

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL

GRADO EN INGENIERIA FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

---

**ÀREA DE COOPERACIÓ AL  
DESENVOLUPAMENT**

**ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL  
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y  
GANADEROS PARA EL DESARROLLO DE LAS  
COMUNIDADES RURALES DE LAS PARROQUIAS DE  
SAN SIMÓN Y SAN LORENZO EN LA PROVINCIA DE  
BOLÍVAR (ECUADOR)**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**AUTOR: BRUNO ARMENGOT CARBÓ**

**TUTOR: BORJA VELÁZQUEZ MARTÍ**

*Curso Académico: 2015 - 2016*

**VALENCIA, MAYO DE 2016**

# **ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y GANADEROS PARA EL DESARROLLO DE LAS COMUNIDADES RURALES DE LAS PARROQUIAS DE SAN SIMÓN Y SAN LORENZO EN LA PROVINCIA DE BOLÍVAR (ECUADOR).**

## **Resumen:**

Existe una gran cantidad de biomasa residual con posible uso energético que puede ser extraída de la gestión de la agricultura ecuatoriana, especialmente en operaciones de poda, renovación de plantaciones, restos de cosechas. En este trabajo se realiza un análisis de viabilidad de las tecnologías de aprovechamiento energético de estos recursos, respetando la no competencia con el mercado alimentario.

Han sido identificados los recursos disponibles aptos de aprovechamiento energético y se ha determinado la cantidad de cada uno de ellos en las parroquias de San Simón y San Lorenzo. Se ha realizado un diseño experimental para conocer el potencial de la fermentación anaeróbica con diferentes proporciones de la biomasa disponible (heces de ganado bovino y material vegetal), también se ha analizado el potencial de la combustión directa del material en calderas para producción de ACS mediante una caracterización físico-química de la biomasa

Los resultados apuntan a que aprovechando energéticamente los recursos disponibles con la fermentación anaeróbica es posible llegar a generar 8553 MWh de energía, 3 veces más de la energía que se consume. También se verifica que es viable la combustión de astillas en calderas que suministren ACS a comunidades de 50 personas. Por tanto, se demuestra que la gestión de los residuos agrícolas supone una alternativa al uso de gas propano convencional en las comunidades estudiadas.

Palabras clave: biomasa, biogás, pélet, astilla, fermentación anaerobia.

# **STUDY OF VIABILITY OF THE UTILIZATION OF WASTE LIVESTOCK AND AGRICULTURAL FOR THE DEVELOPMENT OF RURAL COMMUNITIES OF THE PARISH OF SAN LORENZO SAN SIMON AND IN THE PROVINCE OF BOLIVAR (ECUADOR).**

## **Abstract**

There is a lot of residual biomass with possible energy use that can be extracted from the management of Ecuador's agriculture, especially in pruning operations, renewal of plantations, crop residues. This paper presents a viability analysis of the energy efficiency technologies of these resources, respecting the non-competition with food market.

It has been identified suitable resources available for energy benefit and has determined the amount of each one in the parishes of San Simon and San Lorenzo. Has made an experimental design to explore the potential of anaerobic fermentation with different proportions of biomass available (cow feces and plant material), it has also analyzed the potential of direct combustion of material in a boiler for hot water by physiochemical characterization of biomass.

The results suggest that using available resources with the anaerobic fermentation is possible to generate 8553 MWh of energy, 3 times the energy consumed. Also it verifies that it is feasible the combustion of chips in boilers for provide hot water to communities of 50 people. Therefore, it shows that management of crop residues is an alternative to the use of conventional propane gas in the communities studied.

Keywords: biomass, biogas, pellet, chip, anaerobic fermentation.

## Agradecimientos

El presente trabajo, ha sido realizado a través de una beca del Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universitat Politècnica de València, junto con el Programa de Proyectos de Investigación para el Desarrollo-ADSIDEO de la misma universidad. Mi más sincero agradecimiento por brindarme la oportunidad de participar en un proyecto internacional con fines sociales.

Un especial agradecimiento a todo el equipo de trabajo de Ecuador que me han ayudado en todo lo posible para el desarrollo de este estudio, especialmente, a mi gran compañera Manuela Isabel Paredes Villena, la técnica de laboratorio con la que tantas horas hemos pasado analizando las diferentes muestras y realizado los sucesivos experimentos.

