeling, 6 (1), 1-55.

- Hwu, C. (1998). Biosorption of long-chain fatty acids in UASB treatment process. *Water Research*. 32 (5), pp 1571-1579.
- IDAE (Instituto de Alternativas Energéticas), (1998). Plan de fomento de energías renovables. Edición Castellano 95 Madrid.
- IIDEPROQ; CPTS; CNI; GEARENA; PCDSMA (2003) Aprovechamiento de residuos de mataderos y curtiembres, Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles – Instituto de Desarrollo de Procesos Químicos (UMSA) – Cámara Nacional de Industrias – Geología Ambiental y Recursos Naturales – Programa de Cooperación al Sector Medio Ambiente, Bolivia, 77 p.
- INE – ESMAP (1997). (Instituto Nacional de Estadística – Energy Sector Management Assistanse Program), Encuesta sobre Consumos de Energía en el área Rural, La Paz, Bolivia.
- INE (Instituto Nacional de Estadística), (1992). Censo nacional de población y vivienda.
- INE. (Instituto Nacional de Estadística), (1997) Datos estadísticos de Bolivia, Informe anual La Paz Bolivia.
- Instituto de Investigaciones en Procesos Químicos (IIDEPROQ), (2004). Universidad Mayor de San Andrés y Cámara Nacional de Industrial, Producción anaeróbica de biogás: Aprovechamiento de los residuos del proceso anaeróbico, La Paz, Bolivia.
- ITM (Instituto para el Tercer Mundo), (1998). Proyecto Energía y Banca Multilateral de Desarrollo. Madrid, España.
- Iza, J. (1995). Control del proceso anaerobio. I Curs d'enginyeria ambiental. Universitat de Lleida. Lleida, abril de 1995.
- Jagnow G, Dawid W. (1991). Biotecnología. Acirbia, Zaragoza.
- Johansson and P. Svenningsson (1993). Reducing CO<sub>2</sub> Emissions by Substituting Biomass for Fossil Fuels. *Energy* 20(11): 1097-1113. Gil, S. R. (2001) Información climatológica para la aplicación de energía de la biomasa.
- Jöreskog, K. G. & Sörbom, D. (1993). LISREL 8: Structural equation modeling with the SIMPLIS command language. Chicago: Scientific Software.
- Jöreskog, K. G. (1969). A general approach to confirmatory maximum likelihood factor análisis. *Psychometrika*, 34, 183-202.
- Kalyuzhnyi, S.; Veeken, A. and Hamelers, B. (2000). Two-particle model of anaerobic solid state fermentation. *Wat. Sci. Tech.*, v.41, n°3, p.43-50.
- Kalyuzhnyi, S.V. (1997). Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling. II description, verification and application of model. *Bioresource technology*. Vol 59, pp 249-258.
- Kashyap D. R., Dadhich K S and Sharma S. K. (2003). Biomethanation under psychrophilic conditions: a review, *Bioresource Technology* 87.
- Keenan, P. J.; IZA, J. and Switzenbaum, M. S. (1993). Inorganic solids development in a pilot-scale anaerobic reactor treating municipal solid waste landfill leachate. *Wat. Environ. Res.*, v.65, n°2, p.181-188.
- Kellner, C. (1990). Slurry, the difficult advantage. *Biogás Forum* (40): pp 4-7.
- Kenealy, W. And Zeikus, J.G (1981). *Appl. Bacteriol.* 146: pp 138-140.
- Khan S. (1996). Low cost Biodigesters. Programme for Research on Poverty Alleviation, Grameen Trust Report, Feb-1996.
- Khandelwal, K.C. (1990). Biogás technology development and implementation strategies – Indian experience. In: Reports of International Conference on Biogás

- Technology and Implementation strategies, Bremen Overseas Research and Development Association, Eschroborn, Germany, pp 66-92.
- Kim, D., y Kim, S. (1995). QUESC: an instrument for assessing the service quality of sport centers in Korea. *Journal of Sport Management*, 9(2).
- Kopiske, G. (1985). Methane permeability of Polymer Sheetings. *Biogás Forum* (21).
- Kossmann, W. U. (2000). *Biogas Digest* [GTZ- Germany]. Information and Advisory Service on Appropriate technology, 1:19-23.
- Kostenberg, D; Marchaim U. (1993). Solid waste from instant coffee industry as a substrate for anaerobic thermophilic digestion. *Water Science and Technology*, pp 27, 97-107
- Kristoferson, L.A. and Bokhaldres, V. (1991). *Renewable Energy Technologies: Their Applications in Developing Countries*. Intermediate Technology Publications, London, pp 112-117.
- Lau-Wong, M. (1986). Studies on the Dynamics of Biogás Processe – The Effect of Pressure on gas Production. *Biogás Forum*. (24): pp 6-10.
- Lay, J.J., Li, Y.Y., Noike, T. (1997). Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Research*, vol. 31 (10), pag. 1518-1524.
- Lema, J.M.; Mendez, R., Soto, M. (1997). Tratamiento de anaeróbios para o tratamentode efluentes líquidos. In: *Curso de digestão anaeróbia aplicada a resíduos sólidos e líquidos*. Recife.
- Lettinga, G. e Rinzema, A. (1985). Anaerobic treatment of sulfate containing wastewater. *Bioenvironmental System*.
- Lettinga, G.; Van Velsen, A.; Hobma, S.; Zeeuw, W.; Klapwijk, A. (1980). Use of upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*. 22: 699 – 734.
- Lockstoke, (1983): Continuous Flow in Rubber Digester; in *Biogás Newsletter*. Kathmandu (NEPAL), No.18.
- Loher, R.C. (1974). *Agricultura. Waste management*, Academic Press Inc., London and NY.
- López, Matilde. (1996). Digestión anaerobia de lodos y residuos sólidos. Alternativa para su mejoramiento. Tesis de maestría en ciencias del agua. CENIC., pp.5-10.
- Luque, T. (2000). *Técnicas de análisis de datos en investigación de mercados*. Madrid: Pirámide.
- Ly J, García M, Uicab L, Santos R, Sarmiento L. y Armendáriz I. (2004). Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados, Taller: Utilización de cerdos y aves.
- Madigan MT, Martinko JM, Parker J. Brock (2003) .*Biology of Microorganisms*. 10° ed. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Mandujano M., I. (1981). *Biogas: Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos*. Manual para el promotor de la tecnología. Organización Latinoamericana de Energía. Cuernavaca, Morelos, México.
- Manjunath, N.; Mehrotra, I.; Mather, R. (2000). Treatment of wastewater from slaughterhouse by DAF-UASB system. *Wat. Res.* 34(6): 1930-1936.
- Manu, B., Chaudhari, S. (2001). Anaerobic decolorisation of simulated textile wastewater containing azo dyes. *Bioresource Technology*.

- Manzano, V. G., Rojas, A. J. y Fernández, S. J. (1996). Manual para encuestadores. Barcelona.
- Marchain, U. (1992). Biogás Processes for Sustainable Development. Bull.FAO Agric. Services, Rome, 95. pp 165-193.
- Marshall, Alex. (2007). Growing bigger. Waste Management World. Recuperado el 15 de enero de 2010, de [http://www.waste-management-world.com/display\\_article/289598/123/CRTIS/none/](http://www.waste-management-world.com/display_article/289598/123/CRTIS/none/)
- Marticorena, B.; Attal, A.; Camacho, P.; Manem, J.; Hesnault, D.; Salmon, P. (1993). Prediction rules for biogas valorisation in municipal solid waste landfills. Wat. Sci. Tech., 27, 235-241.
- Martínez O. C., 1998. Club Español de Residuos. Nuevas tecnologías y su posición en la jerarquía de principios. II Foro Europeo sobre Residuos. Club Español de los Residuos, Madrid, España.
- Martínez, J.; Borzacconi, L.; Mallo, M.; Galisteo, M.; Viñas, M. (1995). Treatment of slaughterhouse wastewater. Wat. Sci. Tech. 32(12): 99 - 104.
- McCarty, P.G. (1964). Anaerobic waste treatment fundamentals. Part 1. Chemistry and microbiology. Public Works 95: pp 123-126.
- McCaskey, A.T. (1990). Microbiological and chemical pollution potential swine waste. pp. 12-32. In: Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdos. CINVESTAV. Guadalajara, Jal., México.
- McEvily, B. y Zaheer, A. (1999). Bridging Ties: A Source of Firm Heterogeneity in Competitive Capabilities. Strategic Management Journal, 20, 1133-1156.
- McKendry P. (2002). Energy production from biomass: conversion technologies. Bioresource Technology; 47 -54.
- Medina A. (1990), El Biol: Fuente de fitoestimulantes en el desarrollo agrícola, Proper-GTZ, Cochabamba, Bolivia.
- Mejía M., G. (1996). Digestión anaerobica. Folleto Técnico 1. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yuc., México. TERRA Volumen 19 Numero 4, 2001 362.
- Mendez, R., Soto, M. (2003). "Tratamiento de anaeróbios para o Tratamiento de efluentes líquidos". In: Curso de digestão anaeróbia aplicada a resíduos sólidos e líquidos. Recife, Brazil.
- Metcalf y Eddy, (1996). Ingeniería de las aguas Residuales. Editorial McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U.
- Midmore, P.; Whittaker J., Economics for sustainable rural systems. Ecological Economics, vol. 35, 2000, 173-189.
- Montes C. E. (2008). Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, UPM. Madrid.
- Moog, F. A, et al (1998) Promotion and utilization of polyethylene biodigester in smallhold farming systems in the Philippines. Paper de discusión en la conferencia de aplicaciones de sistemas bio integrados en cero emisiones. <http://www.ias.unu.edu/proceedings/icbs>.
- Morales, V., Hernández-Mendo, A., y Blanco, A. (2005). Evaluación de la calidad de los programas de Actividad Física. Psicothema, 17 (2), 311-317.
- Mulik, T. (1981). India: Visicitudes del biogás domestico. El Correo de la Unesco. Julio-1981: pp 33-34.

- Muñoz, N. V. (1987). El empleo del biogás en Camagüey, situación actual y perspectiva de desarrollo, Trabajo de Diploma, Facultad de Ingeniería Química-Farmacología, Universidad de Camagüey, Cuba.
- Nascimento, R.A. (1996). Desempenho de reator anaeróbico de manta de lodo utilizando efluentes líquidos de indústrias alimentícias. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.
- Nazir, M. (1991): Biogas Plants Construction Technology for Rural Areas; in: Bioresource Technology, Barkin(UK). Vol.35(1991)3. pp.283-289.
- Nilson I., et al. Environmental Biotechnology. 2003; Lund University, Sweden.
- Nogueira, C. E. C., Zurn, H. H. (2005). Diseño modelo optimizado para Sistemas de Energías Renovables en el medio rural. Ingeniería Técnica Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.2, p.341-348.
- none/Growing-bigger/
- Norberg A. (2002). Treatment of animal wastes in co-digestion biogas plants in Sweden. JTI, Sweden.
- Noyola A. (1997). Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Foro Internacional. Comparación de dos tecnologías en Aguas residuales domésticas para municipalidades. Universidad Nacional de Medellín, Colombia: pp 40.
- Noyola A. y Monroy O. (1994). Experiencias y expectativas del tratamiento de residuales porcinos en México. Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa. pp. 331- 340. In: III Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales". Montevideo, Uruguay.
- Ntoumanis, N. (2001). A self-determination approach to the understanding of motivation in physical education. British Journal of Educational Psychology, 71, 225-242.
- Nunnally, J.C. y Bernstein, I.J. (1995). Teoría psicométrica. Madrid: McGraw-Hill.
- OPS-OMS (1999) Manual para la elaboración de compost. Bases conceptuales y procedimientos, Organización Panamericana de la Salud - Organización Mundial de la Salud, Uruguay, 69 p.
- Ortenblad H 2000 The use of digested slurry within agriculture, AD: Making energy and solving modern waste problems, AD-Nett (editor), Ortenblad H., Herning municipal utilities, Denmark, 53-65.
- Pacey, J.G.; DeGier, J.P. (1986). "The factors influencing landfill gas production" Proc. Conf. "Energy from Landfill Gas", Solihull, Gran Bretaña.
- Pardo, A. y Ruiz, M.A. (2002). SPSS 11. Guía para el análisis de datos. Madrid: McGraw Hill.
- Pedraza G, Chará J, Conde N, Giraldo S y Giraldo L 2002 Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino, Livestock Research for Rural Development 14: 1.
- Pels J R, de Nie D S and Kiel H A J 2005 Utilization of Ashes from Biomass Combustion and Gasification, Proceedings of 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, France.
- Pereira Neto, J.T. (1992), Tratamento, reciclagem e impacto ambiental de dejetos agrícolas. In: Conferência sobre agricultura e meio ambiente núcleo de estudos e pesquisa em meio ambiente, 1992, Viçosa. Resumos. Viçosa: UFV. p.61-75.

- Pereira, R., O.; Antunes, R.M.; Maurizio S.; Koetz, P. R. (2004) "Filtroanaeróbico utilizado como pós-tratamiento de um reator anaeróbico de fluxo ascendente (uasb) para dejetos de suinocultura", *Revista Brasileira Agrociência*, v.10, n. 3, p. 339-346.
- Pohland, F.G. and Suidon, M.T. (1978). Prediction of pH stability in biological treatment systems. In: Rubin, A. J. (ed.), *Chemistry of Wastewater Technology*. Ann Arbor Science Lid., pp 441.
- Pohland, F.G.; Al-Yousfi, B. "Design and Operation of Landfills for Optimum Stabilization and Biogas Production" *Wat. Sci. Tech.*, 30, 117-124, 1995.
- Pol, L.H.; Rebac, S.; Kato, M.; Lier, J.C. and Lettinga, G. (1998). Anaerobic treatment of low-strength wastewater. In: *V Latin-American Workshop/Seminar WastewaterAnaerobic Treatment*. Vinã del Mar / Chile. p.27-30.
- Pomares, F. (1998). Los residuos orgánicos utilizables en la agricultura: origen, composición y características. 4º Curso de Ing. Ambiental. Lleida, España.
- Pompermayer R. S., Paula JR D.R.,(2000), Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos, *Anais 3. Encontro de Energia no Meio Rural Setembro*.
- Prats, I. (1996). *Manual de gestió dels purins i de la selva reutilitzación agrícola*. España: Generalitat de Catalunya, pp 40-41.
- Preston T. R. (1995) *Tropical Animal Feeding: A practical manual for research workers*. FAO Anim. Prod. And Health, Rome, 126: pp 155-166.
- PROPER – ULOCEP, (1996). *La energía en Bolivia, Informe para la III reunión Nacional de energía realizado en La Paz, Bolivia*.
- Rajeshwari, K.V.; Balakrishnan, M.; Kansal, A.; Lata, K. and Kishorc, V.V.N. (2000). "State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment". *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, v.4, p.135-156.
- Rao Gurijala, K.; Suflita, J.M. (1993). Environmental factors influencing methanogenesis from refuse in landfill samples. *Environ. Sci. Technol.*, 27, 1176 – 1181.
- Raven R.P.J.M., Gregersen K.H. 2004. Biogas plants in Denmark: successes and setbacks". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Artículo en prensa).
- Rita, F. (2002). *Desempenho de um reator UASB em escala piloto para o tratamento anaeróbico de líquidos percolados de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Rizzo, A. C. L., Leite, S. G. F. (2004). *Produção de sulfeto em reator do tipo UASB e sua potencial aplicação na remoção de metais pesados de efluentes*. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 102 p. (Série Tecnologia Ambiental, 32).
- Robin, S. (1990). *Bamboo Cement Biogás Holder*. *Biogás Forum IV* (43): pp 8-2.
- Rodríguez L. (1996). *Participatory rural development: Experiences in Binhdien and Xuanloc villages in Vietnam*. Proc. Development Workers' Course: Integrated Farming in Human Developmen, Tunc Landboskole, Greve.
- Rodríguez Lylian, Preston T. R., and Dolberg F. (1996). *Participatory Rural Development: "Experiences in Binh Dien and Xuan Loc Villages in Central Vietnam*. *Livestock Research for Rural Development* <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd8/2/lylian1t.htm>.
- Rodríguez, J. M<sup>a</sup>. (1994). *Las prácticas de enseñanza en la formación inicial de los profesores*. Tesis Doctoral. Sevilla: Universidad de Sevilla. Facultad de Ciencias de la Educación.

- Rojas, O. (1995). Factores Ambientales. En: Curso Taller Internacional sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Febrero13-Marzo17. Santiago de Cali. Universidad del Valle.
- Rosenwinkel K. and H. Meyer, 1999. Anaerobic treatment of slaughterhouse residues in municipal digesters. Institute of Sanitary Engineering and Waste Management, University of Hannover (ISAH) D-30167 Hannover Germany Water Science and Technology Vol 40 No 1 pp 101-111.
- Rufino M C, Rowe E C, Delve J R and Giller E K 2006 Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112: 261-282
- Ruiz, F. (2001). Análisis diferencial de los comportamientos, motivaciones y demanda de actividades físico-deportivas del alumnado almeriense de Enseñanza Secundaria Post Obligatoria y de la Universidad de Almería. Almería: Universidad de Almería. Servicio de Publicaciones.
- Sánchez, P. M. (2001). Digestión Anaerobia de Sólidos en Alta Concentración. Tesis Doctoral. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid España.
- Sanz, I., Redondo, J.C., Gutierrez, P. y Cuadrado, G. (2005). La satisfacción en los practicantes de spinning: Elaboración de una escala para su medición. *Motricidad. European Journal of Human Movement*, 13, 17-36.
- Sarwatt, S., Lekule, V. and Preston, T.R. (1995). Biodigesters as means for introducing appropriate technologies to poor farmers in Tanzania. *Electronic Proc. 2nd Intl. Conference on Increasing Animal Production with Local Resources, Zhanjiang, China*, pp 6.
- Sasse, L. (1989). Evaluation of Ecological Benefits. *Biogás Forum* (37): pp 3-9.
- Sasse. R. Hohlfield J. (1995). Biogas processes for sustainable development *Agricultural services bulletin* 90. ROMA. pp 25-36.
- Schmid, L.A. and Lipper, R.Z. (1969). Swine wastes, characterization and anaerobic digestion. *Proc. Conf. On Agric. Wastes Mgt., Cornell Univ., N.Y.*, pp.50-57.
- Schönhuth, M. y U. Kievlitz, (1994): Diagnóstico Rural Rápido, Diagnóstico Rural Participativo: métodos participativos de diagnóstico y planificación en la cooperación al desarrollo. Una introducción comentada. *Schriftenreihe der GTZ* n° 244. Eschborn. pp. 137.
- Schrank, S.G. (2000). Tratamento anaeróbio de águas residuárias da indústria têxtil. *Dissertação (mestrado)*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- SENASAG Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria, (Resolución Administrativa N° 012/2004). Trinidad 21 de Enero de 2005.
- Seoáñez, M. 1998. Medio Ambiente y Desarrollo. Colección Ingeniería del Medio ambiente. Mundi prensa. Madrid España.
- Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria, SENASAG. Resolución administrativa N° 088/2001 Trinidad, 11 de diciembre de 2006.
- Shah, Kanti L. (2000). *Basics of Solid and Hazardous Waste Management Technology*. United States of America: Prentice Hall.
- Siegrist, H., Renggli, D., Gujer, W. (1993). Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage sludge treatment. *Water Science and Technology*. Vol. 27.
- Siegrist, H., Renggli, D., Gujer, W. (1993). Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage sludge treatment. *Water Science and Technology*. Vol. 27 pp 25-36.