A mi tutor Borja Velázquez Martí, principal culpable de aportarme, hoy por hoy, la mejor experiencia de toda mi vida y su implicación y ayuda indispensable en el desarrollo de todo el trabajo. Gracias sinceramente.

Y como no, a mi familia que ha supuesto un apoyo constante en los momentos más difíciles de toda mi carrera.

## ÍNDICE

1. Antecedentes	1
2. Objetivos específicos del proyecto	2
3. Área de estudio	3
4. Análisis del precio de la energía convencional	8
5. Evaluación de los recursos susceptibles de aprovechamiento energético	10
5.1. Descripción del levantamiento de datos	10
5.2. Cuantificación de recursos	11
6. Análisis del potencial de biogás obtenible mediante fermentación	15
6.1. Materiales y métodos del análisis (dispositivo experimental)	15
6.2. Resultados de las pruebas de fermentación	17
7. Análisis del potencial de la combustión directa	28
7.1. Materiales y métodos del análisis de caracterización energética	29
a) Proceso de secado	
b) Caracterización proximal	
c) Caracterización elemental	
d) Poder calorífico	
7.2. Resultados caracterización energética	32
a) Proceso de secado	
b) Caracterización proximal	
c) Caracterización elemental y poder calorífico	
8. Viabilidad de la instalación de fermentadores anaerobios	35
8.1. Inversión de planta de fermentación familiar	35
8.2. Inversión de planta de fermentación a nivel poblado (50 personas)	38
8.3. Inversión de planta de fermentación a nivel parroquial	42
9. Análisis de la viabilidad de combustión directa	43
9.1. Instalación de calderas de astillas	43
9.2. Instalación planta de pélets	49
10. Conclusiones y recomendaciones	53
11. Referencias	55

**MEMORIA**

## 1. ANTECEDENTES

Las comunidades de San Lorenzo y San Simón de la provincia de Bolívar son eminentemente rurales. El nivel de pobreza es del 92,5%, desnutrición 51%, analfabetismo 19%. (Swissaid, 2015). Los ingresos provienen fundamentalmente de los cultivos de secano como maíz blanco, trigo y papas; junto la crianza de especies menores como cuyes, aves, ovejas, cerdos y ganado de leche. En los últimos años se ha producido una migración de los hombres y en menor proporción de las mujeres hacia ciudades más grandes como Quito y Ambato, para emplearse principalmente como albañiles, cargadores y empleadas domésticas. Las familias viven sobre los 2500 metros de altura. Las tierras tienen una pendiente que va del 20 al 30%, el clima oscila entre los 6 y 18°C en las partes altas y de 18 a 22°C en el sub trópico; existe una precipitación pluviométrica que va de 500 a 2000 mm. Las fuentes de agua provienen de los deshielos del nevado Chimborazo. La vía que comunica con la ciudad de Guaranda, capital de provincia, con las parroquias San Simón y San Lorenzo es de segundo orden. Las comunidades tienen suministro de energía eléctrica y agua entubada de forma muy deficitaria.

El gobierno ecuatoriano ha impulsado una reforma de la matriz productiva, cuyo objetivo es aprovechar de forma eficiente los recursos disponibles para lograr el buen vivir en un entorno social y económico globalizado existente a nivel mundial. En el ámbito energético, Ecuador propone la eliminación del subsidio del gas utilizado en cocinas y en instalaciones de agua caliente sanitaria (ACS) a favor de la electricidad, con lo que supone un ahorro estimado para el gobierno de 800 millones de dólares al año. Sin embargo, este hecho supondrá un grave impacto en las zonas rurales, sobre todo en las comunidades indígenas andinas que se abastecen de gas mediante reparto de bombonas, que experimentarán un encarecimiento de su consumo energético, considerando además que las redes eléctricas de que disponen no son muy estables, y que existe gran cantidad de zonas donde aún no dispone de ella. Es por ello necesario buscar alternativas de abastecimiento energético, compatibles con el medio ambiente, diversificando los recursos, incorporando nuevos combustibles y tecnologías.

Partiendo de una iniciativa local en las comunidades de San Lorenzo y San Simón en la provincia de Bolívar (Ecuador), el objetivo de este proyecto es propiciar el desarrollo rural a partir del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas, principalmente mediante combustión directa o la obtención de biogás, haciendo estas comunidades más autónomas desde el punto de vista energético. La gestión de residuos puede permitir a los agricultores tener un doble ingreso, uno por sus productos alimentarios, otro por la gestión de los subproductos con posibilidades energéticas.

Existe una gran cantidad de biomasa residual con posible uso energético que puede ser extraída de la gestión de la agricultura ecuatoriana, especialmente en operaciones de poda, renovación de plantaciones, restos de cosechas. En este trabajo se realiza un análisis de viabilidad de las tecnologías de aprovechamiento energético de estos recursos, respetando la no competencia con el mercado alimentario.

El presente trabajo se enmarca dentro del marco de cooperación financiado por el programa ADSIDEO del *Centro de Cooperación al Desarrollo (CCD)* de la Universidad Politécnica de Valencia (España), en colaboración con el Centro de Estudios de la Biomasa (CEB) de la Universidad Estatal de Bolívar y la Red ECUMASA (Red Ecuatoriana para la Investigación del aprovechamiento energético de la biomasa).

## **2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO**

Los objetivos específicos del presente estudio son los siguientes:

- a) Analizar de los precios de la energía convencional
- b) Cuantificar los recursos alternativos susceptibles de ser aprovechados energéticamente en el área de estudio
- c) Evaluar el potencial de biogás obtenible de la fermentación de distintas proporciones de materias primas en condiciones locales.
- d) Obtener las características físico-químicas de las materias primas disponibles: Curvas de secado, análisis elemental, proximal y calorimétrico
- e) Estudiar de la logística de la gestión de los recursos biomásicos del área de estudio para su aprovechamiento energético
- f) Calcular de la inversión de las instalaciones necesarias
- g) Análisis económico de la implantación de las técnicas de aprovechamiento energético de los recursos alternativos a la tecnología convencional

Los resultados de este estudio serán la base de un programa de divulgación y transferencia a las comunidades rurales de San Simón y San Lorenzo de la provincia de Bolívar (Ecuador) para propiciar su desarrollo y autonomía energética.

## **3. ÁREA DE ESTUDIO**

Bolívar es una provincia del centro de Ecuador, en la cordillera occidental de los Andes. Su capital es la ciudad de Guaranda. Tiene una extensión de 3254 km<sup>2</sup>, lo que lo convierte en la provincia más pequeña del Ecuador. No tiene elevaciones importantes, a excepción del volcán Chimborazo que se encuentra parcialmente en esta provincia. Administrativamente, el territorio se divide en entidades municipales llamadas

cantones, gobernadas por un ayuntamiento. Los cantones se dividen en parroquias cuyo dominio abarca tanto zona urbana como zona rural, gobernadas por las llamadas juntas parroquiales.

Tabla 1. Cantones de la provincia de Bolívar

Cantón	Área (km <sup>2</sup> )
Caluma	13129
Chillanes	11861
Chimbo	17406
Echeandía	12114
Guaranda	21877
Las Naves	6092
San Miguel	3565

El estudio de viabilidad se ha realizado sobre dos parroquias de San Simón y San Lorenzo, situadas en el cantón Guaranda.



Figura 1. Localización de la provincia de Bolívar en Ecuador



Figura 2. Localización de las parroquias de San Simón y San Lorenzo dentro del cantón Guaranda

a) *Parroquia San Lorenzo*

La parroquia de San Lorenzo posee una superficie aproximada de 150 km<sup>2</sup>. Se encuentra dentro de la Provincia de Bolívar en la parte central-sureste, en el margen oriental del Río Chimbo. Sus límites los constituyen

- Por el Norte: Parroquia San Simón- Río Puriñán
- Sur: Parroquia Santiago- Río Santiago
- Por el Este: Cordillera occidental de los Andes- Provincia de Chimborazo
- Por el Oeste: Río Chimbo

Territorialmente está formada por 35 poblados:

- Verdepamba
- Marcopamba
- Capuly
- Guapungoto
- Piripamba
- Tolapamba
- Sauce
- El Naguan
- Chocahuayco
- El Rodeo
- Canduya
- Timbopamaba
- Tambillo
- Pacay
- Calpa
- Guaytayug
- Virgenpamba
- Amapola
- Undushi
- Machángara
- Cecilia
- San Marcos
- Pasasloma
- Morasguayco
- Guapungotillo
- Chinipamba
- Atullay
- Condorguachana
- Charpiurco
- San Lorenzo-Otavalo
- Llano Grande
- Higospamba
- Cochapamba
- El Calvario
- Agua Santa.