- Sierra, R. (2003). Técnicas de investigación social. Teoría y ejercicios. Madrid: Thomson Editores.
- Silva, F. C. M. (1996). Tratamento dos dejetos suínos utilizando lagoas de alta taxa de degradação em batelada. 115p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Silva, F. C. M. (1996). Tratamento dos dejetos suínos utilizando lagoas de alta taxa de degradação em batelada. 115p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Silva, F. M., Junior, J. L., Benincasa, M., Oliveira, E. (2005). La realización de una Biogás de Calentador de Agua. Ingeniería Agrícola Jaboticabal, v.25., N° 3.
- Six, W. and De Baere, L. (1992). "Dry anaerobic conversion of municipal solid waste by means of the DRANCO process". Wat. Sci. Tech., v.25, p. 295-300.
- Smith K R, Uma R, Kishore V V N, Lata K, Joshi V, Zhang J, Rasmussen R A and Khalil McCarty (1986). Greenhouses Gases from Small-scale Combustion Devices in Developing Countries-Phase IIa, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington DC.
- Soeurn, T. (1994). Low cost biodigesters in Cambodia. Proc. National Seminar-workshop in sustainable Livestock Prod. On local feed resources. Agric. Pub. House Ho Chi Minh, pp.109-112.
- Solans, R., 1998. Aprovechamiento de residuos orgánicos agropecuarios. Jornadas Internacionales sobre el Aprovechamiento Integral de la Materia Orgánica. Club Español de Residuos y Gobierno de Navarra. Pamplona.
- Solarte, A. (1995). Sustainable livestock systems based on local resources. CIPAVs experiences. Electronic Proc. 2nd Intl. Conference on Increasing Animal Production with Local Resources, Zhanjiang, China, pp 2.
- Soubes, M. (1994). Biotecnología de la digestión anaerobia. pp. 136-148. In: III Taller y Seminario Latinoamericano. Tratamiento de Aguas Residuales. Montevideo, Uruguay.
- Souza, M. E. (1986). Criteria for the Utilization, Design and Operation of UASB Reactors. Water Science and Technology, v. 18, n. 12, p.55-69.
- Speece, R.E. (1996). Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. Vanderbilt University. Published by Archae Press. United States of America.
- Stegman, R. Spendlin, H. (1986). "Research activities on enhancement of biochemical processes in sanitary landfills" Water poll. Res. J. Canada.
- Strevett, K. A., C. Evenson, y L. Wolf. (2002). Energy Conservation. In Handbook of Pollution Control and Waste Minimization, Ed. Abbas Ghassemi, 536, United States of America: Marcel Dekker.
- Suflita, J.; Gerba, C.; Ham, R.; Palmisano, A.; Rathje, W.; Robinson, J. "The World's Largest Landfill: A Multidisciplinary Investigation" Environmental, Science and Technology, 26, 1486 - 1495, 1992.
- Swiss Contac, (2010). Diagnóstico de residuos sólidos en Cochabamba.
- Tanaka, J.S. (1993). Multifaceted conceptions of fit in structural models. En K.A. Bollen y J.S. Long (Eds.), Testing Structural Equation Models (pp. 10-39). Thousand Oaks: Sage.
- Tchobanoglous, G. y E.D. Schoeder. (1985). Water quality: Characteristics, modeling, modification. Addison-Wesley. Torres Roldán, Francisco (Centro Mario Molina), y Emmanuel (Centro Mario Molina).



- Tecaltema, (2009). Manual de armado de biodigestores.ETC-ENERGETIA-Tecaltema. Bolivia.
- Tecnologías en Desarrollo, (2003). Informe anual de actividades periodo 2002-2003. Presentado al ITER-HAM Mizque.
- Tecnologías en desarrollo, (2007). Informe Bianual del proyecto Biodigestión en Bolivia, presentado a CICODE, ACAS, España.
- Teixeira, E. N. La adaptación de las estructuras existentes (muladar) en biodigestores. Tesis de Maestría. UNICAMP, Campinas, 1985.
- Tinajas, A. (1999). Algunos aspectos teóricos y prácticos en la elaboración de encuestas en el ámbito escolar. Apuntes. Educación Física y deportes, 56, 57.
- Tomasini, P. (1986). Biogas: captazione e recupero in discariche controllate per RSU. Not. Ecol., 4, 9 – 15.
- Turzo, E., Gutierrez., More, Ana., Ortega, M. y Sanz, A. (1984). Estudio del tiempo de retención (T.R.) y de sinergia de deyecciones de ganado, en el proceso de fermentación anaerobia. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias,. pp. 6-47.
- Uriarte, J.; Carreras, N.; Solano, M.L. (1992)."Management of Biogas Generated in Sanitary Landfills. Electrical Autogeneration in Artigas Sanitary Landfill" CIEMAT, Madrid.
- US-EPA, (1994). Joining forces on solid waste management: regionalization is working in rural and small communities. EPA Report 530-K-93-001 (44) Oct. 94. USA.
- Valor-Segura, I., Expósito, F. y Moya, M. (2009). Desarrollo y validación de la versión española de la Spouse-Specific Dependency Scale (SSDS). International Journal of Clinical and Health Psychology, 9, 479-500.
- Van Buren JCL, Frijns JAG, Lettinga G. (1995).Wastewater treatment and reuse in developing countries. Wageningen Agricultural University.
- Van Haandel, A.C., Lettinga, G. (1994). Tratamento anaeróbico de esgotos – um manual para regiões de clima quente. p.208. Editora Epgraf.
- Van Nes W. J. (2006). Asia hits the gas. Renewable Energy World 9 (1): 102-111.
- Vieira, S.M. M., Silva, J.W. (2002), Primeiro Inventário Brasileiro sobre Emissões Antrópicas de Gases do Efeito Estufa. Relatório de Referência. Emissão de Metano no Tratamento e na Disposição de Resíduos no Brasil. CETESB, 86 p.
- Vijayaraghavan, K., Shariff, A. R. M., Mohd, A. M. M. S. (2003).La conversión de los residuos energía urbana a través de la digestión anaeróbica. Revista de Agricultura Urbana, No 10.
- Villegas, L., C. A. (1990). Experiencia latinoamericana sobre manejo de Residuos sólidos. CEPIS, Lima, Perú.
- Virreira. C. (1997). La energía renovable. 1ra. Edición Méjico D.F.
- Wang, G. (1996), Depart of Food Science and Technology, University of Georgia, USA. Applied Environmental Microbiology, v.62, n.7, p.2567-2570.
- Weiland, P. (1995). One and Two step anaerobic digestion of solid agroindustrial residues. Water Science and Technology, pp 27,45-51
- Werner, U., Stohr, U. y Hees, N. (1989). Biogás Plants in Animal Husbandry. – Germany: Vieweg & Sonh ed. pp 53-61.
- Werner, U., Stohr, U. y Hees, N. 1989. Biogás Plants in Animal Husbandry. – Germany: Vieweg & Sonh ed. p.53-61.
- Yapu, Mario. Et. Al. (2006).Pautas metodologicas para investigaciones cualitativas y cuantitativas en ciencias sociales y Humanas, La Paz fundacion PIEB, 306pp.

- Yougfuy, Y., Yibo, Q., Yunxuan, G., Hui, Z., Yuansheng, X., Chenyong, X., Guoyuan, F., Jien, X., Taiming, Z. y Gan, L. (1989). The biogas technology in China. Agricultural Publishing House. Beijing. pp 54.
- Zaric, Z. (1981). Inventario mundial de la energía. El Correo de la Unesco.
- Zeeman, G., Wiegant, W.M., Koster-Treffers, M.E., Lettinga, G. (1985). The influence of total ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure. Agricultural Wastes. Vol. 14, pag.19-35.
- Zeithaml, V. A., Parasuraman, A. y Berry, L. L. (1992) Calidad total en la gestión de servicios. Madrid: Díaz de Santos.

# VII. ANEXOS



ANEXO VII.1. ENCUESTA DE CONSUMO DE ENERGÍA EN EL ÁREA RURAL

1. DATOS DEL HOGAR

1.1 Número de personas que viven en el hogar :	1.2 Número de hijos en edad escolar:	1.3 ¿Cuántos cuartos o habitaciones tiene su vivienda? :
1.4 ¿Tiene un ambiente exclusivo para cocinar?: SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>		1.6 ¿Cuál es la principal ocupación del jefe de familia? Marcar con x
1.5 Tenencia de Vivienda: Marcar con x Propia <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> Alquilada <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> Cedida <sub>3</sub> <input type="checkbox"/> Otra <sub>6</sub> <input type="checkbox"/> (especificar):		Agricultor <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> Minero <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> Obrero <sub>3</sub> <input type="checkbox"/> Transportista <sub>4</sub> <input type="checkbox"/> Comerciantes <sub>5</sub> <input type="checkbox"/> Otra <sub>6</sub> <input type="checkbox"/> (especificar):

2. CONSUMOS Y GASTOS DE ENERGIA ESTABLECIDOS:

2.1 Gastos en Iluminación		NOTA: UNICAMENTE PREGUNTAR POR LOS EQUIPOS, ACCESORIOS Y FUENTES ENERGÉTICAS QUE EL ENTREVISTADO AFIRMA UTILIZAR.											
a) Descripción Equipos Marcar con x	b) Fuente de Energía (Sólo celdas no pintadas)	c) Qué cantidad de cada uno de estos accesorios o equipos tiene?	d) ¿Cuántas horas al día utiliza de cada equipo para iluminación? (de qué hora a qué hora usa... por equipo) y frecuencia de uso (1)	e) Características (Sólo celdas no pintada; completar lo pedido)	f) ¿Cuánto tiempo le duran? (Velas: cada cuanto compra y cuantas) Escribir unidad (litro, etc); cantidad y marcar la unidad de tiempo (d,s,m)					g) ¿Dónde Compra cada una de los accesorios, combustibles y equipos que utiliza? Leer conceptos	h) Precio de Compra		
¿Que utiliza para iluminación?... (Leer opciones)					Concepto	Unidad	Cantidad de tiempo	d	s	m	a		
1. Focos	Gen.Diesel	Focos:	En caso de usar generadores o batería preguntar cuantas horas al día funcionan estos equipos.	Wattios: 60 W o 100W  En caso de ser generadores se debe copiar la placa del generador y del motor:	Focopro-medio	1 foco						Bs/Foco	
		Gen diesel											
		Gen.Gasolina	Gen gasolina			Diesel (2)							Bs/ unidad diesel
		Batería e inversor	Batería e inversor		También hacer una columna para la frecuencia de uso	Gasolina (2)							Bs/unidad gasolina
					Batería: preguntar cada cuanto tiempo carga							Costo por cargada	
2. Lámpara gas		Lámparas	(lámparas a gas)	Preguntar si la garrafa es exclusiva para la lámpara En caso que no preguntar cuántas horas usa en otra actividad (ya se sabe cuánto con lámparas)	Garrafa <sub>1</sub>	1 garrafa						Bs/Garrafa	
		Camisas			Camisa (gas) <sub>2</sub>	1 camisa						Bs/camisa	
		Garrafas											

3. Lámpara kerosén		Pantallas	Preguntar si se usa kerosén solo para las lámparas y si tiene otro uso, en caso de haber otro uso intentar definir el uso exclusivo en iluminación usando lámparas de kerosén	Kerosene (2)	Se debe definir												Bs/unidad de kerosén
		Lámparas															

4. Linternas			Preguntar por cada linterna	Preguntar Número de Pilas y Tamaño Pilas ** Grande, Medianas pequeñas por cada linterna	Pilas (preg. Por cada linterna)	El número de pilas por linterna											Bs/Unidad Marcar solo el tipo que usa	P e q. 1	Med. 2	Gra n3
5. Mechero	Alcohol <sub>1</sub>		Mecheros	Preguntar si ese combustible sólo se usa para mecheros o también otro tipo de usos, insistir en definir la cantidad utilizada sólo para iluminación con mecheros	Alcohol <sub>2</sub>	Kerosene(2)											Bs/unidad			
6. Velas			Preguntar cuantas horas usa al día y cuantas velas; y la frecuencia de uso		Velas	Importante preguntar cada cuanto tiempo compra velas y qué cantidad compra por vez											Bs/ Definir unidad			
7. Otros (Esp.)																	Bs/ Definir Unidad:			

(1) Ojo preguntar frecuencia (todos los días, días o meses específicos)

(2) Fuentes de energía marcadas con celeste, preguntar si estas se usan exclusivamente para iluminación en los equipos descritos o tienen otros usos, en caso de tener otros usos se debe insistir en calcular de alguna forma su uso solo para iluminación.

## 2.2 Gastos en Comunicación

a) ¿Cuáles de estos equipos tiene?... (Leer opciones)  Marcar con x	Que cantidad tiene de cada uno de estos equipos	b) Fuente de Energía			d) ¿Cuántas horas al día de utiliza? (de qué hora a qué hora usa... por equipo)	e) Características	f) ¿Cuánto tiempo le duran las fuentes de energía utilizada?						g) ¿Dónde Compra cada las fuentes de energía utilizadas? Leer conceptos	h) Precio de Compra					
		Marcar con x					Concepto	Unidad	Cantidad de tiempo	d	s	m			a				
1. Radio Receptor			Pilas	Gen Gasolina	Gen. diesel	Radio 1:	Si son pilas especificar número de pilas y tamaño de pilas por radio	Pilas (por radio)							Pilas:	Bs Unidad			
						Radio 2:										Peq <sub>1</sub>	M e d <sub>2</sub>	G r a n <sub>3</sub>	
						Radio 3:													
			Radio 1					Si son generadores a diesel o gasolina anotar los datos de la placa del motor y del generador	Gasolina								Gasolina	Bs / unidad	
			Radio 2						Diesel								Diesel	Bs / unidad	
				Preguntar por aceite o lubricantes en caso de que afirmen usar generador y motor	Lubricantes									Lubricantes	Bs/ unidad				
Radio 3				En caso de usar generadores a gasolina o diesel preguntar si estos combustibles solo los usa para generar energía para la radio o algún otro uso, si hay otro uso intentar identificar la cantidad usada para dar energía para la radio	Importante no preguntar nuevamente s el sitio de compra si es que afirmaron usar estas fuentes de energía para iluminación	Importante no preguntar nuevamente s el precio de compra si es que afirmaron usar estas fuentes de energía para iluminación													
2. Radio Transmisor		Batería:					Preguntar cada cuanto carga la batería						Sitio de carga	Costo por carga					
		Otra, especificar					Observaciones:									Especificar unidad			
3. Televisión		Generador a diesel			Definir cuantas horas al día usan la televisión	Definir TV blanco y Negro y a colores, y tamaño: pequeño, mediano, grande	Diesel (2)								No preguntar si ya se preguntó	Solo preguntar si antes no se preguntó por el uso de la gasolina			
		Generador a gasolina					Si son generadores a diesel o gasolina anotar los datos de la placa del motor y del generador	Gasolina (2)											
4. Otro Equipo Similar		Especificar Fuente de energía y equipo que genera energía:				Observaciones:									Especificar unidad				

Instrucciones: Preguntar las opciones del inciso (a), si no realiza ninguna parar al punto 3

2.3 Otros Gastos en Energía		NOTA: ÚNICAMENTE PREGUNTAR POR LOS EQUIPOS, ACCESORIOS Y FUENTES ENERGÉTICAS QUE EL ENTREVISTADO AFIRMA UTILIZAR					
a) ¿Cuáles de de estas actividades realiza?... (Leer opciones)  Marcar con x	b) Fuente de Energía y equipo que genera energía (1)	c) Duración del proceso? <i>Definir Unidad de Tiempo</i>	d) Cada cuanto tiempo realiza la actividad?  <i>Frecuencia</i>	e) Cantidad de Energía utilizada por proceso <i>Definir unidades</i>	f) Observaciones	g) ¿Dónde Compra cada las fuentes de energía utilizadas?	h) Precio de Compra
1. Bombeo							
2. Molienda							
3. Seca Aliment.							
4. Refrigeración							
5. Fab. de chicha							
6. Artesanía							
7. Otros (especif.)							

(1) SI el equipo que genera energía es un generador a diesel o gasolina es importante anotar las características del motor y del generador, las que se pueden leer en la placa de estos mismos equipos (anotar en observaciones)



### 3. INGRESOS DE LA UNIDAD FAMILIAR

#### 3.1 Actividades Agrícolas

3.1.1 Producción Agrícola	b) ¿A qué destina esos productos? 1 Consumo doméstico 2 Venta 3 Ambas	c) Qué cantidad de semilla sembró el año pasado (si no sabe la semilla que superficie sembró)	d) ¿Qué cantidad cosechó el año pasado?	Para los productos vendidos  e) ¿Qué cantidad de esta producción destinó a la venta?	e) Observaciones		
a) ¿Que cultivo siembra? Incluir Frutales		Unidad: 1= quintal; 2=arroba;3= Carga o pesada, 4= Otra (especificar);					
Marcar con x		Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
1. Papa							
2. Maíz							
3. Haba							
4. Hortalizas							
5. Frutales (Espf)							
6. Trigo							
7. Cebada							
8.							

3.1.2 Cuánto de ingreso monetario recibe la familia por la venta de los productos agrícolas (global): Bs. ....  
o en \$US. ....

3.1.3 ¿Cómo trabajan la tierra generalmente?: .....forma manual<sub>1</sub>; ..... yunta<sub>2</sub>; ..... tractor<sub>3</sub>

Si es yunta: La yunta es: ...propia; ...alquilada; ...prestada;

Si es tractor. El tractor es: ...propio; ...alquilado; ...prestado; ...otro (especificar)

3.1.4 ¿Tiene sistema de riego? .....SI<sub>1</sub>; .....NO<sub>2</sub> N° de sistemas: .....

3.1.5 Si tiene riego, cuánto de terreno riega? .....(especificar unidad de área)

3.1.6 ¿A quienes venden?

.....Comerciantes<sub>1</sub>; ..... Camioneros<sub>2</sub>; ..... Empresas/fábrica<sub>3</sub>; Otros<sub>4</sub>  
(especif.).....

3.1.7 ¿Dónde vende? Sitio de venta:

.....Llevan a la Feria; .....en su parcela; .....en su vivienda; .....otro  
(especificar).....

### 3.2 Actividades Pecuarias

3.2.1 Producción Animal		b) Estos animales se destinan a (leer opciones): Marcar con x	c) ¿Qué cantidad de animales vendió el año pasado?, d) ¿Y cuánto le pagaron?		e) ¿Qué otros tipo de productos (derivados) de animales vendió el año pasado? f) Y ¿Cuáles fueron sus ingresos aproximados?			g) Observaciones
Marcar con x Tipo	Cantidad		Cantidad	Ingresos Totales	Tipo de producto (especificar bien)	Cantidad	Ingresos Totales	
		1 Consumo doméstico 2 Venta 3 Ambas						
1. Ganado Vacuno								
2. Cabras								
3. Ovejas								
4. Caballos, Mulas y/o Burros								
5. Conejos, Cuyes								
6. Chanchos								
7. Pollos, gallinas								
8. Alpacas, llamas								
9.								
10.								

3.2.2 Cuánto de ingreso monetario recibe la familia por la venta de los animales o productos animales al año (global): Bs. .... \$us. ....

#### 3.3. Ingresos Adicionales

3.3.1. ¿Qué otro tipo de actividades económicas realizan los miembros de su familia?

Si la respuesta es ninguna pasar al inciso 3.4	Marcar con una X			Características de la Actividad Productiva			
	b) ¿Qué Tipo de Empresa o Productores? (leer opciones)			c) Frecuencia Actividad	d) Ingreso Monetario	e) Destino del Producto	f) Fuente de Energía
a) Actividad Económica	Productor Mayorista	Comunal o Grupo	Familiar				
Marcar con x							
1. Elaboración de Bebidas o comida							
2. Comercio							
3. Transporte							
4.							
5.							

#### 3.4 Migración

3.4.1. ¿Algún miembro de la familia ha trabajado en el último año fuera de la comunidad? .....Si<sub>1</sub>; .....No<sub>2</sub>

Si la respuesta es SI, pasar al cuadro 3.4.2

3.4.2 Ingresos por concepto de migración

a) Miembros de la Familia migrantes	b) ¿Dónde han migrado? A Otra / Otro: 1= comunidad;	c) ¿Con qué frecuencia salen de la Comunidad	d) ¿ Por cuanto Tiempo salen de la comunidad?	f) ¿La familia recibe dinero de los familiares migrantes?	f) Ingresos anuales recibidos por concepto de migración

Especificar parentesco	2=Provincia; 3= Depto; (Esp.) 4= País (Especf.)	para buscar trabajo? CADA....	Cantidad	m*	a*	SI	NO	Especif. Bs. o \$US.

\* m = mes; a= año

INTERES EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DOMÉSTICOS Y BIOGAS

4.1 Si tuviese energía (eléctrica / mecánica) en que la utilizaría prioritariamente?

1°	2°
3°	4°

4.2 ¿Conoce usted o ha oído hablar de los paneles solares?