Figura 3. Localización de los poblados dentro de la parroquia de San Lorenzo (Zona roja con clima cálido, zona verde clima de alta montaña)

La parroquia de San Lorenzo tiene un clima templado en la mayor parte de su territorio. La temperatura fluctúa entre los 14 y 16 grados centígrados. La cabecera parroquial está a una altitud de 2250 msnm.

Dentro de la parroquia se observan dos climas diferentes. Uno semihúmedo, más cálido por tener menor altitud y estar cerca del río Chimbo, el otro frío de alta montaña, puesto que aumenta la altitud de la zona. La zona de alta montaña está

prácticamente despoblada. Un 2% del territorio de San Lorenzo es considerado páramo, lugar en el que no se puede realizar ningún uso del suelo agrícola si forestal.

Como se puede observar en la Tabla 2, la población de San Lorenzo está formada por un total de 1857 habitantes. Éstos constituyen 371 familias. Teniendo en cuenta que aproximadamente 500 personas residen en el centro parroquial de San Lorenzo, existe una población de origen étnico nativo andino de 1357 habitantes distribuidos en 35 poblados, con lo que la población media de cada poblado es de 39 personas. Si consideramos en el presente estudio la construcción de una planta de fermentación para la obtención de biogás para cada poblado, la planta debe cubrir las necesidades energéticas de, al menos, 50 personas.

Tabla 2. Distribución por grupos de edades de la parroquia San Lorenzo

Edades	Hombres	Mujeres	Total
0 a 14 años	262	238	500
15 a 64 años	472	479	951
65 años y más	198	211	406
		TOTAL	1857

La población activa de la parroquia trabaja principalmente la actividad agropecuaria de pequeña escala (minifundios), así como también la ganadería y el arte de la música, ya que la población de San Lorenzo tiene una escuela de música, participando de ésta prácticamente el total de la población.

Económicamente, la población no es muy próspera. No existe una delimitación clara entre la zona de uso agrícola y la zona de uso forestal. El monte, no tiene aprovechamiento de ningún tipo, no se le aplican tratamientos silvícolas, por tanto la rentabilidad de éste es nula; sólo deforestación para la obtención de nuevos terrenos agrícolas y saca de leñas para autoconsumo de las familias. Las plantaciones agrícolas no son muy productivas. No se aplica una rotación razonable de cultivos ni mecanización.

Desde hace unos años están apareciendo cooperativas locales para la comercialización de los productos de forma unida y beneficiosa para todos. También para formar a los agricultores en cuanto a otros posibles cultivos, métodos para aumentar la rentabilidad de sus plantaciones, estimulación del uso de químicos orgánicos y adquisición de maquinaria común. Tampoco existe ningún tipo de industria en la población para el procesamiento de los productos, dándoles un valor añadido. El único producto semiprocesado es el queso, destinado sobre todo para el autoconsumo de cada familia.

b) *Parroquia San Simón*

La parroquia de San Simón es colindante con la de San Lorenzo. Sus límites son:

Al Norte: Confluencia de los ríos Salinas y Conventillo, formadores del río Chimbo

Al Este: El río Tililag, Cerro Shuyarumi y Cerro Yaguarcocha.

Al Sur: río Blanco, río Chimbo y territorio de la Parroquia San Lorenzo

Al Oeste: Río Chimbo



Figura 4. Distribución de poblados en la parroquia de San Simón

La cabecera parroquial se encuentra a 2500 msnm, pero la altitud del territorio oscila desde los 1600 m a los 4600 m. El clima varía entre los 6 a 18°C en la parte alta del territorio a los 18-22°C en la parte con clima de sub-trópico.

El territorio de la parroquia se divide en diferentes zonas según su valor y propiedades ecológicas:

**Zona 1.** Ocupa la zona alta, al este y sur de la parroquia. Está formado por elevadas pendientes montañosas. Corresponde a la zona de páramo en su mayoría. Es una zona muy poco productiva por sus condiciones climáticas. Ocupa una superficie de 4329,07 ha.

**Zona 2.** Ocupa la parte central de la parroquia, área montañosa con pendiente pero con presencia de pequeños reductos de bosque intervenido, matorral y cultivos andinos. Cubre un área de 2792,28 ha.

**Zona 3.** Cubre la zona poblada de la parroquia de San Simón. Predominancia de pendientes suaves y gran producción agrícola. Ocupa un área de 2551,59 ha

San Simón posee 13 poblados, todos ellos están localizados en la zona cálida de la parroquia. Tienen aproximadamente la misma densidad poblacional que San Lorenzo,

entre 40 y 50 personas (unas 10 familias) por poblado, en la cabecera parroquial viven entre 500 y 600 personas, haciendo un total aproximado de 1020-1250 habitantes.

- Capito
- Shacundo
- La Lira
- Tandahuán
- Canalpamba
- Pachagron
- Gradass Chico
- Tagma San José
- Tagma Rumiahui
- Cachisagua
- Pungul
- San José de Gallo Rumi
- Conventillo

Al igual que San Lorenzo, la economía de la parroquia se centra en la actividad agropecuaria en los cultivos de maíz suave choclo, trigo y papa, cuyas cosechas son vendidas a los intermediarios. Por otra parte, la ganadería es familiar. Cada familia tiene pocas cabezas de ganado, algunos cerdos, gallinas y cuyes, que emplean básicamente para el autoconsumo.

No hay presencia de industria. La parroquia cuenta con una fundación llamada *Su cambio por el cambio*, dónde se incentiva a la población local para crear mayor variedad de cultivos, sobretodo hortalizas, incrementando así su poder adquisitivo. Ofrecen formación y cuidado de los niños de la población. Ofrecen formación en temas agrícolas. La fundación subsiste de los productos agrícolas y ganaderos que ella misma produce de forma orgánica y que vende en los mercados.

#### **4. ANÁLISIS DEL PRECIO DE LA ENERGÍA CONVENCIONAL**

El suministro eléctrico en las parroquias de San Simón y San Lorenzo es muy precario. Lo constituyen líneas de baja tensión que funcionan a 125 V. Son frecuentes las variaciones transitorias de tensión que estropean aparatos, así como cortes en el abastecimiento. El coste del kWh eléctrico se sitúa en 0,09 \$ (ARCCE, 2015). El consumo mensual medio de electricidad es de 150 kWh por familia.

Otra fuente de energía habitualmente utilizada es el gas propano, el cual se utiliza tanto para agua caliente sanitaria como para la cocina. Las bombonas de gas propano vienen en cilindros de 15 kg. Actualmente con el subsidio proporcionado por el Estado, tienen un coste de 2 dólares por bombona si se recoge en distribuidora y 3 dólares si es comprada en los camiones que la distribuyen por el interior de las poblaciones.

El gobierno Ecuatoriano subvenciona el gas para que a la población le resulte más económica la adquisición de este producto, considerado de primera necesidad. Por esta razón, el precio de éste es bajo. Actualmente el gobierno está proponiendo la

eliminación del subsidio para priorizar el uso de la electricidad, financiando un cambio de las cocinas de gas por las de inducción. Sin el subsidio las bombonas de gas de 15 kg sufrirán una subida de precio estimada de 22 dólares, llegando a valer 25 dólares.

Una bombona de gas propano contiene 15 kg de gas, con un poder calorífico inferior de 11082 kcal/kg, por tanto se tiene que:

$$\text{Energía/bombona} = 11082 \text{ kcal/kg} \cdot 4184 \text{ J/kcal} \cdot 15 \text{ kg} \cdot 2,78 \cdot 10^{-7} = 193,32 \text{ kWh}$$

El coste del consumo energético del gas con subsidio es de 0,0155 \$/kWh, sin subsidio 0,13 \$/kWh.