SI  NO  Si la respuesta es SI ¿Por qué medio los conoció?.....  
Si la respuesta es NO dar una breve explicación

4.3 ¿Estaría usted interesado en instalar un sistema de paneles solares para la provisión de energía eléctrica en su vivienda?

SI  NO  Si la respuesta es NO ¿Por qué?.....

4.4 Si la respuesta es SI ¿Estaría usted dispuesto a invertir algún dinero para instalar paneles solares en su vivienda?

SI  NO  Si la respuesta es NO ¿Por qué?.....

Si la respuesta es NO pasar al punto 4.5 y luego al punto 4.11; si es SI pasar directamente al punto 4.5 hasta finalizar la encuesta.

4.5 Si NO tiene interés ¿qué le haría cambiar de opinión?       
 Crédito<sub>1</sub> Más información<sub>2</sub> Acceso gratuito<sub>3</sub> Nada<sub>4</sub> Otro<sub>5</sub>  
 (Especif.).....

Si la respuesta es CREDITO pasar al punto 4.6 en adelante

4.6 Si tiene interés ¿qué condiciones requiere para poder instalar un sistema de paneles solares?

Crédito<sub>1</sub>  Más información<sub>2</sub>  Acceso gratuito<sub>3</sub>  Otro<sub>4</sub>  
 (Especif.).....

4.7 ¿Estaría Ud. dispuesto a invertir entre \$US. 700-800 por la compra de un panel fotovoltaico y biogas.

4.8 ¿Podría Ud. a pagar entre \$US. 150 a 200 como cuota inicial para que le instalen el panel solar (explicar que con esa cuota le instalarían ya el panel?)

SI  NO  Si la respuesta es NO ¿Qué monto estaría dispuesto a pagar, como inversión inicial? .....\$US.

4.9 Si accediera a un crédito para la instalación de un sistema de paneles solares ¿Usted Preferiría pagar el crédito? (leer opciones)

Anualmente<sub>1</sub>   Semestralmente<sub>2</sub>   Trimestralmente<sub>3</sub>   Mensualmente<sub>4</sub>  
4.10 ¿Estaría dispuesto a formar parte de un grupo de personas en su comunidad para garantizarse ese crédito?  
Si<sub>1</sub>   No<sub>2</sub>; Si la respuesta es NO ¿Por qué?.....

4.11 ¿Qué opción preferiría?: (leer opciones)  
Ser dueño del panel y pagar el crédito   Que una empresa sea dueña del panel y le cobre el servicio de energía mensualmente

4.12 Sabe Ud. cuanto pagan por servicio de energía eléctrica comunidades con acceso a la red convencional?  
Si No; si la respuesta es no; dan referencia (entre  
Si la respuesta es sí.....-cuánto?.....(comparar con referencia)

4.13 Estaría Ud. dispuesto a pagar una tarifa mensual equivalente a este monto por servicio de energía eléctrica  
Si ; NO. Si la respuesta es no ¿ porqué?

Comentarios: \_\_\_\_\_

5. OBSERVACIONES O COMENTARIOS GENERALES

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Oliver Campero

# BIOGÁS EN BOLIVIA: PROGRAMA “VIVIENDAS AUTOENERGÉTICAS”. UNA NUEVA FORMA DE VER EL FUTURO ENERGÉTICO – AMBIENTAL DEL PAÍS EN EL ÁREA RURAL

## RESUMEN

El Altiplano Boliviano y fundamentalmente la zona del Lago Titicaca ha sido y será contaminada por la falta de estrategias para el manejo de residuos, tanto humanos como animales. En ese sentido y para poder mitigar estos efectos negativos, se está logrando consolidar un proceso tecnológico que permitirá disminuir el problema ambiental de este tipo de contaminación en sectores aledaños al Lago. Es así que desde el 2006 se está diseminando el programa “Viviendas Autoenergéticas”, con una visión integradora de conceptos tecnológicos que permitan reducir las emisiones contaminantes, ya sea hacia la atmósfera ( $\text{CH}_4$ ) o los acuíferos superficiales o subterráneos (sólidos en suspensión). Este conjunto de acciones pasa por la implementación de tecnologías técnicas intermedias que permiten reducir drásticamente los residuos humanos y animales, con la implementación de biodigestores de bajo costo y letrinas/duchas ecológicas de descarga continua a los sistemas de biodigestión, de manera que se genera por un lado energía de biomasa (energía renovable) al obtener BIOGÁS, luego de este proceso, y por otro lado se obtiene un biofertilizante llamado BIOL, con un poder fertilizante mayor en 30% que cualquier químico utilizado en la agricultura.

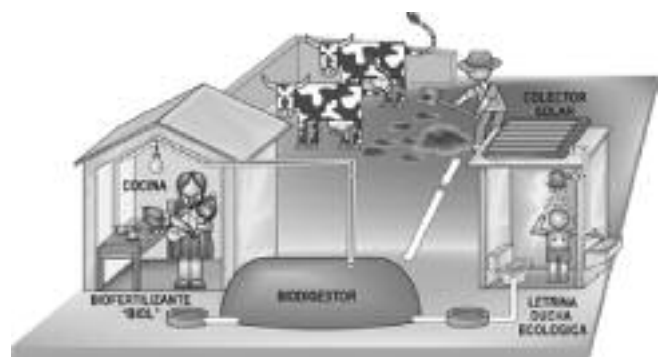
Esta técnica de bioenergía nunca fue tan difundida a nivel del altiplano y en las condiciones que ahora se está realizando en Bolivia (casi 4.000 msnm y temperaturas  $-10^\circ\text{C}$ ). Actualmente, se tienen cerca de 100 sistemas en comunidades de los Municipios de Achacachi y Tiawanaku, con la idea de lograr masificar este tipo de tecnologías en otras regiones ribereñas e islas dentro el Lago Titicaca.

## PROGRAMA “VIVIENDAS AUTOENERGÉTICAS” EN BOLIVIA

La inequidad al momento de la distribución de los energéticos en Bolivia es muy grande y no existe posibilidad de que en zonas como el área rural puedan generar procesos de mejora en su calidad de vida, pues el gobierno, tanto local como nacional, poco o nada apoyan a este sector de la población, siendo sus necesidades olvidadas o marginadas de los esquemas de desarrollo nacional.

No obstante, se ve a Bolivia como un país con abundantes recursos naturales, considerándose actualmente como uno de los mayores productores de gas de América del sur; sin embargo pese a ser un país rico, internamente la falta de fuentes energéticas en el área rural genera grandes problemas en el uso indiscriminado de los recursos naturales (leña y otros) para la cocción de alimentos, que en la zona rural derivan en una fuerte presión al medio ambiente. Al presente, no se cuenta con energía eléctrica por la dispersión de la población rural, que al no contar con servicio eléctrico de red u otra fuente alternativa, utilizan kerosén y otros combustibles altamente peligrosos (gasolina, diesel, velas y otros).

Gráfico. Viviendas Autoenergéticas con Biomasa



La poca disponibilidad e ineficiencia de las actuales fuentes de energía en el área rural para iluminación y cocción de alimentos, desemboca en que la población campesina incremente su voracidad al medio ambiente, sin conocer que existen otras posibilidades tecnológicas que pueden resultar en esquemas sostenibles de manejo de los recursos naturales y de los residuos humanos y animales; sin que por esto se cambie culturalmente el uso de los residuos (estiércol) para fines agrícolas. Estas costumbres implican una gran contaminación por emisiones de metano  $\text{CH}_4$ ,

provocando el gas de efecto invernadero GEI, afectando el calentamiento global y un continuo deterioro del medio ambiente a nivel mundial.

Los problemas que se están solucionando son:

- a) La alta contaminación ambiental local y la protección de la salud, sobre todo de la mujer y los niños al momento de cocinar alimentos, a causa de los gases tóxicos que emanan de la quema de estiércol seco y leña; así como la contaminación por la falta de estrategias para el manejo de residuos.
- b) El poco abastecimiento de fuentes energéticas alternativas para la vivienda familiar.
- c) Manejo adecuado de residuos y disminución del vertido de efluentes humanos y animales al medio ambiente, con los respectivos efectos negativos en la salud humana.
- d) Deterioro del medio ambiente por el uso irracional de los recursos naturales - en este caso fundamentalmente la leña, tola u otros energéticos de la zona - con el consecuente peligro de deforestación y por ende la pérdida de biodiversidad en la zona.
- e) Continuar con la extrema pobreza y sus factores colindantes; la calidad de vida y la presión al medio ambiente por la degradación y contaminación.
- f) Deterioro de la calidad de vida en la zona, debido fundamentalmente al sistema de recolección de recursos que tiende a ser muy exigente, en cuestión de tiempo y trabajo, primordialmente de las mujeres y los niños.
- g) La falta de fuentes energéticas económicas, de fácil obtención para la cocción de alimentos e iluminación.
- h) El alto costo económico y social con el uso de las actuales fuentes energéticas.
- i) La elevada contaminación del medio ambiente global por la emisión de gases de efecto invernadero como el Metano CH<sub>4</sub>.

La incorporación del concepto de energización rural por medio de la "Vivienda Autoenergética", en el diseño de los programas de desarrollo rural podría contribuir a la obtención de mejores resultados, por cuanto posibilitaría análisis integrados de los aspectos sociales, culturales, económicos, ambientales y energéticos. Un plan de energización del área rural se concibe como un apoyo directo a los esfuerzos locales por resolver los problemas que han limitado la energización rural, así como también para canalizar los esfuerzos locales y la cooperación internacional en forma sinérgica y complementaria.

### **COCINAS MEJORADAS CON EL USO DE BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE (LA PAZ, COCHABAMBA Y SANTA CRUZ)**

Los Biodigestores en Bolivia, así como todos los procesos y factores inmersos en su uso y aprovechamiento, derivan en una tecnología reciente que tuvo sus primeros avances en la década de los noventa, a cargo de la Universidad Mayor de San Simón - por medio del Proyecto Biogás - con asistencia técnica de la Cooperación Técnica Alemana (GTZ). Pese al enfoque y prioridades asumidas por este Proyecto para el desarrollo y aplicación de los biodigestores como alternativa de solución al problema energético y al manejo de residuos sólidos en poblaciones rurales pobres o marginales (donde la generación de energía de bajo costo para uso doméstico, a

partir de insumos disponibles en la zona, constituyó la base de las acciones), no se obtuvieron resultados significativos en lo que se refiere a la tecnología de instalación de los dispositivos en los que se llevan a cabo todos los procesos químicos de la biodigestión.

Los componentes y materiales utilizados por el Proyecto Biogás GTZ para la instalación de los sistemas incrementaron los costos a niveles inaccesibles para la población meta, situándose como una iniciativa eminentemente de investigación; pero sin resultados prácticos que demuestren la viabilidad integral de su aplicación en la solución de problemas concretos.



**Fotos 1 y 2. Mujeres aymaras cocinando con biogás.**

No se pueden negar los avances científicos conseguidos por este Proyecto, inherentes a la operación en sí de los biodigestores en Bolivia, estudio del uso y aplicación de subproductos, etc., generando una base de datos muy útil para mejorar el desarrollo de esta tecnología (ciertamente, la información generada por este Proyecto sirvió como referencia para la estructuración del esquema operativo del Proyecto Energías Renovables en Bolivia, diseñado por la ONG "Tecnologías en Desarrollo").

En resumen, ésta fue la única experiencia importante a nivel nacional en el uso de los biodigestores; pero sin éxito concreto en su aplicación a nivel de la problemática social. Posteriormente, a partir del año 2001 Tecnologías en Desarrollo pone en marcha una iniciativa piloto, consistente en la implementación de biodigestores bajo la modalidad de promoción de energías renovables y manejo integral de los residuos sólidos, enfocada a zonas rurales con algún tipo de limitación o deficiencia que afecta uno o varios de los factores relacionados con la calidad de vida.

Se debe mencionar que actualmente se tienen conversaciones con la Cooperación Alemana y otras instituciones internacionales para retomar las investigaciones en el tema; pero con un enfoque más práctico en base a las experiencias obtenidas por la GTZ y los esquemas que Tecnologías en Desarrollo está llevando a cabo. En ese sentido, se pretende una mayor difusión de la tecnología de biodigestión que nuestra institución maneja, como el Programa de "Viviendas Autoenergéticas".

### **¿QUÉ ES UN BIODIGESTOR?**

Biodigestor se denomina al dispositivo en el que se llevan a cabo los procesos de transformación de la materia orgánica para la obtención de biogás, constituyéndose en el

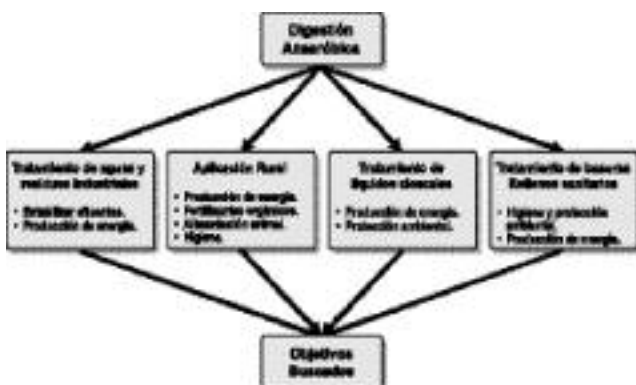
componente principal y más importante del sistema. Un biodigestor de desechos orgánicos es - en su forma más simple - un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos animales y humanos, desechos vegetales, etc. No se incluyen cítricos ya que acidifican) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.



Foto 3. Cocina a biogás.

El fenómeno de biodigestión ocurre porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaerobios presentes en el material fecal, que al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases llamada biogás - con alto contenido de metano ( $CH_4$ ) - sumamente eficiente si se emplea como combustible. El resultado de este proceso genera residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas.

El biodigestor es un sistema sencillo que se implementa con materiales económicos, los cuales se están introduciendo en comunidades rurales aisladas y en países subdesarrollados; para obtener el doble beneficio de conseguir solventar la problemática energética - ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos, tanto humanos como animales.



## LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES EN BOLIVIA

Este Proyecto se desarrolló en comunidades campesinas de Bolivia, sirviendo como experiencia piloto para aplicar los biodigestores de polietileno tubular de bajo costo, fuera de ecoregiones tropicales a nivel internacional y significando el principio de difusión de esta tecnología apropiada en Bolivia. Tanto la aceptación y participación de los campesinos como la viabilidad de estos sistemas fuera del trópico, ha sido un éxito. Actualmente, se instalan sistemas de biodigestión anaerobia en el altiplano a 4.000 msnm y temperaturas por debajo de los 10°C, con óptimos resultados.



Foto 4. Mujeres observando las letrinas en la región.

Los biodigestores de polietileno tubular de bajo costo se constituyen en una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias de pequeña, mediana y gran magnitud. El Proyecto Implementación de Biodigestores y Letrinas en el Área Rural y Periurbana de Bolivia nace para disminuir la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos, tanto humanos como animales en comunidades rurales y periurbanas del Departamento de Cochabamba (Bolivia), a través del uso de energías renovables, en este caso la biomasa. El Proyecto completo plantea la instalación de letrinas/duchas ecológicas, arreglo de corrales del ganado y la instalación de biodigestores para la producción de gas en la cocción (biogás).

El Proyecto ha generado la instalación de cerca de 250 biodigestores de bajo costo, de manera pionera en Bolivia y en condiciones de valle, altiplano (4.000 msnm) y trópico. Dentro de este esquema de acción, las conclusiones de este Proyecto son satisfactorias y nos dan la posibilidad de poder extrapolar los resultados obtenidos de la difusión y réplica de esta tecnología. Hoy por hoy, se tienen instalados sistemas en diferentes ecoregiones.

## SITUACIÓN SIN LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA

Las condiciones de vida en la zona del área rural y periurbana que el Proyecto pretende afectar, es eminentemente muy deprimida, corriendo el peligro de:

- Continuar con la intoxicación de la población circundante, en especial las mujeres y niños en la zona del Proyecto, al realizar la cocción de alimentos, usando estiércol seco (altiplano) o leña, entre otros (trópico y valles), generando humos y gases tóxicos.
- Un mayor deterioro del medio ambiente, por el uso irracional de los recursos naturales, en este caso la poca leña existente en la zona, los pajonales, así como los efectos sociales y ambientales que ello conlleva.
- Aumentar la inequidad del sector rural, por la falta de servicios básicos (saneamiento básico y energía).
- Continuar con la extrema pobreza y sus factores colindantes en la calidad de vida.
- Peligro de deforestación y por ende la pérdida de biodiversidad en la zona.
- Deterioro de la calidad de vida en la zona, debido fundamentalmente al sistema de recolección de recursos que tiende a ser muy exigente en cuestión de tiempo y trabajo, fundamentalmente de las mujeres y niños.
- No gozar de fuentes energéticas económicas y de fácil obtención para la cocción de alimentos y en algunos casos de iluminación.
- Aumento de los costos erogados con el uso de las actuales fuentes energéticas.
- Alta contaminación al medio ambiente, generando GEI's a la atmósfera y su efecto en el calentamiento global; así como también la contaminación de acuíferos superficiales y subterráneos.

Se puede afirmar que sin la implementación del Proyecto, los aspectos anteriormente vistos - aquellos intangibles – como la salud, comodidad, seguridad y simplificación del trabajo se ven seriamente afectados y por tanto, la calidad de vida seguirá en detrimento.

Los beneficios directos de la tecnología de biodigestión anaerobia son:

- Producción energética económica, dando por resultado ahorros del efectivo.
- Mejora del sistema de cultivo reciclando el abono con biodigestores para producir el gas para cocinar y efluente para el biofertilizante.
- Una reducción de la carga de trabajo física, especialmente de las mujeres y los niños.
- Una reducción de la presión en los recursos naturales como leña y carbón vegetal, con mucha humedad en la zona.
- Todo esto haciendo uso de los residuos que causarían de otra manera la contaminación, especialmente en áreas urbanas.
- Coadyuvando a la salud de la población beneficiaria con la instalación de letrinas ecológicas conectadas a los sistemas de biodigestión.
- Mejorando la eficiencia energética de las cocinas tradicionales denominadas Q'onchas (en Valles) y Kiris (altiplano), respetando el tradicional uso de esta forma de cocinar, sobre todo en el área rural.

- La utilización de los biodigestores y letrinas conectadas en serie, además de permitir la producción de biogás, ofrece enormes ventajas para la transformación de desechos:
- Mejora la capacidad fertilizante del estiércol. Todos los nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio, así como los elementos menores son conservados en el efluente. En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo presente en el estiércol en forma de macromoléculas, es convertido a formas más simples como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), las cuales pueden ser aprovechadas directamente por la planta. Debe notarse que en los casos en que el estiércol es secado al medio ambiente, se pierde alrededor de un 50% del nitrógeno.
- El efluente es mucho menos oloroso, peligroso y contaminante que el afluente, siendo aún mucho más rentable económicamente.
- Control de patógenos. Aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo con factores tales como la temperatura y el tiempo de retención, se ha demostrado experimentalmente que alrededor del 85% de los patógenos no sobreviven el proceso de biodigestión.

## PRODUCCIÓN DE BIOFERTILIZANTES, PRODUCTO DE LA BIODIGESTIÓN ANAEROBIA

Tecnologías en Desarrollo está impulsando la utilización de biodigestores plásticos tubulares de flujo continuo para la generación de biogás a partir del estiércol de los animales de granja, principalmente porcinos y bovinos. Se han utilizado diferentes tamaños de biodigestores, divididos en dos grupos denominados familiar e industrial, respectivamente. La longitud de los biodigestores se establece de acuerdo con las necesidades de cada explotación pecuaria.



**Fotos 5 y 6. Transporte y entrega de material para fabricación de cocina a biogás.**

Los biodigestores están diseñados para ser de bajo costo, tanto en su instalación como en sus materiales y repuestos, ya que va dirigido a comunidades rurales que carecen de medios económicos. Son materiales que pueden ser encontrados en cualquier comercio especializado de las principales ciudades de Bolivia.

El polietileno tubular plástico y el material para el transporte se puede encontrar localmente, de manera que se puede contar con una ventaja comparativa sobre la construcción de biodigestores de bajo costo con materiales extranjeros. El material que necesitamos para la conducción del gas, así como los tubos plásticos de entrada y salida del biodigestor



son materiales corrientes en la construcción, razón por la cual son accesibles de conseguir en Cochabamba, tanto en el área urbana como rural.