Para conocer el consumo medio mensual de gas por persona, se realizó una encuesta a múltiples familias de la zona. Para una familia media de 4 miembros, el consumo mensual medio es de 1,5 bombonas de gas propano, entre el agua caliente sanitaria y gas para cocina. Esto nos supone que una familia de 4 miembros, consume:  $1,5 \cdot 193,32 = 290 \text{ kWh/mes}$

$$\frac{290 \text{ kWh/mes}}{4} = 72,5 \text{ kWh/person a mes}$$

Por tanto observamos que por unidad doméstica se presenta un consumo de gas propano de 290 kWh mensuales y un consumo eléctrico de 150 kWh mensuales. Sabiendo que el precio de la energía eléctrica está en una media de 0,09\$ el kWh, una familia media sin el subsidio que siga empleando el gas para ACS y cocina tiene el siguiente gasto mensual:

$$150 \text{ kWh} \cdot 0,09 \text{ \$/kWh} = 13,5\$ \text{ mensuales en electricidad}$$

$$290 \text{ kWh} \cdot 0,13 \text{ \$/kWh} = 37,7\$ \text{ mensuales en gas}$$

Pasando de pagar 16,5\$ mensuales a 51,2\$ por las necesidades energéticas básicas. Lo cual supone un aumento en los costes para cubrir las necesidades básicas de 3,1 veces.

## 5. EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS SUSCEPTIBLES DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

El objetivo de este apartado ha sido identificar los recursos disponibles aptos de aprovechamiento energético junto la determinación la cantidad de cada uno de ellos en las parroquias de San Simón y San Lorenzo.

### 5.1 Descripción del levantamiento de datos

Para definir los cultivos más abundantes en la zona de estudio se partió de los datos proporcionados por la oficina provincial del Ministerio de Agricultura, Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP) de Ecuador y por las juntas parroquiales. Además se hicieron entrevistas a los productores propietarios. Se identificaron los siguientes datos: los principales cultivos de estudio, la superficie media de cada agricultor, la superficie total, fechas de siembra y cosecha.

En la Tabla 3 se muestra la distribución de la superficie tenida por los productores. Se puede comprobar que la superficie media que posee cada propietario es aproximadamente 2 ha.

Tabla 3. Distribución de la superficie tenida por los productores

Tipos de Productores	Superficie media (ha)	Porcentaje sobre el Total de Productores
Menos de 1 ha	1	71,25%
1-5 ha	2.5	18,75%
5-10 ha	7.5	9,375%
10-20 ha	15	0,625%
Total		100%

Superficie media por productor =  $0,7125 \cdot 1 + 0,469 \cdot 2,5 + 0,703 \cdot 7,5 + 0,09375 \cdot 15 = 1,98$  ha

Posteriormente se realizó un muestreo en las zonas significativas. Los puntos de muestreo se indican en la Tabla 4. Los datos tomados son los siguientes:

Para los residuos de cultivos anuales y herbáceos:

- Nº de plantas por metro cuadrado
- Peso de la biomasa extraída por metro cuadrado
- Marco de plantación
- Altura de la planta, para la obtención de la altura media.

Para los residuos leñosos:

- Altura total del árbol
- Altura del fuste

- Diámetro del fuste a altura media del mismo
- Diámetro de la copa
- Biomasa extraída en la poda

Tabla 4. Coordenadas de las parcelas de muestreo.

Cultivo	Parcela de trabajo	Cuadrícula	Coordenadas UTM		Altura (m)
			X	Y	
Arveja	Parcela 1	17M	726802	9818549	3080
	Parcela 2	17M	723988	9818050	2605
Trigo	Parcela 1	17M	722868	9814620	2573
	Parcela 2	17M	723932	9818408	2680
Cebada	Parcela 1	17M	726317	9815541	2997
	Parcela 2	17M	719096	9828197	2812
Papa	Parcela 1	17M	723026	9818205	2619
	Parcela 2	17M	723962	9818095	2612
Maíz	Parcela 1	17M	723675	9814256	2673
	Parcela 2	17M	723023	9818300	2608
Frejol seco	Parcela 1	17M	723027	9818204	2564
	Parcela 2	17M	726756	9818565	3016
Chilca	Parcela 1	17M	724685	9814719	2565
	Parcela 2	17M	723932	9818114	2624
Lechero	Parcela 1	17M	725828	9815296	2825
	Parcela 2	17M	723976	9818110	2624