### Letrinas - Duchas

Se pretende realizar construcciones simples en base a bloques de ladrillo y cemento, en el mejor de los casos, o de bloques de barro mejorado, en aquellos lugares donde no exista la posibilidad. También se cuenta con inodoros, puertas y tanques de acumulación de agua, donde los desechos humanos generados en el sistema serán tratados en el sistema de biodigestión.

### Colectores solares

Se está investigando, a la vez que ya se ha logrado generar un equipo que permite calentar el agua para la ducha a 60°C, permitiendo con esta tecnología dotar de agua caliente para la ducha en sectores donde no existe este beneficio, y contando con un sistema altamente eficiente, así como económicamente bajo, de tal manera que se cuenta con un colector solar especialmente para el altiplano, el cual logra mantener el agua caliente durante el día a temperaturas bajas, pudiendo los beneficiarios bañarse a partir del medio día, hora en la cual ya se tiene el calor acumulado para dicha actividad.

El diseño es simple y con el Proyecto se plantea poner en práctica el uso esta tecnología en viviendas, las cuales se denominarán "Viviendas Rurales Autoenergéticas", pues contarán con el sistema de biodigestión, letrina-ducha y un sistema termogenerador (colector solar). Esta vivienda será autosuficiente y autoeficiente porque abastecerá de energía para usos eléctricos y cocción de alimentos.

Nuestro trabajo está enmarcado en la difusión, investigación y mejoramiento de tecnologías apropiadas, caracterizadas por criterios como su pequeña escala, por el uso máximo de materiales locales y de fuentes de energías descentralizadas y renovables, por su facilidad de manejo y mantenimiento, o por requerir una baja inversión de capital.

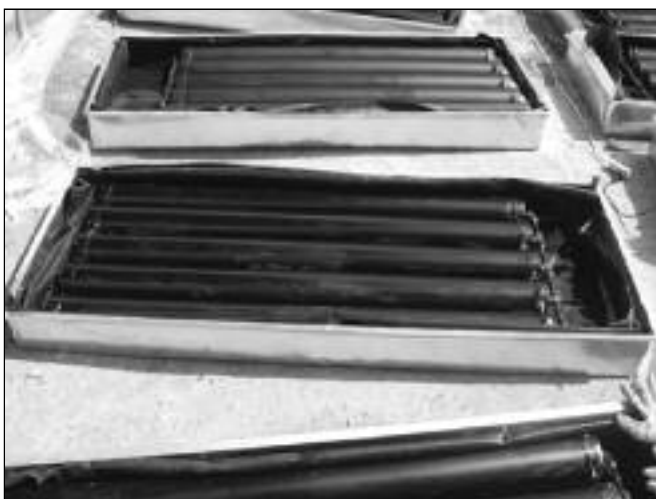


Foto 7. Colector solar en el Altiplano.

Desde esta perspectiva, las tecnologías aplicadas al desarrollo rural desde nuestra institución son ambientalmente sanas, socialmente justas, económicamente viables y culturalmente aceptables. Es en ese sentido, que actualmente Tecnologías en Desarrollo está trabajando en el uso de la biomasa como fuente energética, a través de sistemas de biodigestión anaerobia de bajo costo.

La base de trabajo inicial ha constituido el tema del desarrollo rural/urbano y el enfoque se ha basado en la temática ambiental - energética, considerando que la energía se constituye en un elemento clave para lograr el desarrollo sostenible de todos los sectores. Tecnologías en Desarrollo, desde una perspectiva amplia, solidaria y activa, busca promover un mayor uso racional de la energía y el medio ambiente en Bolivia, a través de la diversificación de fuentes de suministro y su aprovechamiento eficiente, contribuyendo de esta manera a la conservación ambiental y al uso de tecnologías apropiadas.

La institución, principalmente, presta asistencia técnica que posibilita a los grupos meta mejorar sus condiciones de vida iniciales y satisfacer sus necesidades básicas, incrementar el nivel de vida, así como apoyar la producción, promoviendo la difusión de tecnologías apropiadas en calidad y eficiencia.

El grupo meta de Tecnologías en Desarrollo, lo constituyen:

- Las familias campesinas con demandas insatisfechas en términos de servicios básicos, energía y condiciones inadecuadas para su productividad, además del manejo de residuos (medio ambiente).
- la población rural y urbano marginal que puede beneficiarse de tecnologías apropiadas, al hacer un uso racional de la misma y maximizar el uso eficiente de los recursos locales.

El trabajo con los grupos meta se coordina con los municipios y sindicatos, promoviendo una participación activa de estos niveles institucionales y buscando que en el desarrollo de los diferentes proyectos se guarde coherencia con las políticas de desarrollo nacionales, regionales y municipales.

### REPLICABILIDAD DEL PROGRAMA EN BOLIVIA

Como se indicó anteriormente, el Proyecto ha generado la instalación de biodigestores de bajo costo con tecnología intermedia. El uso de nuevas tecnologías que logren mejorar la calidad de vida de la población rural ha sido siempre el fin de casi todas las instituciones de desarrollo. Hoy por hoy, nosotros podemos afirmar que es hora que logremos la aplicación de nuestra tecnología (biodigestores y letrinas-duchas), adaptada a Bolivia y que sea para toda la nación. Es así que nos complace difundir este esfuerzo logrado por Tecnologías en Desarrollo en las tres ecorregiones características de Bolivia: altiplano (4.000 msnm), valles (2.500 msnm) y trópico (500 msnm).

El Proyecto plantea el manejo adecuado de los residuos humanos y animales, por medio de acciones sostenibles y acordes al equilibrio ecológico, mejorando la calidad de vida de la población en la zona del Proyecto. Los biodigestores contribuirán de manera considerable a mejorar las explotaciones en pequeña escala, facilitando el control de la

contaminación y añadiendo al mismo tiempo el valor agregado a la excreta del ganado y humano, mediante la producción de biogás y la mejora del valor como nutriente del efluente utilizado como fertilizante. El biodigestor de película tubular de polietileno despierta atractivo entre la población rural debido al bajo costo de la instalación y la producción de gas. Se puede aplicar en zonas tanto rurales como urbanas.

El éxito logrado hasta el momento en la adopción de esta tecnología y los resultados conseguidos que dependen de factores como el lugar (disponibilidad de combustible tradicional - estiércol), así como la manera de introducir y modificar la tecnología con el objetivo de adaptarla a las condiciones locales. La tecnología se ha probado suficientemente para justificar su introducción en gran escala en Bolivia. La decidida participación de los agricultores en los proyectos anteriores nos muestra la replicabilidad para que esta tecnología pueda seguir evolucionando y mejorando. Dentro las ecorregiones que el Proyecto pretende alcanzar, las comunidades bolivianas a las que se quiere llegar están

catalogadas de extrema pobreza, llegando a un margen de pobreza promedio de 90% (censo nacional, 2002) y no cuentan con servicios básicos, además de que los sistemas de energía son precarios.

Para mayor información sobre este artículo, contactarse con:

**Ing. MSc. Oliver Campero Rivero.**  
**Director Ejecutivo Tecnologías en Desarrollo.**

Av. Oquendo Edif. Santa María piso 4.  
Casilla: 3094  
Tel/Fax: 591-4-4298635 / 70721659

E-mails: [tecnologiasendesarrollo.org](mailto:tecnologiasendesarrollo.org)  
[info@tecnologiasdesarrollo.org](mailto:info@tecnologiasdesarrollo.org)  
[tecnologiasdesarrollo@lycos.com](mailto:tecnologiasdesarrollo@lycos.com)  
[olivercampero@gmail.com](mailto:olivercampero@gmail.com)

Cochabamba – Bolivia.

Oliver Campero

## EL BIOGÁS COMO MEDIDA DE CONTROL DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) Y EL CAMBIO CLIMÁTICO: UNA EXPERIENCIA EXITOSA EN BOLIVIA

### 1. ANTECEDENTES

En el mundo desde la Cumbre de Río en 1992, donde se hizo un llamado para promover acciones hacia la reducción de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), mejorar la capacidad de adaptación al Cambio Climático y reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas, así como la subsistencia humana, ha surgido la necesidad de llevar adelante acciones que permitan mejorar la capacidad de los países de responder positiva y eficientemente al Cambio Climático.

Dentro de este marco, a nivel nacional, el Programa Nacional de Cambios Climáticos (PNCC) planifica sus acciones para los próximos 5 años y considera el desarrollo como uno de los componentes de su estructura, de acciones operativas con programas, proyectos y actividades, de tal manera que se orienten sus esfuerzos en forma coordinada para lograr mejorar la capacidad adaptativa nacional, en función de su vulnerabilidad diagnosticada y promover acciones de mitigación de Gases de Efecto Invernadero, como una forma responsable de responder a la comunidad internacional.



Foto 1. Bidigestor en funcionamiento.

TECNOLOGÍAS EN DESARROLLO, institución que trabaja en el tema de Bioenergía desde el año 2000, ha generado la instalación de Biodigestores de bajo costo con tecnología intermedia, de manera pionera en Bolivia y en condiciones de valle (2.000 msnm), altiplano (4.000 msnm) y trópico (500 msnm). Es en este sentido que, a través de una convocatoria realizada por el PNCC, se logró un proyecto piloto que brinda la posibilidad de poder extrapolar los resultados obtenidos de la difusión y replicar esta tecnología de biogás para comunidades rurales, instalando sistemas de biodigestión anaerobia que generan energía limpia, renovable y de bajo costo, impulsando también el control de los GEI, que son responsables del calentamiento global, como por ejemplo el Metano (CH<sub>4</sub>), el cual es considerado más peligroso y 23 veces más contaminante que el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

La implementación de tecnologías apropiadas, caracterizadas por criterios tales como su adaptabilidad por el uso máximo de materiales locales (materiales comprados localmente) y las fuentes de energía que genera, las cuales son descentralizadas y renovables, así como el manejo - que por su facilidad de uso y mantenimiento - hacen de ésta una tecnología aplicable y replicable; requiriendo además una baja inversión de capital. Desde esta perspectiva, esta tecnología aplicada al desarrollo rural de zonas periurbanas de Bolivia, será: ambientalmente sana (disminuye la contaminación, sobre todo de Metano (CH<sub>4</sub>), socialmente justa (mejora la calidad de vida), económicamente viable (el costo de inversión no es alto) y culturalmente aceptable. Por todo lo expuesto anteriormente, es importante generar un proceso de difusión más amplia para que esta iniciativa pueda ser conocida a nivel de toda Bolivia.

**OPERADORES TÉCNICOS EN BIOGÁS**



Dir.: Edif. Santa María (Av. Oquendo entre Venezuela y F. Blanco) 4to. Piso Of. 4  
Casilla 3094 Tel.: (591-4) 4531103  
Fax: (591-4) 4298635 Cel. (591) 70721659

Sitio web.: [www.tecaltema.org](http://www.tecaltema.org)  
E-mail: [tecaltema@gmail.com](mailto:tecaltema@gmail.com) / [oliver.campero@gmail.com](mailto:oliver.campero@gmail.com)  
Cochabamba - Bolivia

## 2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, no hay en el país un programa sobre la adecuada utilización de residuos de la explotación ganadera, siendo que se cuenta con un potencial ya en crecimiento exponencial de la cantidad de productores lecheros y, sobre todo, de las cabezas de ganado lechero que existen en las diferentes cuencas lecheras, o explotaciones agropecuarias como las de porcinos, mataderos y demás fuentes de Metano. De esta manera, el proyecto plantea la concretización de un programa amplio para el manejo adecuado de residuos de explotaciones agropecuarias, mediante la instalación y posterior uso de sistemas de biodigestión anaerobia de bajo costo, tecnología que ya ha sido probada y validada por nuestra institución, tras 7 años de intenso trabajo a nivel investigativo y de práctica. Al presente, se tiene un total de 500 sistemas instalados en diferentes regiones de Cochabamba, La Paz y el Trópico.

De acuerdo con el IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático), una duplicación de los gases de invernadero incrementarían la temperatura terrestre entre 1 y 3.5°C. Aunque no parezca mucho, es equivalente a volver a la última glaciación; pero en la dirección inversa. Por otro lado, el aumento de temperatura sería el más rápido en los últimos 100.000 años, haciendo muy difícil que los ecosistemas del mundo se adapten. El principal cambio a la fecha ha sido en la atmósfera, es decir hemos cambiado y continuamos cambiando, el balance de gases que forman la atmósfera. Esto es especialmente notorio en gases invernadero claves como el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>) y Oxido Nitroso (N<sub>2</sub>O). Estos gases naturales son menos de una décima de un 1% del total de gases de la atmósfera; sin embargo son vitales, pues actúan como una "frazada" alrededor de la Tierra. Sin esta capa, la temperatura mundial sería 30°C más baja.

El gas denominado Metano, en un análisis comparativo del año 1750 era de una concentración del orden de 0,8 ppmv; ya para el año 1992 la concentración era de 1,72 ppmv y para el 2002 se incrementó a 2,4 ppmv, con una fuerza irradiativa de 0,5 (W/m<sup>2</sup>), convirtiéndose así en una amenaza para la población mundial y desde luego para Bolivia.



Foto 2. Reservorio de Biogás.

El Protocolo de Kyoto, junto con autorizar la compra y venta de derechos de emisión entre países desarrollados, autoriza lo que se llama mecanismos de desarrollo limpio. Esto

significa básicamente que naciones industrializadas pueden invertir en tecnologías de desarrollo limpio en países en vías de desarrollo y obtener así créditos de emisiones adicionales que serían un potencial del proyecto para que con los pasos ya iniciados en este sentido, más un programa de captura de Metano, se pueda ingresar a un mercado de este tipo en Bolivia.

Los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) tienen dos ventajas. Por un lado, contribuyen a que los países del tercer mundo se desarrollen usando tecnologías más limpias; y por el otro, les permiten a compañías de naciones industrializadas optar por desarrollar sus proyectos en países en desarrollo, lo que les abarata mucho los costos. A cambio de su inversión, las compañías de las naciones desarrolladas reciben bonos de carbono que les permiten emitir más en su país de origen, con lo cual Bolivia contaría ya con un programa efectivo en la materia.

## 3. PROYECTO DE MITIGACIÓN DEL EFECTO DE GAS METANO EN BOLIVIA

El proyecto, impulsado y ejecutado por Tecnologías en Desarrollo, se plantea en las tres principales capitales de Bolivia, vale decir La Paz, Cochabamba y Santa Cruz, fundamentalmente en zonas rurales agrícolas o pecuarias, llamadas cuencas lecheras de estos Departamentos y sectores de explotación pecuaria de diferente índole (porcinos y otros), fundamentalmente en las zonas de: Cochabamba (Cuenca lechera y las alturas de las comunidades de Tiquipaya y Tiraque); La Paz (Cuenca Lechera Achacachi y cercanías) y Santa Cruz (Cuenca Lechera Torno).

En La Paz, zona de altiplano, cercanías al lago Titicaca (Provincia Omasuyus), gente de estrato social muy deprimido económicamente y que usa como fuente de energía para la cocción de alimentos el estiércol seco en bloques de 40x40 cm., con excesiva presión al medio natural, debido el uso indiscriminado de la Tola y otras especies nativas, aunado al uso del estiércol seco como fuente de contaminación, tanto atmosférica como humana, además del inadecuado manejo de residuos que contribuyen a la acumulación de GEI. La cantidad de productores de leche en la zona es de aproximadamente 1.000 productores de leche (600 aproximadamente entre afiliados y no afiliados a las diferentes asociaciones de leche de la región).

Cochabamba, ciudad en la que se realizará este proyecto y que cuenta con recursos naturales típicos de la eco - región como fuente de energía: leña, arbustos y demás fuentes energéticas de biomasa que la gente usa en el proceso de cocción de alimentos. El gran problema en la zona es la falta de procesos adecuados de manejo de residuos provenientes de la explotación pecuaria, con una excesiva carga animal y producto de esto la alta contaminación hídrica, atmosférica y sobre todo humana en la zona. Se tiene estimado que en esta zona existen alrededor de 3.000 productores de leche, con una cantidad de cabezas de ganado en promedio de 8.

En Santa Cruz - en el Municipio del Torno - que cuenta con una eco - región favorable de clima tropical y flora de las mismas características, se cuenta con al menos unos 500 productores de leche, los cuales no realizan un adecuado

manejo de los residuos ganaderos y contaminan el ambiente, así como los acuíferos, tanto subterráneos como superficiales. Otro inconveniente es la época de lluvias que no teniendo madera que quemar para el uso en sus cocinas, apelan a diferentes formas de secado de madera o a procesos como la acumulación de este combustible, depredando así los bosques aledaños en busca de leña. Dentro de este esquema, las estancias pueden clasificarse en grandes, medianas y pequeñas.



Foto 3. Combustión del Biogás.

En todos estos casos se produce un gas efecto de invernadero, que es CH<sub>4</sub>, el Metano producido principalmente a través de procesos anaeróbicos tales como la digestión animal y su deposición. Por ejemplo, con el CO<sub>2</sub>, sus concentraciones aumentan por acción antropogénica directa e indirecta, naturalmente a través de la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas, sobre todo en los sistemas digestivos de rumiantes. Antropogénicamente, con la quema de biomasa, quema de combustibles fósiles, basureros y el aumento de ganado como fuente de carne y producción lechera.



Foto 4. Cocina a Biogás.

El análisis realizado sobre las medidas de producción de gas Metano, los datos son tomados para 100 instalaciones de biogás (cantidad "sin Proyecto"), o la cifra que potencialmente podría ser usada o absorbida por el Proyecto de llevarse a efecto o a ejecutarse en su totalidad. Como se puede observar, son 299,2 m<sup>3</sup>/día de biogás y 179,52 m<sup>3</sup>//día de Metano CH<sub>4</sub>, que "sin Proyecto" son emitidas al medio ambiente y contaminan. Por otro lado se tiene planificado dentro del Proyecto, la

implementación de biodigestores con una capacidad de 15 m<sup>3</sup> útiles, que generarían 6 m<sup>3</sup>/día de biogás – por sistema de biodigestión, lo cual equivale a decir que 100 sistemas del Proyecto tendrían una capacidad de 600 m<sup>3</sup>/día de biogás.

Esta tecnología de manejo de residuos ganaderos, agroindustriales y otros, puede ser replicada a nivel de mataderos, granjas avícolas, ganaderas, industrias de alimentos, etc.; de manera que se pueda a su vez generar energía para uso interno de estas instalaciones, reduciendo así la contaminación de Gases de Efecto Invernadero GEI y con la posibilidad de encontrar un pago (bonos verdes) por los servicios ambientales a nivel internacional, al disminuir la emisión de GEI, mejorando la calidad del medio ambiente y encontrando una forma económica de minimizar malos olores, contaminación hídrica y una fuente de energía renovable.

Tabla 1. Línea Base y Proyección con Proyecto de 100 Sistemas de Biodigestores

Situación sin Proyecto	Situación con Proyecto
7360 Kg/día de estiércol y biomasa vertidos al medio ambiente cuya descomposición generaría: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 299,2 m<sup>3</sup>/día de gas, además de material energético de biomasa eliminado al ambiente.</li> <li>• 179,5 m<sup>3</sup>/día de Metano CH<sub>4</sub> emitido a la atmósfera.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad nominal de los 100 sistemas es 600 m<sup>3</sup>, se considera un factor de 60% para la generación biogás, por tanto se tiene una capacidad de producción de 360 m<sup>3</sup>/día de biogás, a partir de biomasa.</li> <li>• Captura de Metano y transformación en 216 m<sup>3</sup>/día de biogás.</li> <li>• Capacidad extra del sistema de biodigestión 6%.</li> </ul> <b>TOTAL de producción de los 100 sistemas de: 600 m<sup>3</sup> de biogás por día.</b>

#### 4. PREMIOS Y RECONOCIMIENTOS OTORGADOS A TECNOLOGÍAS EN DESARROLLO 2008

Tecnologías en Desarrollo, institución abocada al trabajo rural y periurbano en medio ambiente y energías renovables, ha obtenido el premio ENERGY GLOBE AWARD para Bolivia en la categoría nacional, por el Proyecto **"Eco Energy Housing Project in the Bolivian Area ("Viviendas Autoenergéticas")**, una nueva forma de ver el desarrollo rural en Bolivia", acción apoyada por la Embajada Británica, el PNCC (Programa Nacional de cambio Climático) y el CICODE de España, entre otros. Este premio, implementado por el Programa de Bioenergía, a través de reconocimientos a sistemas de biodigestión a una altura de 4.000 metros sobre el nivel del mar, ha sido entregado en una ceremonia especial en el Parlamento Europeo el 26 de mayo de 2008 en Bruselas, Bélgica. Para este efecto, el promotor y coordinador del proyecto Ing. Oliver Campero Rivero, profesional boliviano de amplia experiencia en el tema, fue invitado a recibir el mencionado galardón.

Simultáneamente, la Institución ganó el premio "Ex Aequo", al mejor trabajo de investigación de Residuos Sólidos Urbanos, que convocó la UNIA (Universidad Internacional de Andalucía), financiado por la RESUR (Empresa Pública de Residuos Sólidos de España) por su trabajo de investigación de tesis doctoral **"Valoración Integral de Residuos de aldeas rurales mediante Biodigestión en reactores Flexibles"**, siendo el principal motivo de concesión de este reconocimiento al Ing. Oliver Campero Rivero, la propuesta de una solución técnica e ingeniosa de un

tema actual y aplicable en zonas rurales poco desarrolladas, donde la falta de energía es una limitante para el desarrollo del área rural de Bolivia.

<http://www.pncc.gov.bo/esp/NOTICIAS/monitoreo/PANEL%20%20%20INICIATIVA%20DE%20MITIGACI%C3%93N%20AL%20CAMBIO%20CLIM%C3%81TICO.pdf>

<http://www.ruralcostarica.com/biogas-bolivia.asp>

<http://www.ruralcostarica.com/biogas-bolivia.asp>

Para mayor información sobre este artículo, comunicarse con:

**Ing. MSc. Oliver Campero Rivero**  
**Director Ejecutivo**

**TECNOLOGÍAS EN DESARROLLO**

Dirección: Av. Oquendo Edif. Santa Maria piso 4  
Casilla: 3094  
Página Web: [www.tecnologiasendesarrollo.org](http://www.tecnologiasendesarrollo.org)  
Email: [tecnologiasdesarrollo@lycos.com](mailto:tecnologiasdesarrollo@lycos.com)  
[oliver.campero@gmail.com](mailto:oliver.campero@gmail.com)  
Telf./fax: 591-4-4298635 / 4531103 / 70721659  
Cochabamba, Bolivia.

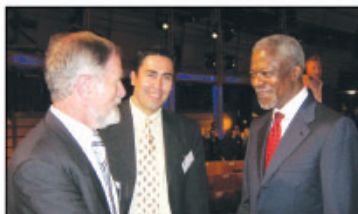


Foto 5. John Beckman, Oliver Campero y Kofi Annan.



Fotos 6. y 7. Ceremonia Energy Globe Awards 2008.

Asimismo, Tecnologías en Desarrollo ha sido distinguida con una mención al **"Desarrollo Limpio"**, así como por su ardua labor en mitigación de Gases de Efecto Invernadero, su trabajo con el PNCC y con la Embajada Británica en Bolivia, a cargo de la Institución internacional ECODES y su Programa CeroCO<sub>2</sub>.

Cabe recalcar que el esfuerzo desplegado en estos 7 años de labor continua con el tema de manejo de residuos y generación, sobre todo de energía renovable está siendo ahora reconocida en el ámbito internacional, siendo el mejor aliciente para continuar el trabajo esmerado que ha caracterizado a Tecnologías en Desarrollo durante estos años.

Actualmente, la institución y el Ing. Campero están en pos de generar una masiva difusión de los sistemas de biogás en Bolivia, así como de profundizar las investigaciones en este ámbito para lograr mayor reconocimiento del trabajo que se realiza en Bolivia a nivel mundial.

**5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / PÁGINAS WEB:**

<http://www.unia.es/comunicados-de-prensa/dos-trabajos-basados-en-zonas-rurales-ganan-el-premioal-mejor-trabajo-de-gestion-de-residuos.html>

[www.tecnologiasendesarrollo.org](http://www.tecnologiasendesarrollo.org)

[http://www.pncc.gov.bo/esp/NOTICIAS/monitoreo/WEB%20E%20uso%20del%20Biog%C3%A1s%20como%20medida%20de%20reducci%C3%B3n%20de%20emisiones%20de%20Gases%20de%20Efecto%20Invernadero%20\(GEI\)%20y%20mitigaci%C3%B3n%20al%20Cambio%20Clim%C3%A1tico.pdf](http://www.pncc.gov.bo/esp/NOTICIAS/monitoreo/WEB%20E%20uso%20del%20Biog%C3%A1s%20como%20medida%20de%20reducci%C3%B3n%20de%20emisiones%20de%20Gases%20de%20Efecto%20Invernadero%20(GEI)%20y%20mitigaci%C3%B3n%20al%20Cambio%20Clim%C3%A1tico.pdf)

**CALEFONES SOLARES**

**RA SOL**

Es Energía Solar para su Hogar



23

años de experiencia

**AGUA CALIENTE GRATIS DE DIA Y DE NOCHE  
NO SE DEJE ENGAÑAR CON OTRAS MARCAS**

**Atención al cliente: Km. 1 a Sacaba - Acera Norte**  
Teléf: 4533390 - 4716300 - 77434840  
E-mail: [calefones\\_rasol@hotmail.com](mailto:calefones_rasol@hotmail.com)

## **Biogás en Bolivia: Programa Viviendas Autoenergéticas**

Oliver Campero Rivero

Publicado en Revista Futuros No.18, 2007 Vol. V  
<http://www.revistafuturos.info>

### **Una nueva forma de ver el futuro energético-ambiental del país en el área rural**

---

El Altiplano Boliviano y fundamentalmente la zona del Lago Titicaca ha sido y será contaminado por la falta de estrategias de manejo de residuos tanto humanos como animales. En ese sentido y para poder mitigar estos efectos negativos, se está logrando consolidar un proceso tecnológico que permitirá disminuir el problema ambiental de este tipo de contaminación en sectores aledaños al lago. Es así que desde el 2006 se está diseminando el programa "Viviendas autoenergéticas", con una visión integradora de conceptos tecnológicos que permitan reducir las emisiones contaminantes al medio ya sean estas a la atmósfera (CH<sub>4</sub>) o los acuíferos superficiales o subterráneos (sólidos en suspensión).

Este conjunto de acciones, pasan por la implementación de tecnologías intermedias, técnicas que permiten reducir drásticamente los residuos humanos y animales, con la implementación de Biodigestores de bajo costo y Letrinas/duchas ecológicas de descarga continua a los sistemas de biodigestión, de manera que se genera por un lado energía de biomasa (energía renovable) al obtener BIOGAS luego de este proceso y por otro lado se obtiene un biofertilizante llamado BIOL, con un poder fertilizante mayor en 30% que cualquier químico utilizado en la agricultura.

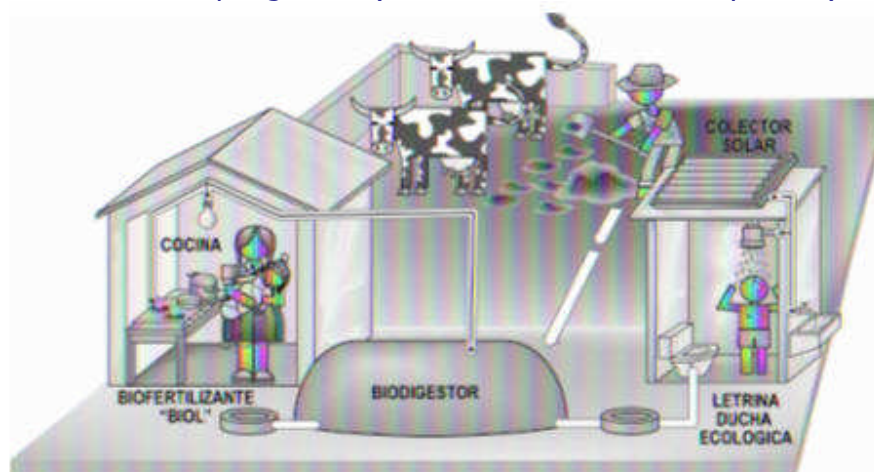
Esta técnica de bioenergía, nunca fue tan difundida a nivel de altiplano y en las condiciones que ahora se está realizando en Bolivia (casi 4000 msnm y temperaturas -10°C), actualmente se tiene cerca de 100 sistemas en comunidades de los Municipios de Achacachi y Tiawanaku, con la idea de lograr masificar este tipo de tecnologías en otras regiones ribereñas e islas dentro el Lago Titicaca.



Problemática Ambiental-energética, inadecuado manejo de residuos y fuentes de energía ineficiente.

### **El programa "Viviendas autoenergéticas" en Bolivia**

La inequidad al momento de la distribución de los energéticos en Bolivia es muy grande no existe posibilidad de que en zonas como del área rural puedan generar procesos de mejora en su calidad de vida, pues el gobierno tanto local como nacional poco o nada apoyan a este sector de la población, en esta temática, siendo sus necesidades olvidadas o marginadas de esquemas de desarrollo nacional, por esta razón se ve a Bolivia como un país con abundantes recursos naturales, actualmente uno de los mayores productores de gas de América del sur, sin embargo pese a ser ricos, internamente la falta de fuentes energéticas en el área rural genera grandes problemas tanto en el uso indiscriminado de los recursos naturales (leña y otros) para la cocción de alimentos que en la zona rural deriva en una fuerte presión al Medio Ambiente. En la actualidad no se cuenta con energía eléctrica por la dispersión de la población del área rural, que al no contar con este energético de red u otra fuente alternativa, utilizan kerosén y otros combustibles altamente peligrosos (Gasolina, diésel, velas y otros).





La poca disponibilidad e ineficiencia de las actuales fuentes de energía en el área rural, para la iluminación, la cocción de alimentos, desemboca en que la población campesina incrementa su voracidad al medio ambiente, sin conocer que existe otras posibilidades tecnológicas que pueden resultar en esquemas sostenibles de manejo de los recursos naturales, y de los residuos humanos y animales; sin que por esto se cambie culturalmente el uso de los residuos (estiércol) para fines agrícolas.

Estas costumbres implican una gran contaminación al medio ambiente, de emisiones de metano CH<sub>4</sub>, como gas de efecto invernadero GEI, de manera que afecte al calentamiento global y se continúe deteriorando el medio ambiente mundial.

Los problemas que se están solucionando son:

- a) La alta contaminación ambiental local y proteger la salud sobre todo de la mujer y los niños al cocinar alimentos, con los gases tóxicos que emanan de la quema de estiércol seco y leña; y la contaminación por la falta de estrategias de manejo de residuos.
- b) El poco abastecimiento de fuentes energéticas alternativas para la vivienda familiar.
- c) Manejo adecuado de residuos y disminución del vertido de efluentes humanos y animales al medio ambiente, con los respectivos efectos negativos en la salud humana.
- d) Deterioro del medio ambiente, por el uso irracional de los recursos naturales en este caso la leña, tola u otros energéticos de la zona fundamentalmente. Con el peligro de deforestación y por ende la pérdida de biodiversidad en la zona.
- e) Continuar con la extrema pobreza y sus factores colindantes; la calidad de vida y la presión al medio, por la degradación y contaminación.
- f) Deterioro de la calidad de vida en la zona, debido fundamentalmente al sistema de recolección de recursos que tiende a ser muy exigente, en cuestión de tiempo y trabajo fundamentalmente de las mujeres y niños principalmente.
- g) La falta de fuentes energéticas económicas, de fácil obtención para la cocción de alimentos e iluminación.
- h) El alto costo económico y social con el uso de las actuales fuentes energéticas.
- i) La alta contaminación de medio ambiente global por la emisión de gases de efecto invernadero como el Metano CH<sub>4</sub>.

La incorporación del concepto de energización rural por medio de la "Vivienda Autoenergética", en el diseño de los programas de desarrollo rural podría contribuir a la obtención de mejores resultados, por cuanto posibilitaría análisis integrados de los aspectos sociales, culturales, económicos, ambientales y energéticos. Un plan de energización del área rural se concibe como un apoyo directo a los esfuerzos locales por resolver los problemas que

han limitado la energización rural. Asimismo para canalizar los esfuerzos locales y la cooperación internacional en forma sinérgica y complementaria



Cocinas mejoradas con el uso de biogás como combustible ( La Paz, Cochabamba y Santa Cruz)

Los Biodigestores en Bolivia, así como todos los procesos y factores inmersos en su uso y aprovechamiento, derivan en una tecnología reciente que tuvo sus primeros avances en la década de los noventa a cargo de la Universidad Mayor de San Simón por medio del Proyecto Biogás con financiamiento de la Cooperación Alemana (GTZ). Pese al enfoque y prioridades asumidas por este proyecto (GTZ cooperación Alemana 1990-1995 Cbba, Bolivia) para el desarrollo y aplicación de los biodigestores como alternativa de solución al problema energético y de manejo de residuos sólidos, de poblaciones rurales pobres o marginales (donde la generación de energía de bajo costo para uso doméstico a partir de insumos disponibles en la zona constituyó la base de las acciones), no se lograron obtener resultados significativos en lo que se refiere a la tecnología de instalación de los dispositivos en los que se llevan a cabo todos los procesos químicos de la biodigestión.

Los componentes y materiales utilizados por el Proyecto Biogás GTZ para la instalación de los sistemas incrementaron los costos a niveles inaccesibles para la población meta, situándose como una iniciativa eminentemente de investigación pero sin resultados prácticos que demuestren la viabilidad integral de su aplicación en la solución de problemas concretos.

No se pueden negar los avances científicos conseguidos por este proyecto inherentes a la operación en si de los biodigestores en Bolivia, estudio del uso y aplicación de subproductos, etc., generando una base de datos muy útil para mejorar el desarrollo de esta tecnología (ciertamente, la información generada por este proyecto sirvió como referencia para la estructuración del esquema operativo del proyecto Energías Renovables en Bolivia, por nuestra institución).

En resumen, esta fue la única experiencia importante a nivel nacional, en el uso de los Biodigestores pero sin éxito concreto en su aplicación a nivel de la problemática social.

Posteriormente, a partir del año 2001 la ONG "Tecnologías en Desarrollo" pone en marcha una iniciativa piloto consistente en la implementación de biodigestores bajo la modalidad de promoción de energías renovables y manejo integral de los residuos sólidos enfocada a zonas rurales con algún tipo de limitación o deficiencia que afecta uno o varios de los factores relacionados con la calidad de vida.

Se debe mencionar que actualmente se tiene conversaciones con la cooperación Alemana y otras instituciones internacionales, para retomar las investigaciones en el tema pero con un enfoque más práctico, en base a las experiencias obtenidas por la GTZ y los esquemas que Tecnologías en Desarrollo está llevando a cabo, en ese sentido se pretende una mayor difusión de la tecnología de Biodigestión, que nuestra institución maneja como programa de "Viviendas Autoenergéticas"

### **¿Qué es un biodigestor?**

---

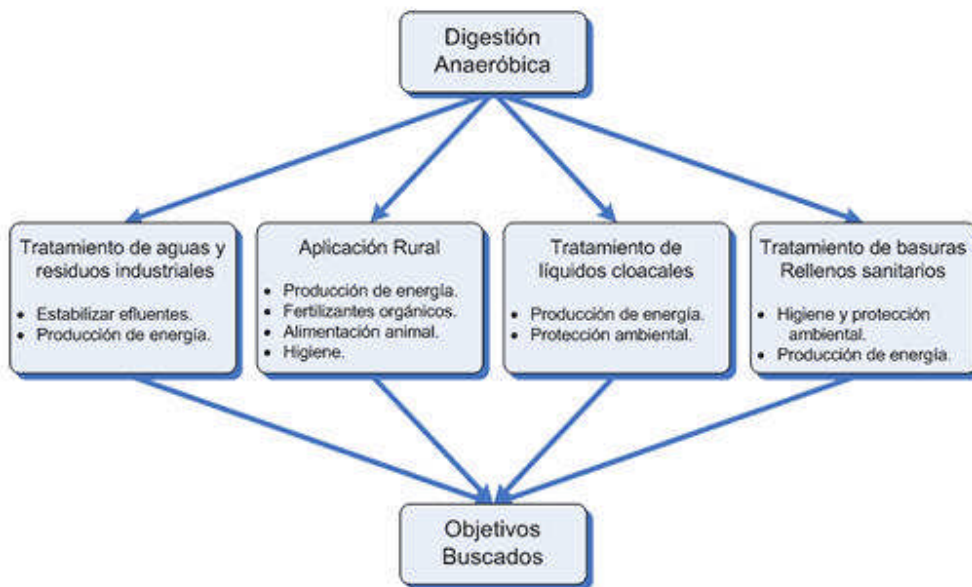
Biodigestor se denomina al dispositivo en el que se llevan a cabo los procesos de transformación de la materia orgánica para la obtención de biogás, constituyéndose en el componente principal y más importante del sistema. Un biodigestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos animales y humanos, desechos vegetales-no se incluyen cítricos ya que acidifican-, etcétera) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.

El fenómeno de biodigestión ocurre, porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en el material fecal, que al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH<sub>4</sub>), llamada biogás, sumamente eficiente si se emplea como combustible. El resultado de este proceso genera residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica, (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas.



Biodigestor en el valle      Biodigestor en el altiplano

El biodigestor, es un sistema sencillo de implementa, con materiales económicos, que se están introduciendo en comunidades rurales aisladas y de países subdesarrollados; para obtener el doble beneficio de conseguir solventar la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales.



## La Implementación de biodigestores en Bolivia

Este proyecto se desarrollo en comunidades campesinas de Bolivia. Esta iniciativa ha servido de experiencia piloto de aplicar los biodigestores de polietileno tubular de bajo costo, fuera de ecoregiones tropicales a nivel internacional, y ha significado el principio de difusión de esta tecnología apropiada en Bolivia. Tanto la aceptación y participación de los campesinos como la viabilidad de estos sistemas fuera del trópico ha sido un éxito.

Actualmente se instala sistemas de biodigestión anaerobia en Altiplano a 4000msnm y temperaturas por debajo de los 10 °C centígrados, con óptimos resultados.

Los biodigestores de polietileno tubular de bajo costo, se constituyen en una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias de pequeña, mediana y gran magnitud. El proyecto *Implementación de Biodigestores y Letrinas* en el área rural y periurbana de Bolivia nace para disminuir la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales, de comunidades rurales y periurbanas del departamento de Cochabamba (Bolivia), a través del uso de energías renovables, en este caso la biomasa. El proyecto completo plantea la instalación de letrinas/duchas ecológicas, arreglo de corrales del ganado y la instalación de biodigestores para la producción de gas para la cocción (biogás).

El proyecto ha generado la instalación de cerca de 250 biodigestores de bajo costo, de manera pionera en Bolivia y en condiciones de valle, altiplano (4000msnm) y trópico; es en ese sentido que los resultados de este proyecto nos dan la posibilidad de poder extrapolar los resultados obtenidos de la difusión y replica de esta tecnología, los resultados hasta ahora logrados por el proyecto son satisfactorios, actualmente se tiene instalados sistemas en diferentes ecoregiones.



Biodigestores Instalados en Altiplano, cerca lago Titicaca

### **Situación sin la Implementación del Programa**

Las condiciones de vida en la zona del área rural y periurbana que el proyecto pretende afectar es eminentemente muy deprimida y se corre el peligro de:

- a) Continuar con la intoxicación de la población circundante en especial las mujeres y niños en la zona del proyecto, al realizar la

- cocina de alimentos, usando estiércol seco (Altiplano) o leña y otros (trópico y valles), generando humos y gases tóxicos.
- b) Un mayor deterioro del medio ambiente, por el uso irracional de los recursos naturales en este caso la poca leña existente en la zona, los pajonales, y los efectos sociales y ambientales que ello conlleva.
  - c) Aumentar la inequidad del sector rural, por la falta de servicios básicos (saneamiento básico y energía).
  - d) Continuar con la extrema pobreza y sus factores colindantes en la calidad de vida.
  - e) Peligro de deforestación y por ende la pérdida de biodiversidad en la zona.
  - f) Deterioro de la calidad de vida en la zona, debido fundamentalmente al sistema de recolección de recursos que tiende a ser muy exigente en cuestión de tiempo y trabajo fundamentalmente de las mujeres y niños principalmente.
  - g) No gozar de fuentes energéticas económicas y de fácil obtención para la cocción de alimentos y en algunos casos de iluminación
  - h) Aumento de los costos erogados con el uso de las actuales fuentes energéticas.
  - i) Alta contaminación al medio ambiente, generando GEI's a la atmósfera, y su efecto en el calentamiento global; también la contaminación de acuíferos superficiales y subterráneos.

Se puede afirmar que sin la implementación del proyecto, los aspectos anteriormente vistos - aquellos intangibles - como la salud, comodidad, seguridad y simplificación del trabajo se ven seriamente afectados y por tanto la **calidad de vida** seguirá en detrimento.



Uso del Biogás en el altiplano Boliviano

Los beneficios directos de la tecnología de biodigestión anaerobia son:

- Producción energética económica, dando por resultado ahorros del efectivo.

- Mejora del sistema de cultivo reciclando el abono con biodigestores para producir el gas para cocinar y efluente para el biofertilizante
- Una reducción de la carga de trabajo física especialmente de las mujeres y los niños.
- Una reducción de la presión en los recursos naturales como leña y carbón vegetal, con mucha humedad en la zona.
- Todo esto haciendo uso de los residuos que causaría de otra manera la contaminación, especialmente en áreas urbanas.
- Coadyuvando a la salud de la población beneficiaria con la instalación de letrinas ecológicas conectadas a los sistemas de biodigestión.
- Mejorando la eficiencia energética de las cocinas tradicionales denominadas Q´onchas (en Valles), y Kíris (altiplano) respetando el tradicional uso de esta forma de cocinar, sobre todo en área rural.

La utilización de los biodigestores y letrinas conectadas en serie además de permitir la producción de biogás ofrece enormes ventajas para la transformación de desechos:

- Mejora la capacidad fertilizante del estiércol. Todos los nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio así como los elementos menores son conservados en el efluente. En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo, presente en el estiércol en forma de macromoléculas es convertido a formas más simples como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), las cuales pueden ser aprovechadas directamente por la planta. Debe notarse que en los casos en que el estiércol es secado al medio ambiente, se pierde alrededor de un 50% del nitrógeno.
- El efluente es mucho menos oloroso, peligroso y contaminante que el afluente, siendo aun mucho mas rentable económicamente, hablando el efluente al entrar en un mercado de productos orgánicos, que es la visión de sostenibilidad económica de estos sistemas.
- Control de patógenos. Aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo a factores como temperatura y tiempo de retención, se ha demostrado experimentalmente que alrededor del 85% de los patógenos no sobreviven el proceso de biodigestión



Producción de Biofertilizantes, producto de la biodigestión anaerobia

TECNOLOGIAS EN DESARROLLO está impulsando la utilización de biodigestores plásticos tubulares de flujo continuo, para la generación de biogás a partir del estiércol de los animales de granja, principalmente porcinos y bovinos. Se han utilizado diferentes tamaños de biodigestores, divididos en dos grupos denominados familiar e industrial respectivamente. La longitud de los biodigestores se establece de acuerdo a las necesidades de cada explotación pecuaria.

Los biodigestores están diseñados para ser de bajo costo, tanto en su instalación como en sus materiales y repuestos, ya que va dirigido a comunidades rurales que carecen de medios económicos. Son materiales que pueden ser encontrados en cualquier comercio especializado de las principales ciudades de Bolivia.

**Polietileno tubular plástico y material para el transporte.** El material se puede encontrar localmente, de manera que se puede contar con una ventaja comparativa sobre la construcción de biodigestores de bajo costo con materiales extranjeros. El material que necesitamos para la conducción del gas, así como los tubos plásticos de entrada y salida del biodigestor son materiales corrientes en la construcción, razón por la cual son accesibles de conseguir en Cochabamba, tanto en el área urbana como rural.

#### **Letrinas-Duchas**

Se pretende realizar construcciones simples en base a bloques de ladrillo y cemento, en el mejor de los casos, o de bloques de barro mejorado, en aquellos donde no exista la posibilidad. También cuenta con inodoros, puertas y tanques de acumulación de agua, los desechos humanos generados en el sistema serán tratados en el sistema de biodigestión.

#### **Colectores solares**

Se está investigando y se ha logrado generar un equipo que permite calentar el agua para la ducha a 60 °C, permitiendo con esta tecnología dotar de agua caliente para la ducha en sectores donde no existe este beneficio, y contando con un sistema altamente eficiente y económicamente bajo, de tal manera que se cuenta con un colector solar especialmente para altiplano que logra mantener el agua caliente durante el día a temperaturas bajas, pudiendo los beneficiarios bañarse a partir del medio día hora en la cual ya se tiene el calor acumulado para dicha actividad.

El diseño es simple y con el proyecto se plantea poner en práctica y uso esta tecnología en viviendas, las cuales se denominarán "VIVIENDAS RURALES AUTOENERGETICAS", pues contarán con el sistema de biodigestión, letrina-ducha y un sistema termogenerador (colector solar), esta vivienda será autosuficiente y autoeficiente porque abastecerá de energía para usos eléctricos y para cocción de alimentos

Nuestro trabajo esta enmarcado en la difusión, investigación y mejoramiento de tecnologías apropiadas, caracterizadas por criterios como su pequeña



escala, por el uso máximo de materiales locales y de fuentes de energías descentralizadas y renovables, por su facilidad de manejo y mantenimiento, o por requerir una baja inversión de capital.

Desde esta perspectiva, las tecnologías aplicadas al desarrollo rural desde nuestra institución son ambientalmente sanas, socialmente justas, económicamente viables y culturalmente aceptables.

Es en ese sentido actualmente TECNOLOGIAS EN DESARROLLO esta trabajando en el uso de la biomasa como fuente energética a través de sistemas de Biodigestión anaerobia de bajo costo.

La base de trabajo inicial ha constituido el tema del desarrollo rural/urbano y enfocado en la temática ambiental-energética, considerando que la energía se constituye en un elemento clave para lograr el desarrollo sostenible de todos los sectores.

TECNOLOGIAS EN DESARROLLO, desde una perspectiva amplia, solidaria y activa, busca promover un mayor y más racional uso de la energía y el medio ambiente en Bolivia, a través de la diversificación de fuentes de suministro y su aprovechamiento eficiente, contribuyendo de esta manera a la conservación del medio ambiente, y uso de tecnologías apropiadas.

La institución, principalmente, presta asistencia técnica que posibilite a los grupos meta mejorar sus condiciones de vida iniciales y satisfacer sus necesidades básicas, incrementar el nivel de vida y apoyar la producción, promoviendo la difusión de tecnologías apropiadas en calidad y eficiencia.

El grupo meta de TECNOLOGIAS EN DESARROLLO, lo constituyen:

- las familias campesinas con demandas insatisfechas en términos de servicios básicos, energía y condiciones inadecuadas para su productividad; y manejo de residuos (medio ambiente).
- la población rural y urbano marginal que puede beneficiarse de tecnologías apropiadas, al hacer un uso racional de la misma y maximizar el uso eficiente de recursos locales.

El trabajo con los grupos meta, se coordina con los Municipios y sindicatos, buscando una participación activa de estos niveles institucionales, y buscando que en el desarrollo de los diferentes proyectos se guarde coherencia con las políticas de desarrollo nacionales, regionales y municipales.

### **Replicabilidad del programa en Bolivia**

El proyecto ha generado la instalación de Biodigestores de bajo costo de tecnología intermedia, de manera pionera en Bolivia y en condiciones de valle, altiplano y trópico es en ese sentido que los resultados de este proyecto nos da la posibilidad de poder extrapolar los resultados obtenidos

de la difusión y replica de esta tecnología, los resultados hasta ahora logrados por el proyecto son satisfactorios, actualmente se tiene instalados sistemas en diferentes ecoregiones.

El uso de nuevas tecnologías que logren mejorar la calidad de vida de la población rural ha sido siempre el fin de casi todas las instituciones de desarrollo, ahora nosotros podemos afirmar que es hora que logremos la aplicación de nuestra tecnología (Biodigestores y letrinas- duchas), adaptada a Bolivia y que sea para toda la nación, es así que vemos con muy buen agrado el poder difundir este esfuerzo logrado por TECNOLOGÍAS EN DESARROLLO en las tres ecoregiones características de Bolivia, altiplano (4000msnm), Valles (2500msnm) y trópico (500msnm).

El proyecto plantea el manejo adecuado de los residuos humanos y animales, por medio de acciones sostenibles y acordes al equilibrio ecológico mejorara la calidad de vida de la población en la zona del proyecto. Los biodigestores contribuirán de manera considerable a mejorar las explotaciones en pequeña escala, facilitando el control de la contaminación y añadiendo el mismo tiempo valor agregado a la excreta del ganado y humano, mediante la producción de Biogás y la mejora del valor como nutriente del efluente utilizado como fertilizante. El biodigestor de película tubular de polietileno despierta atractivo entre la población rural debido al bajo costo de la instalación y la producción de gas. Se puede aplicar en zonas tanto rurales como urbanas.

El éxito logrado hasta el momento en la adopción de esta tecnología y los resultados conseguidos que dependen de factores como el lugar (disponibilidad de combustible tradicional- estiércol) y la manera de introducir y modificar la tecnología a fin de adaptarla a las condiciones locales. La tecnología se ha probado suficientemente para justificar su introducción en gran escala en Bolivia. La decidida participación de los agricultores, en los proyectos anteriores nos muestra la replicabilidad para que esta tecnología pueda seguir evolucionando y mejorando. Dentro las ecoregiones que el proyecto pretende alcanzar, las comunidades Bolivianas a las que se quiere llegar están catalogadas de extrema pobreza llegando a un margen de pobreza promedio de 90% (censo nacional, 2002). Y no cuentan con servicios básicos, y los sistemas de energía son precarios

### **Más información**

---

Tecnologías en desarrollo <http://www.tecnologiadesarrollo.tk/>

Ing. MSc. Oliver Campero Rivero  
Direc. Edif. Santa Maria (Av. Oquendo entre Venezuela y F. Blanco)  
4to. Piso of. 4 Cochabamba-Bolivia  
Casilla 3094

Tel.: +591-4-298635 – 35, 4531103

Fax: +591-4-298635

e-mail: [tecnologiadesarrollo@lycos.com](mailto:tecnologiadesarrollo@lycos.com)  
[oliver.campero@gmail.com](mailto:oliver.campero@gmail.com)

# Programa “Viviendas Autoenergéticas” en Bolivia. Una nueva forma de ver el futuro energético-ambiental del país en el área rural

Ing. MSc. Oliver Campero Rivero

Tecnologías en Desarrollo

Director Ejecutivo

## Summary

The Bolivian high plateau, fundamentally the Lake Titicaca region, has been, and will continue to be, polluted due to the absence of strategies for managing both human and animal waste. In this respect, and with a view to mitigating these negative effects, a technological process which will help alleviate the environmental problem posed by this type of pollution in sectors adjoining the lake is on the way to being consolidated. Since 2006, the programme “Energy self-sufficient housing” has been disseminated, revealing an integrating vision of technology concepts that helps reduce polluting emissions into the environment, be they to the atmosphere ( $\text{CH}_4$ ) or to surface and ground water (solids in suspension). This set of actions implies the implementation of intermediate technologies, techniques that allow us to drastically reduce human and animal waste, with the application of low-cost biodigesters and ecological latrines/showers discharging continuously into biodigestion systems, so that biomass energy (renewable energy) is generated on the one hand, as biogas is subsequently obtained from this process, and, on the other, a biofertilizer called bio, with a fertilizing capacity 30% greater than any chemical one used in agriculture.

This bioenergy technique has never been applied on the high plateau and in the conditions in which it is currently being implemented in Bolivia (almost 4,000 msnm and temperatures of  $-10^\circ\text{C}$ ). There are currently almost 100 systems in communities in the towns of Achacachi and Tiawanaku, with a view to trying to massify this type of technology in other lakeside areas and islands in Lake Titicaca.

## Resumen

El altiplano boliviano, y fundamentalmente la zona del lago Titicaca, ha sido y será contaminado por la falta de estrategias de manejo de residuos tanto humanos como animales. En ese sentido y para poder mitigar estos efectos negativos, se está logrando consolidar un proceso tecnológico que permitirá disminuir el problema ambiental de este tipo de contaminación en sectores aledaños al lago. Es así que desde 2006 se está diseminando el programa “Viviendas autoenergéticas”, con una visión integradora de conceptos tecnológicos que permitan reducir las emisiones contaminantes al medio, ya sean éstas a la atmósfera ( $\text{CH}_4$ ) o a los acuíferos superficiales o subterráneos (sólidos en suspensión). Este conjunto de acciones, pasan por la implementación de tecnologías intermedias, técnicas que permiten reducir drásticamente

los residuos humanos y animales, con la implementación de biodigestores de bajo costo y letrinas/duchas ecológicas de descarga continua a los sistemas de biodigestión, de manera que se genera por un lado energía de biomasa (energía renovable), al obtener biogás luego de este proceso, y por otro lado se obtiene un biofertilizante llamado bio, con un poder fertilizante mayor en un 30% que cualquier químico utilizado en la agricultura.

Esta técnica de bioenergía nunca fue tan difundida a nivel de altiplano y en las condiciones que ahora se está realizando en Bolivia (casi 4.000 msnm y temperaturas de  $-10^\circ\text{C}$ ). Actualmente se tienen cerca de 100 sistemas en comunidades de los municipios de Achacachi y Tiawanaku, con la idea de lograr masificar este tipo de tecnologías en otras regiones ribereñas e islas dentro del lago Titicaca.

## EL PROGRAMA “VIVIENDAS AUTOENERGÉTICAS” EN BOLIVIA

La desigualdad al momento de la distribución de los energéticos en Bolivia es muy grande. No existe posibilidad de que en zonas como el área rural puedan generar procesos de mejora en su calidad de vida, pues el Gobierno, tanto local como nacional, poco o nada apoyan a este sector de la población en esta temática, siendo sus necesidades olvidadas o marginadas de esquemas de desarrollo nacional. Por esta razón se ve a Bolivia como un país con abundantes recursos naturales, actualmente uno de los mayores productores de gas de América del Sur; sin embargo, pese a ser ricos internamente, la falta de fuentes energéticas en el área rural genera grandes problemas como el uso indiscriminado de los recursos naturales (leña y otros) para la cocción de alimentos que en la zona rural deriva en una fuerte presión al medio ambiente. En la actualidad no se cuenta con energía eléctrica por la dispersión de la población del área rural, que al no contar con este energético de red u otra fuente alternativa, utilizan queroseno y otros combustibles altamente peligrosos (gasolina, diésel, velas y otros).

La poca disponibilidad e ineficiencia de las actuales fuentes de energía en el área rural para la iluminación o la cocción de alimentos, desemboca en que la población campesina incremente su voracidad al medio ambiente, sin conocer que existen otras posibilidades tecnológicas que pueden resultar en esquemas sostenibles de manejo de los recursos naturales, y de los residuos humanos y animales, sin que por esto se cambie culturalmente el uso de los residuos (estiércol) para fines agrícolas.

Estas costumbres implican una gran contaminación al medio ambiente de emisiones de metano ( $CH_4$ ), como gas de efecto invernadero (GEI), de manera que afecte al calentamiento global y se continúe deteriorando el medio ambiente mundial.

Los problemas que se están solucionando son:

- La alta contaminación ambiental local y proteger la salud, sobre todo de las mujeres y los niños, al cocinar alimentos con los gases tóxicos que emanan de la quema de estiércol seco y leña; y la contaminación por la falta de estrategias de manejo de residuos.
- El poco abastecimiento de fuentes ener-



Problemática ambiental-energética, inadecuado manejo de residuos y fuentes de energía ineficiente

géticas alternativas para la vivienda familiar.

- Manejo adecuado de residuos y disminución del vertido de efluentes humanos y animales al medio ambiente, con los respectivos efectos negativos en la salud humana.
- Deterioro del medio ambiente por el uso irracional de los recursos naturales, en este caso la leña, tola u otros energéticos de la zona fundamentalmente, con el peligro de deforestación y por ende la pérdida de biodiversidad en la zona.
- Continuar con la extrema pobreza y sus factores colindantes: la calidad de vida y la presión al medio por la degradación y contaminación.
- Deterioro de la calidad de vida en la zona, debido fundamentalmente al sistema de recolección de recursos, que tiende a ser muy exigente en cuestión de tiempo y trabajo, fundamentalmente de las mujeres y niños.
- La falta de fuentes energéticas económicas, de fácil obtención para la cocción de alimentos e iluminación.
- El alto costo económico y social con el uso de las actuales fuentes energéticas.
- La alta contaminación del medio ambiente global por la emisión de gases de efecto invernadero como el metano ( $CH_4$ ).

La incorporación del concepto de energización rural por medio de la “Vivienda Autoenergética” en el diseño de los programas de desarrollo rural, podría contribuir a la obtención de mejores resultados, por cuanto posibilitaría análisis integrados de los aspectos sociales, culturales, económicos, ambientales y energéticos. Un plan de energización del área rural se concibe como un apoyo directo a los esfuerzos locales por resolver los problemas que han limitado la energización rural. Asimismo, sirve para canalizar los esfuerzos locales y la cooperación internacional en forma sinérgica y complementaria.

Los biodigestores en Bolivia, así como todos los procesos y factores inmersos en su uso y aprovechamiento, derivan en una tecnología reciente que tuvo sus primeros avances en la década de los noventa a cargo de la Universidad Mayor de San Simón, por medio del Proyecto Biogás, con financiamiento de la cooperación alemana (GTZ). Pese al enfoque y prioridades asumidas por este proyecto (GTZ cooperación alemana 1990-1995 Cbba, Bolivia) para el desarrollo y aplicación de los biodigestores como alternativa de solución al problema energético y de manejo de residuos sólidos de poblaciones rurales pobres o marginales (donde la generación de energía de bajo costo para uso doméstico a partir de insumos disponibles en la zona constituyó la base de las acciones), no se lograron obtener resultados significativos en lo que se refiere a la tecnología de instalación



Cocinas mejoradas con el uso de biogás como combustible



Biodigestor en valle (izq.) y biodigestor en altiplano (dcha.)

de los dispositivos en los que se llevan a cabo todos los procesos químicos de la biodigestión.

Los componentes y materiales utilizados por el Proyecto Biogás GTZ para la instalación de los sistemas incrementaron los costos a niveles inaccesibles para la población meta, situándose como una iniciativa eminentemente de investigación pero sin resultados prácticos que demuestren la viabilidad integral de su aplicación en la solución de problemas concretos.

No se pueden negar los avances científicos conseguidos por este proyecto inherentes a la operación en sí de los biodigestores en Bolivia, estudio del uso y aplicación de subproductos, etc., generando una base de datos muy útil para mejorar el desarrollo de esta tecnología (ciertamente, la información generada por este proyecto sirvió como referencia para la estructuración del esquema operativo del proyecto Energías Renovables en Bolivia, por nuestra institución).

En resumen, ésta fue la única experiencia importante a nivel nacional en el uso de los biodigestores, pero sin éxito concreto en su aplicación a nivel de la problemática social.

Posteriormente, a partir del año 2001, la ONG Tecnologías en Desarrollo pone en marcha una iniciativa piloto consistente en

la implementación de biodigestores bajo la modalidad de promoción de energías renovables y manejo integral de los residuos sólidos, enfocada a zonas rurales con algún tipo de limitación o deficiencia que afecta uno o varios de los factores relacionados con la calidad de vida.

Se debe mencionar que actualmente se tienen conversaciones con la cooperación alemana y otras instituciones internacionales para retomar las investigaciones en el tema, pero con un enfoque más práctico, en base a las experiencias obtenidas por la

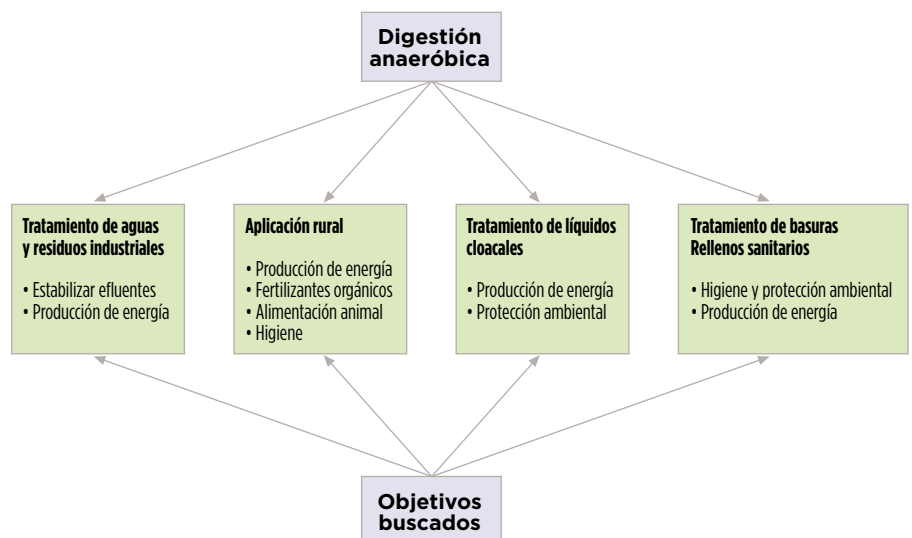
GTZ y los esquemas que Tecnologías en Desarrollo está llevando a cabo. En ese sentido, se pretende una mayor difusión de la tecnología de biodigestión, que nuestra institución maneja como programa de “Viviendas Autoenergéticas”.

### ¿QUÉ ES UN BIODIGESTOR?

Biodigestor se denomina al dispositivo en el que se llevan a cabo los procesos de transformación de la materia orgánica para la obtención de biogás, constituyéndose en el componente principal y más importante del sistema. Un biodigestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos animales y humanos, desechos vegetales –no se incluyen cítricos, ya que acidifican–, etcétera) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.

El fenómeno de biodigestión ocurre porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en el material fecal que, al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH<sub>4</sub>), llamada biogás, sumamente eficiente si se emplea como combustible. El resultado de este proceso genera residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica (ideales como fertilizantes), que pueden ser aplicados frescos, pues el trata-

Figura 1 aplicaciones de la digestión anaeróbica



miento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas.

El biodigestor es un sistema sencillo de implementar, con materiales económicos, que se está introduciendo en comunidades rurales aisladas y de países subdesarrollados, para obtener el doble beneficio de conseguir solventar la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales.



Biodigestores instalados en altiplano, cerca del lago Titicaca

## LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES EN BOLIVIA

Este proyecto se desarrolló en comunidades campesinas de Bolivia. Esta iniciativa ha servido de experiencia piloto de aplicar los biodigestores de polietileno tubular de bajo costo fuera de ecorregiones tropicales a nivel internacional, y ha significado el principio de difusión de esta tecnología apropiada en Bolivia. Tanto la aceptación y participación de los campesinos como la viabilidad de estos sistemas fuera del trópico han sido un éxito. Actualmente se instalan sistemas de biodigestión anaerobia en altiplano a 4.000 msnm y temperaturas por debajo de los 10 °C, con óptimos resultados.

Los biodigestores de polietileno tubular de bajo costo se constituyen en una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias de pequeña, mediana y gran magnitud. El proyecto implementación de biodigestores y letrinas en el área rural y periurbana de Bolivia nace para disminuir la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales, de comunidades rurales y periurbanas del departamento de Cochabamba (Bolivia), a través del uso de energías renovables, en este caso la biomasa. El proyecto completo planteó la instalación de letrinas/duchas ecológicas, arreglo de corrales del ganado y la instalación de biodigestores para la producción de gas para la cocción (biogás).

El proyecto ha generado la instalación de cerca de 250 biodigestores de bajo costo, de manera pionera en Bolivia y en condiciones de valle, altiplano (4.000 msnm) y trópico; es en ese sentido que los resultados de este proyecto nos dan la posibilidad de poder extrapolar los resultados obtenidos de la difusión y réplica de esta tecnología. Los resultados hasta ahora logrados por el proyecto son satisfactorios,

y actualmente se tienen instalados sistemas en diferentes ecorregiones.

### Situación sin la Implementación del programa

Las condiciones de vida en la zona del área rural y periurbana que el proyecto pretende afectar es eminentemente muy deprimida y se corre el peligro de:

- Peligro de deforestación y por ende la pérdida de biodiversidad en la zona.
- Deterioro de la calidad de vida en la zona, debido fundamentalmente al sistema de recolección de recursos, que tiende a ser muy exigente en cuestión de tiempo y trabajo, principalmente de las mujeres y niños.
- No gozar de fuentes energéticas económicas y de fácil obtención para la cocción de alimentos y en algunos casos de iluminación.
- Aumento de los costos erogados con el uso de las actuales fuentes energéticas.
- Alta contaminación del medio ambiente, emitiendo gases de efecto invernadero a la atmósfera y su efecto en el calentamiento global; también la contaminación de acuíferos superficiales y subterráneos.
- Continuar con la intoxicación de la población circundante, en especial las mujeres y niños en la zona del proyecto, al realizar la cocina de alimentos usando estiércol seco (altiplano) o leña y otros (trópico y valles), generando humos y gases tóxicos.
- Un mayor deterioro del medio ambiente, por el uso irracional de los recursos naturales, en este caso la poca leña existente en la zona, los pajonales, y los efectos sociales y ambientales que ello conlleva.
- Aumentar la desigualdad del sector rural, por la falta de servicios básicos (saneamiento básico y energía).
- Continuar con la extrema pobreza y sus factores colindantes en la calidad de vida.

Se puede afirmar que sin la implementación del proyecto, los aspectos anteriormente vistos –aquellos intangibles – como la salud, comodidad, seguridad y simplificación del trabajo, se ven seriamente afectados y por tanto la calidad de vida seguirá en detrimento.



Uso del biogás por gente del altiplano boliviano



Producción de biofertilizantes, producto de la biodigestión anaerobia

Los beneficios directos de la tecnología de biodigestión anaerobia son:

- Producción energética económica, dando por resultado ahorros del efectivo.
- Mejora del sistema de cultivo reciclando el abono con biodigestores para producir el gas para cocinar y efluente para el biofertilizante.
- Una reducción de la carga de trabajo física, especialmente de las mujeres y los niños.
- Una reducción de la presión en los recursos naturales como leña y carbón vegetal, con mucha humedad en la zona.
- Todo esto haciendo uso de los residuos, que causaría de otra manera la contaminación, especialmente en áreas urbanas.
- Coadyuvando a la salud de la población beneficiaria con la instalación de letrinas ecológicas conectadas a los sistemas de biodigestión.
- Mejorando la eficiencia energética de las cocinas tradicionales denominadas q'onchas (en valles), y kiris (altiplano), respetando el tradicional uso de esta forma de cocinar, sobre todo en área rural.

La utilización de los biodigestores y letrinas conectadas en serie, además de permitir la producción de biogás, ofrece enormes ventajas para la transformación de desechos:

- Mejora la capacidad fertilizante del estiércol. Todos los nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, así como los elementos menores, son conservados en el efluente. En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo, presente en el estiércol en forma de macromoléculas, es convertido a formas más simples como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), las cuales pueden ser aprovechadas directa-

mente por la planta. Debe notarse que en los casos en que el estiércol es secado al medio ambiente, se pierde alrededor de un 50% del nitrógeno.

- El efluente es mucho menos oloroso, peligroso y contaminante que el afluente, siendo aún mucho más rentable económicamente, hablando del efluente al entrar en un mercado de productos orgánicos, que es la visión de sostenibilidad económica de estos sistemas.
- Control de patógenos. Aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo a factores como temperatura y tiempo de retención, se ha demostrado experimentalmente que alrededor del 85% de los patógenos no sobreviven el proceso de biodigestión.

Tecnologías en Desarrollo está impulsando la utilización de biodigestores plásticos tubulares de flujo continuo para la generación de biogás a partir del estiércol de los animales de granja, principalmente porci-

## EL DISEÑO ES SIMPLE Y CON EL PROYECTO SE PLANTEA PONER EN PRÁCTICA Y USO ESTA TECNOLOGÍA EN "VIVIENDAS RURALES AUTOENERGÉTICAS".

nos y bovinos. Se han utilizado diferentes tamaños de biodigestores, divididos en dos grupos denominados familiar e industrial. La longitud de los biodigestores se establece de acuerdo a las necesidades de cada explotación pecuaria.

Los biodigestores están diseñados para ser de bajo costo, tanto en su instalación como en sus materiales y repuestos, ya que van dirigidos a comunidades rurales que carecen de medios económicos. Son

materiales que pueden ser encontrados en cualquier comercio especializado de las principales ciudades de Bolivia.

### Poliétileno tubular plástico y material para el transporte

El material se puede encontrar localmente, de manera que se puede contar con una ventaja comparativa sobre la construcción de biodigestores de bajo costo con materiales extranjeros. El material que necesitamos para la conducción del gas, así como los tubos plásticos de entrada y salida del biodigestor, son materiales corrientes en la construcción, razón por la cual son accesibles de conseguir en Cochabamba, tanto en el área urbana como rural.

### Letrinas- duchas

Se pretende realizar construcciones simples en base a bloques de ladrillo y cemento, en el mejor de los casos, o de bloques de barro mejorado, en aquellos donde no exista la posibilidad. También cuenta con inodoros, puertas y tanques de acumulación de agua. Los desechos humanos generados serán tratados en el sistema de biodigestión.

### Coletores solares

Se está investigando y se ha logrado generar un equipo que permite calentar el agua para la ducha a 60 °C, permitiendo con esta tecnología dotar de agua caliente para la ducha a sectores donde no existe este beneficio, y contando con un sistema altamente eficiente y económicamente bajo, de tal manera que se cuenta con un colector solar especialmente para altiplano que logra mantener el agua caliente durante el día a temperaturas bajas, pudiendo los beneficiarios bañarse a partir del mediodía hora en la cual ya se tiene el calor acumulado para dicha actividad.

El diseño es simple y con el proyecto se plantea poner en práctica y uso esta tecnología en viviendas, las cuales se denominarán "viviendas rurales autoenergéticas", pues contarán con el sistema de biodigestión, letrina-ducha y un sistema termogenerador (colector solar). Esta vivienda será autosuficiente y autoeficiente porque abastecerá de energía para usos eléctricos y para cocción de alimentos.

Nuestro trabajo está enmarcado en la difusión, investigación y mejoramiento de tecnologías apropiadas, caracterizadas por criterios como su pequeña escala, por el uso máximo de materiales locales y de fuentes de energías descentralizadas y renovables, por su facilidad de manejo y mantenimiento o por requerir una baja inversión de capital.



Desde esta perspectiva, las tecnologías aplicadas al desarrollo rural desde nuestra institución son ambientalmente sanas, socialmente justas, económicamente viables y culturalmente aceptables.

En ese sentido, actualmente Tecnologías en Desarrollo está trabajando en el uso de la biomasa como fuente energética a través de sistemas de biodigestión anaerobia de bajo costo.

La base de trabajo inicial ha constituido el tema del desarrollo rural/urbano y, enfocados en la temática ambiental-energética, considerando que la energía se constituye en un elemento clave para lograr el desarrollo sostenible de todos los sectores. Tecnologías en Desarrollo, desde una perspectiva amplia, solidaria y activa, busca promover un mayor y más racional uso de la energía y el medio ambiente en Bolivia, a través de la diversificación de fuentes de suministro y su aprovechamiento eficiente, contribuyendo de esta manera a la conservación del medio ambiente y el uso de tecnologías apropiadas.

La institución, principalmente, presta asistencia técnica que posibilite a los grupos meta mejorar sus condiciones de vida iniciales y satisfacer sus necesidades básicas, incrementar el nivel de vida y apoyar la producción, promoviendo la difusión de tecnologías apropiadas en calidad y eficiencia.

El grupo meta de Tecnologías en Desarrollo lo constituyen:

Figura 2 esquema de vivienda autoenergética



- Las familias campesinas con demandas insatisfechas en términos de servicios básicos, energía y condiciones inadecuadas para su productividad y manejo de residuos (medio ambiente).
- La población rural y urbana marginal que puede beneficiarse de tecnologías apropiadas, al hacer un uso racional de la misma y maximizar el uso eficiente de recursos locales.

El trabajo con los grupos meta se coordina con los municipios y sindicatos, buscando una participación activa de estos niveles institucionales, y buscando que en el desarrollo de los diferentes proyectos se guarde coherencia con las políticas de

desarrollo nacionales, regionales y municipales.

### REPLICABILIDAD DEL PROGRAMA EN BOLIVIA

El proyecto ha generado la instalación de biodigestores de bajo costo de tecnología intermedia de manera pionera en Bolivia, y en condiciones de valle, altiplano y trópico; es en ese sentido que este proyecto nos da la posibilidad de poder extrapolar los resultados obtenidos de la difusión y réplica de esta tecnología. Los resultados hasta ahora logrados por el proyecto son satisfactorios, y actualmente se tienen instalados sistemas en diferentes ecorregiones. ®

## CONCLUSIONES

El uso de nuevas tecnologías que logren mejorar la calidad de vida de la población rural ha sido siempre el fin de casi todas las instituciones de desarrollo; ahora nosotros podemos afirmar que es hora de que logremos la aplicación de nuestra tecnología (biodigestores y letrinas-duchas), adaptada a Bolivia, y que sea para toda la nación. Es así que vemos con muy buen agrado el poder difundir este esfuerzo logrado por Tecnologías en Desarrollo en las tres ecorregiones características de Bolivia: altiplano (4.000 msnm), valles (2.500 msnm) y trópico (500 msnm).

El proyecto plantea que el manejo adecuado de los residuos humanos y animales por medio de acciones

sostenibles y acordes al equilibrio ecológico, mejorará la calidad de vida de la población en la zona del proyecto. Los biodigestores contribuirán de manera considerable a mejorar las explotaciones en pequeña escala, facilitando el control de la contaminación y añadiendo al mismo tiempo valor agregado a la excreta del ganado y humano, mediante la producción de biogás y la mejora del valor como nutriente del efluente utilizado como fertilizante. El biodigestor de película tubular de polietileno despierta atractivo entre la población rural debido al bajo costo de la instalación y la producción de gas. Se puede aplicar en zonas tanto rurales como urbanas.

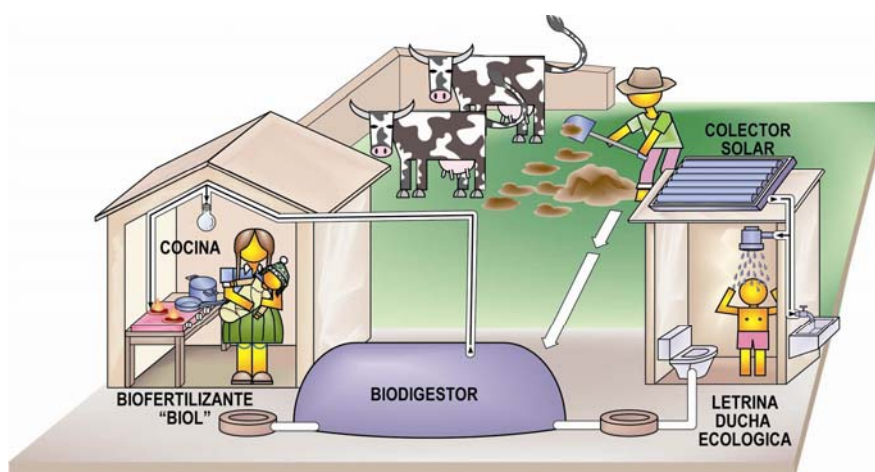
El éxito logrado hasta el momento en la adopción de esta tecnología y los

resultados conseguidos dependen de factores como el lugar (disponibilidad de combustible tradicional-estiércol) y la manera de introducir y modificar la tecnología a fin de adaptarla a las condiciones locales. La tecnología se ha probado suficientemente como para justificar su introducción en gran escala en Bolivia. La decidida participación de los agricultores en los proyectos anteriores nos muestra la replicabilidad para que esta tecnología pueda seguir evolucionando y mejorando. Dentro de las ecorregiones que el proyecto pretende alcanzar, las comunidades bolivianas a las que se quiere llegar están catalogadas de extrema pobreza, llegando a un margen de pobreza promedio del 90% (censo nacional, 2002). No cuentan con servicios básicos y los sistemas de energía son precarios.



## BIOGAS EN BOLIVIA PROGRAMA “VIVIENDAS AUTOENERGÉTICAS” UNA NUEVA FORMA DE VER EL FUTURO ENERGÉTICO-AMBIENTAL DEL PAÍS, EN ÁREA RURAL

Ing. MSc. Oliver Campero Rivero<sup>1</sup>  
Tecnologías en Desarrollo  
Bolivia



**Palabras Clave:** Bioenergía, Biodigestor, Biogás, Energía, Residuos.

### RESUMEN

El Altiplano Boliviano y fundamentalmente la zona del Lago Titicaca ha sido y será contaminado por la falta de estrategias de manejo de residuos tanto humanos como animales. En ese sentido y para poder mitigar estos efectos negativos, se está logrando consolidar un proceso tecnológico que permitirá disminuir el problema ambiental de este tipo de contaminación en sectores aledaños al lago. Es así que desde el 2006 se está diseminando el programa “Viviendas autoenergéticas”, con una visión integradora de conceptos tecnológicos que permitan reducir las emisiones contaminantes al medio ya sean estas a la atmósfera ( $CH_4$ ) o los acuíferos superficiales o subterráneos (sólidos en suspensión), este conjunto de

<sup>1</sup> Director Ejecutivo TECNOLOGIAS EN DESARROLLO. Email: [www.tecnologiasendesarrollo.org](http://www.tecnologiasendesarrollo.org) [info@tecnologiadesarrollo.org](mailto:info@tecnologiadesarrollo.org)  
[tecnologiadesarrollo@lycos.com](mailto:tecnologiadesarrollo@lycos.com) [oliver.campero@gmail.com](mailto:oliver.campero@gmail.com) Cochabamba, Bolivia

acciones, pasan por la implementación de tecnologías intermedias, técnicas que permiten reducir drásticamente los residuos humanos y animales, con la implementación de Biodigestores de bajo costo y Letrinas/duchas ecológicas de descarga continua a los sistemas de biodigestión, de manera que se genera por un lado energía de biomasa (energía renovable) al obtener BIOGAS luego de este proceso y por otro lado se obtiene un Biofertilizante llamado BIOL, con un poder fertilizante mayor en 30% que cualquier químico utilizado en la agricultura.

Esta técnica de bioenergía, nunca fue tan difundida a nivel de altiplano y en las condiciones que ahora se esta realizando en Bolivia (casi 4000 msnm y temperaturas  $-10^{\circ}\text{C}$ ), actualmente se tiene cerca de 100 sistemas en comunidades de los Municipios de Achacachi y Tiawanaku, con la idea de lograr masificar este tipo de tecnologías en otras regiones ribereñas e islas dentro el Lago Titicaca.

### **1. EL PROGRAMA “VIVIENDAS AUTOENERGÉTICAS” EN BOLIVIA**

La inequidad al momento de la distribución de los energéticos en Bolivia es muy grande no existe posibilidad de que en zonas como del área rural puedan generar procesos de mejora en su calidad de vida, pues el gobierno tanto local como nacional poco o nada apoyan a este sector de la población, en esta temática, siendo sus necesidades olvidadas o marginadas de esquemas de desarrollo nacional, por esta razón se ve a Bolivia como un país con abundantes recursos naturales, actualmente uno de los mayores productores de gas de América del sur, sin embargo pese a ser ricos, internamente la falta de fuentes energéticas en el área rural genera grandes problemas tanto en el uso indiscriminado de los recursos naturales (leña y otros) para la cocción de alimentos que en la zona rural deriva en una fuerte presión al Medio Ambiente. En la actualidad no se cuenta con energía eléctrica por la dispersión de la población del área rural, que al no contar con este energético de red u otra fuente alternativa, utilizan kerosén y otros combustibles altamente peligrosos (Gasolina, diessel, velas y otros).

La poca disponibilidad e ineficiencia de las actuales fuentes de energía en el área rural, para la iluminación, la cocción de alimentos, desemboca en que la población campesina incremente su voracidad al medio ambiente, sin conocer que existe otras posibilidades tecnológicas que pueden resultar en esquemas sostenibles de manejo de los recursos naturales, y de los residuos humanos y animales; sin que por esto se cambie culturalmente el uso de los residuos (estiércol) para fines agrícolas.

Estas costumbres implican una gran contaminación al medio ambiente, de emisiones de metano  $\text{CH}_4$ , como gas de efecto invernadero GEI, de manera que afecte al calentamiento global y se continúe deteriorando el medio ambiente mundial.

Los problemas que se están solucionando son:

- a) La alta contaminación ambiental local y proteger la salud sobre todo de la mujer y los niños al cocinar alimentos, con los gases tóxicos que emanan de la quema de estiércol seco y leña; y la contaminación por la falta de estrategias de manejo de residuos.
- b) El poco abastecimiento de fuentes energéticas alternativas para la vivienda familiar.
- c) Manejo adecuado de residuos y disminución del vertido de efluentes humanos y animales al medio ambiente, con los respectivos efectos negativos en la salud humana.
- d) Deterioro del medio ambiente, por el uso irracional de los recursos naturales en este caso la leña, tola u otros energéticos de la zona fundamentalmente. Con el peligro de deforestación y por ende la perdida de biodiversidad en la zona.
- e) Continuar con la extrema pobreza y sus factores colindantes; la calidad de vida y la presión al medio, por la degradación y contaminación.
- f) Deterioro de la calidad de vida en la zona, debido fundamentalmente al sistema de recolección de recursos que tiende a ser muy exigente, en cuestión de tiempo y trabajo fundamentalmente de las mujeres y niños principalmente.
- g) La falta de fuentes energéticas económicas, de fácil obtención para la cocción de alimentos e iluminación.
- h) El alto costo económico y social con el uso de las actuales fuentes energéticas.

- i) La alta contaminación de medio ambiente global por la emisión de gases de efecto invernadero como el Metano CH<sub>4</sub>.

La incorporación del concepto de energización rural por medio de la “**Vivienda Autoenergética**”, en el diseño de los programas de desarrollo rural podría contribuir a la obtención de mejores resultados, por cuanto posibilitaría análisis integrados de los aspectos sociales, culturales, económicos, ambientales y energéticos. Un plan de energización del área rural se concibe como un apoyo directo a los esfuerzos locales por resolver los problemas que han limitado la energización rural. Asimismo para canalizar los esfuerzos locales y la cooperación internacional en forma sinérgica y complementaria

## **2. COCINAS MEJORADAS CON EL USO DE BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE, LP, CBBA, SC.**

Los Biodigestores en Bolivia, así como todos los procesos y factores inmersos en su uso y aprovechamiento, derivan en una tecnología reciente que tuvo sus primeros avances en la década de los noventa a cargo de la Universidad Mayor de San Simón por medio del Proyecto Biogás con financiamiento de la Cooperación Alemana (GTZ). Pese al enfoque y prioridades asumidas por este proyecto (GTZ cooperación Alemana 1990-1995 Cbba, Bolivia) para el desarrollo y aplicación de los biodigestores como alternativa de solución al problema energético y de manejo de residuos sólidos, de poblaciones rurales pobres o marginales (donde la generación de energía de bajo costo para uso doméstico a partir de insumos disponibles en la zona constituyó la base de las acciones), no se lograron obtener resultados significativos en lo que se refiere a la tecnología de instalación de los dispositivos en los que se llevan a cabo todos los procesos químicos de la biodigestión.

Los componentes y materiales utilizados por el Proyecto Biogás GTZ para la instalación de los sistemas incrementaron los costos a niveles inaccesibles para la población meta, situándose como una iniciativa eminentemente de investigación pero sin resultados prácticos que demuestren la viabilidad integral de su aplicación en la solución de problemas concretos.

No se pueden negar los avances científicos conseguidos por este proyecto inherentes a la operación en si de los biodigestores en Bolivia, estudio del uso y aplicación de subproductos, etc., generando una base de datos muy útil para mejorar el desarrollo de esta tecnología (ciertamente, la información generada por este proyecto sirvió como referencia para la estructuración del esquema operativo del proyecto Energías Renovables en Bolivia, por nuestra institución).

En resumen, esta fue la única experiencia importante a nivel nacional, en el uso de los Biodigestores pero sin éxito concreto en su aplicación a nivel de la problemática social.

Posteriormente, a partir del año 2001 la ONG “*Tecnologías en Desarrollo*” pone en marcha una iniciativa piloto consistente en la implementación de biodigestores bajo la modalidad de promoción de energías renovables y manejo integral de los residuos sólidos enfocada a zonas rurales con algún tipo de limitación o deficiencia que afecta uno o varios de los factores relacionados con la calidad de vida.

Se debe mencionar que actualmente se tiene conversaciones con la cooperación Alemana y otras instituciones internacionales, para retomar las investigaciones en el tema pero con un enfoque mas practico, en base a las experiencias obtenidas por la GTZ y los esquemas que Tecnologías en Desarrollo esta llevando a cabo, en ese sentido se pretende una mayor difusión de la tecnología de Biodigestión, que nuestra institución maneja como programa de “Viviendas Autoenergéticas”

## **3. QUE ES UN BIODIGESTOR?**

Biodigestor se denomina al dispositivo en el que se llevan a cabo los procesos de transformación de la materia orgánica para la obtención de biogás, constituyéndose en el componente principal y más importante del sistema. Un biodigestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos animales y humanos, desechos vegetales-no se incluyen cítricos ya que acidifican-, etcétera) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.

El fenómeno de biodigestión ocurre, porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en el material fecal, que al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH<sub>4</sub>), llamada biogás, sumamente

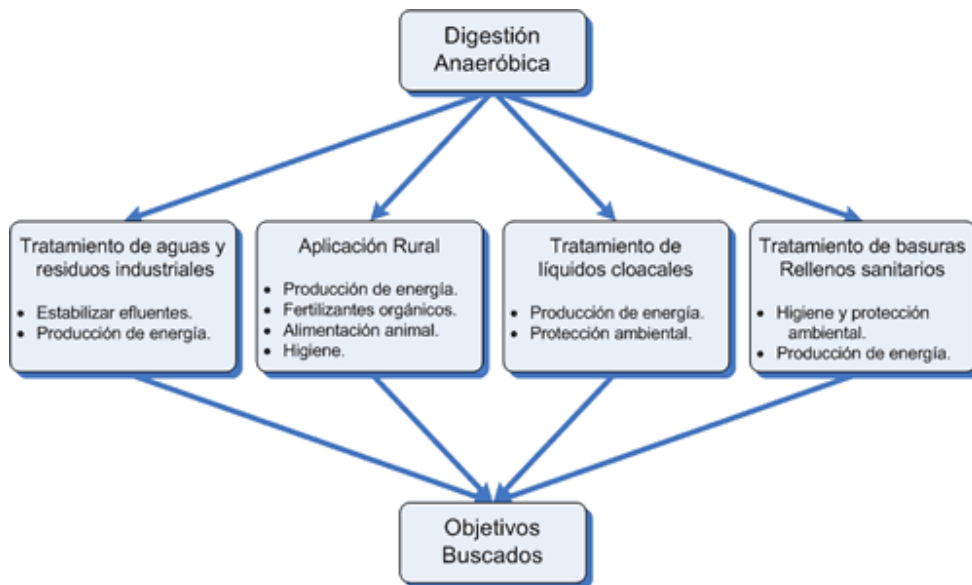
eficiente si se emplea como combustible. El resultado de este proceso genera residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica, (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas.



Biodigestor en Valle.

Biodigestor en Altiplano.

El biodigestor, es un sistema sencillo de implementa, con materiales económicos, que se están introduciendo en comunidades rurales aisladas y de países subdesarrollados; para obtener el doble beneficio de conseguir solventar la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales.



#### **4. LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES EN BOLIVIA.**

Este proyecto se desarrollo en comunidades campesinas de Bolivia. Esta iniciativa ha servido de experiencia piloto de aplicar los biodigestores de polietileno tubular de bajo costo, fuera de ecoregiones tropicales a nivel internacional, y ha significado el principio de difusión de esta tecnología apropiada en Bolivia. Tanto la aceptación y participación de los campesinos como la viabilidad de estos sistemas fuera del trópico ha sido un éxito. Actualmente se instala sistemas de biodigestión anaerobia en Altiplano a 4000msnm y temperaturas por debajo de los 10 °C centígrados, con óptimos resultados.

Los biodigestores de polietileno tubular de bajo costo, se constituyen en una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias de pequeña, mediana y gran magnitud. El proyecto **Implementación de Biodigestores y letrinas en el área rural y periurbana de Bolivia** nace para disminuir la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales, de comunidades rurales y periurbanas del departamento de Cochabamba (Bolivia), a través del uso de energías renovables, en este caso la biomasa. El proyecto completo planteo la instalación de letrinas/duchas ecológicas, arreglo de corrales del ganado y la instalación de biodigestores para la producción de gas para la cocción (biogás).

El proyecto ha generado la instalación de cerca de 250 Biodigestores de bajo costo, de manera pionera en Bolivia y en condiciones de valle, altiplano (4000msnm) y trópico; es en ese sentido que los resultados de este proyecto nos dan la posibilidad de poder extrapolar los resultados obtenidos de la difusión y replica de esta tecnología, los resultados hasta ahora logrados por el proyecto son satisfactorios, actualmente se tiene instalados sistemas en diferentes ecoregiones.

#### **5. SITUACIÓN SIN LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA**

Las condiciones de vida en la zona del área rural y periurbana que el proyecto pretende afectar es eminentemente muy deprimida y se corre el peligro de:

- a) Continuar con la intoxicación de la población circundante en especial las mujeres y niños en la zona del proyecto, al realizar la cocina de alimentos, usando estiércol seco (Altiplano) o leña y otros (trópico y valles), generando humos y gases tóxicos.
- b) Un mayor deterioro del medio ambiente, por el uso irracional de los recursos naturales en este caso la poca leña existente en la zona, los pajonales, y los efectos sociales y ambientales que ello conlleva.
- c) Aumentar la inequidad del sector rural, por la falta de servicios básicos (saneamiento básico y energía).
- d) Continuar con la extrema pobreza y sus factores colindantes en la calidad de vida.
- e) Peligro de deforestación y por ende la pérdida de biodiversidad en la zona.
- f) Deterioro de la calidad de vida en la zona, debido fundamentalmente al sistema de recolección de recursos que tiende a ser muy exigente en cuestión de tiempo y trabajo fundamentalmente de las mujeres y niños principalmente.
- g) No gozar de fuentes energéticas económicas y de fácil obtención para la cocción de alimentos y en algunos casos de iluminación
- h) Aumento de los costos erogados con el uso de las actuales fuentes energéticas.
- i) Alta contaminación al medio ambiente, generando GEI's a la atmósfera, y su efecto en el calentamiento global; también la contaminación de acuíferos superficiales y subterráneos.

Se puede afirmar que sin la implementación del proyecto, los aspectos anteriormente vistos - aquellos intangibles – como la salud, comodidad, seguridad y simplificación del trabajo se ven seriamente afectados y por tanto la **calidad de vida** seguirá en detrimento.



**Uso del Biogás por gente de altiplano Boliviano**

Los beneficios directos de la tecnología de biodigestión anaerobia son:

- ✓ Producción energética económica, dando por resultado ahorros del efectivo.
- ✓ Mejora del sistema de cultivo reciclando el abono con biodigestores para producir el gas para cocinar y efluente para el biofertilizante
- ✓ Una reducción de la carga de trabajo física especialmente de las mujeres y los niños.
- ✓ Una reducción de la presión en los recursos naturales como leña y carbón vegetal, con mucha humedad en la zona.
- ✓ Todo esto haciendo uso de los residuos que causaría de otra manera la contaminación, especialmente en áreas urbanas.
- ✓ Coadyuvando a la salud de la población beneficiaria con la instalación de letrinas ecológicas conectadas a los sistemas de biodigestión.
- ✓ Mejorando la eficiencia energética de las cocinas tradicionales denominadas Q'onchas (en Valles), y Kiris (altiplano) respetando el tradicional uso de esta forma de cocinar, sobre todo en área rural.

La utilización de los biodigestores y letrinas conectadas en serie además de permitir la producción de biogás ofrece enormes ventajas para la transformación de desechos:

- Mejora la capacidad fertilizante del estiércol. Todos los nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio así como los elementos menores son conservados en el efluente. En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo, presente en el estiércol en forma de macromoléculas es convertido a formas más simples como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), las cuales pueden ser aprovechadas directamente por la planta. Debe notarse que en los casos en que el estiércol es secado al medio ambiente, se pierde alrededor de un 50% del nitrógeno.
- El efluente es mucho menos oloroso, peligroso y contaminante que el afluente, siendo aun mucho mas rentable económicamente, hablando el efluente al entrar en un mercado de productos orgánicos, que es la visión de sostenibilidad económica de estos sistemas.

- Control de patógenos. Aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo a factores como temperatura y tiempo de retención, se ha demostrado experimentalmente que alrededor del 85% de los patógenos no sobreviven el proceso de biodigestión.

## **6. PRODUCCIÓN DE BIOFERTILIZANTES, PRODUCTO DE LA BIODIGESTIÓN ANAEROBIA.**

TECNOLOGIAS EN DESARROLLO esta impulsando la utilización de biodigestores plásticos tubulares de flujo continuo, para la generación de biogás a partir del estiércol de los animales de granja, principalmente porcinos y bovinos. Se han utilizado diferentes tamaños de biodigestores, divididos en dos grupos denominados familiar e industrial respectivamente. La longitud de los biodigestores se establece de acuerdo a las necesidades de cada explotación pecuaria.

Los biodigestores están Diseñados para ser de bajo costo, tanto en su instalación como en sus materiales y repuestos, ya que va dirigido a comunidades rurales que carecen de medios económicos. Son materiales que pueden ser encontrados en cualquier comercio especializado de las principales ciudades de Bolivia.

- **Polietileno tubular plástico y material para el transporte.** El material se puede encontrar localmente, de manera que se puede contar con una ventaja comparativa sobre la construcción de biodigestores de bajo costo con materiales extranjeros. El material que necesitamos para la conducción del gas, así como los tubos plásticos de entrada y salida del biodigestor son materiales corrientes en la construcción, razón por la cual son accesibles de conseguir en Cochabamba, tanto en el área urbana como rural.

### **Letrinas-Duchas**

Se pretende realizar construcciones simples en base a bloques de ladrillo y cemento, en el mejor de los casos, o de bloques de barro mejorado, en aquellos donde no exista la posibilidad. También cuenta con inodoros, puertas y tanques de acumulación de agua, los desechos humanos generados en el sistema serán tratados en el sistema de biodigestión.

### **Colectores solares**

Se esta investigando y se ha logrado generar un equipo que permite calentar el agua para la ducha a 60 °C, permitiendo con esta tecnología dotar de agua caliente para la ducha en sectores donde no existe este beneficio, y contando con un sistema altamente eficiente y económicamente bajo, de tal manera que se cuenta con un colector solar especialmente para altiplano que logra mantener el agua caliente durante el día a temperaturas bajas, pudiendo los beneficiarios bañarse a partir del medio día hora en la cual ya se tiene el calor acumulado para dicha actividad.

El diseño es simple y con el proyecto se plantea poner en práctica y uso esta tecnología en viviendas, las cuales se denominaran "VIVIENDAS RURALES AUTOENERGETICAS", pues contarán con el sistema de biodigestión, letrina-ducha y un sistema termogenerador (colector solar), esta vivienda será autosuficiente y autoeficiente porque abastecerá de energía para usos eléctricos y para cocción de alimentos

Nuestro trabajo esta enmarcado en la difusión, investigación y mejoramiento de tecnologías apropiadas, caracterizadas por criterios como su pequeña escala, por el uso máximo de materiales locales y de fuentes de energías descentralizadas y renovables, por su facilidad de manejo y mantenimiento, o por requerir una baja inversión de capital.

Desde esta perspectiva, las tecnologías aplicadas al desarrollo rural desde nuestra institución son ambientalmente sanas, socialmente justas, económicamente viables y culturalmente aceptables.

Es en ese sentido actualmente TECNOLOGIAS EN DESARROLLO esta trabajando en el uso de la biomasa como fuente energética a través de sistemas de Biodigestión anaerobia de bajo costo.

La base de trabajo inicial ha constituido el tema del Desarrollo rural/urbano y enfocados en la temática Ambiental-energética, considerando que la energía se constituye en un elemento clave para lograr el desarrollo sostenible de todos los sectores. TECNOLOGIAS EN DESARROLLO, desde una perspectiva amplia, solidaria y activa, busca promover un mayor y más racional uso de la energía y el medio ambiente



en Bolivia, a través de la diversificación de fuentes de suministro y su aprovechamiento eficiente, contribuyendo de esta manera a la conservación del medio ambiente, y uso de tecnologías apropiadas.

La institución, principalmente, presta asistencia técnica que posibilite a los grupos meta mejorar sus condiciones de vida iniciales y satisfacer sus necesidades básicas, incrementar el nivel de vida y apoyar la producción, promoviendo la difusión de tecnologías apropiadas en calidad y eficiencia.

El grupo meta de TECNOLOGÍAS EN DESARROLLO, lo constituyen:

- las familias campesinas con demandas insatisfechas en términos de servicios básicos, energía y condiciones inadecuadas para su productividad; y manejo de residuos (medio ambiente).
- la población rural y urbano marginal que puede beneficiarse de tecnologías apropiadas, al hacer un uso racional de la misma y maximizar el uso eficiente de recursos locales.

El trabajo con los grupos meta, se coordina con los Municipios y sindicatos, buscando una participación activa de estos niveles institucionales, y buscando que en el desarrollo de los diferentes proyectos se guarde coherencia con las políticas de desarrollo nacionales, regionales y municipales.

## **7. REPLICABILIDAD DEL PROGRAMA EN BOLIVIA**

El proyecto ha generado la instalación de Biodigestores de bajo costo de tecnología intermedia, de manera pionera en Bolivia y en condiciones de valle, altiplano y trópico es en ese sentido que los resultados de este proyecto nos da la posibilidad de poder extrapolar los resultados obtenidos de la difusión y replica de esta tecnología, los resultados hasta ahora logrados por el proyecto son satisfactorios, actualmente se tiene instalados sistemas en diferentes ecoregiones.

El uso de nuevas tecnologías que logren mejorar la calidad de vida de la población rural ha sido siempre el fin de casi todas las instituciones de desarrollo, ahora nosotros podemos afirmar que es hora que logremos la aplicación de nuestra tecnología (Biodigestores y letrinas-duchas), adaptada a Bolivia y que sea para toda la nación, es así que vemos con muy buen agrado el poder difundir este esfuerzo logrado por TECNOLOGÍAS EN DESARROLLO en las tres ecoregiones características de Bolivia, altiplano (4000msnm), Valles (2500msnm) y trópico (500msnm).

El proyecto plantea el manejo adecuado de los residuos humanos y animales, por medio de acciones sostenibles y acordes al equilibrio ecológico mejorara la calidad de vida de la población en la zona del proyecto. Los biodigestores contribuirán de manera considerable a mejorar las explotaciones en pequeña escala, facilitando el control de la contaminación y añadiendo el mismo tiempo valor agregado a la excreta del ganado y humano, mediante la producción de Biogás y la mejora del valor como nutriente del efluente utilizado como fertilizante. El biodigestor de película tubular de polietileno despierta atractivo entre la población rural debido al bajo costo de la instalación y la producción de gas. Se puede aplicar en zonas tanto rurales como urbanas.

El éxito logrado hasta el momento en la adopción de esta tecnología y los resultados conseguidos que dependen de factores como el lugar (disponibilidad de combustible tradicional- estiércol) y la manera de introducir y modificar la tecnología a fin de adaptarla a las condiciones locales. La tecnología se ha probado suficientemente para justificar su introducción en gran escala en Bolivia. La decidida participación de los agricultores, en los proyectos anteriores nos muestra la replicabilidad para que esta tecnología pueda seguir evolucionando y mejorando. Dentro las ecoregiones que el proyecto pretende alcanzar, las comunidades Bolivianas a las que se quiere llegar están catalogadas de extrema pobreza llegando a un margen de pobreza promedio de 90% (censo nacional, 2002). Y no cuentan con servicios básicos, y los sistemas de energía son precarios