## 5.2 Cuantificación de recursos

En las Tabla 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación de los recursos. Se puede observar que ambas parroquias, tienen las mismas características en cuanto a la abundancia y tipo de cultivos. El maíz es el cultivo más extendido. De acuerdo a las mediciones realizadas genera 21500 t de residuos de caña en San Simón y 40500 t en San Lorenzo. Esta abundancia hace que sean considerados como la primera fuente de aprovechamiento energético. No obstante, éstos se emplean actualmente en el ensilaje, el cual, consiste en un proceso de conservación del forraje basado en una fermentación láctica del pasto. Una vez finalizado este proceso, se emplea como alimento para el ganado.

Los siguientes cultivos más abundantes entre ambas parroquias con la Chilca con 1583 ha, y el trigo con 580 ha. De la paja del trigo no se realiza ningún tipo de aprovechamiento, después de la cosecha, es quemada o enterrada en el mismo campo. La chilca es un arbusto usado en ocasiones como lindero, también crece de forma natural en los bosques ocupando el estrato arbustivo.

Tabla 5. Residuos agrícolas disponibles en San Simón

Cultivos	Superficie total estimada (ha)	Fecha de siembra	Fecha de recolección	Mes de generación de residuos	Estacionalidad	Tipo de residuos	Cantidad estimada (t)
Maíz suave choclo	1200	Noviembre-Diciembre	Junio-Julio	Junio-Julio	Anual	Herbáceos(caña)	21.480
Maíz suave seco	260	Noviembre-Diciembre	Agosto-Septiembre	Agosto-Septiembre	Anual	Herbáceos(caña)	4.661,8
Trigo	260	Marzo	Julio-Agosto	Julio-Agosto	Anual	Herbáceos(paja)	1.248
Cebada	214	Marzo	Agosto	Agosto	Anual	Herbáceos(paja)	2.011,6
Chilca	583	No	Libre	Libre	Libre elección 1 o 2 anuales	Leñosos	2.756,46
Papa	260	Permanente	Permanente cada 6 meses.	Permanente cada 6 meses.	Semestral	Herbáceos	2.548
Lechero	130	No	Libre	Libre	Libre, 1 o 2 anuales	Leñosos	551,3
Alverja	30	Marzo	Septiembre	Septiembre	Anual	Herbáceos	246,22
Fréjol Seco	80	Noviembre-Diciembre	Julio-Agosto	Julio-Agosto	Anual	Herbáceos	57,6
						TOTAL	37.573,3

Tabla 6. Residuos agrícolas disponibles en San Lorenzo

Cultivos	Superficie total estimada (ha)	Fecha de siembra	Fecha de recolección	Mes de generación de residuos	Estacionalidad	Tipo de residuos	Cantidad estimada (t)
Maíz suave choclo	1125	Noviembre- Diciembre	Junio-Julio	Junio-Julio	Anual	Herbáceos(caña)	40.413,39
Maíz suave seco	375	Noviembre- Diciembre	Agosto- Septiembre	Agosto- Septiembre	Anual	Herbáceos(caña)	13.471,13
Trigo	320	Marzo	Julio-Agosto	Julio-Agosto	Anual	Herbáceos(paja)	1.536
Cebada	30	Marzo	Agosto	Agosto	Anual	Herbáceos(paja)	120,9
Chilca	1000	No	Libre	Libre	Libre 1 o 2 anuales	Leñosos	8.180
Papa	350	Permanente	Permanente cada 6 meses.	Permanente cada 6 meses.	Semestral	Herbáceos	3.188,5
Lechero	104	No	Libre	Libre	Libre, 1 o 2 anuales	Leñosos	1929,2
Alverja	100	Marzo	Septiembre	Septiembre	Anual	Herbáceos	820
Fréjol Seco	70	Noviembre- Diciembre	Julio-Agosto	Julio-Agosto	Anual	Herbáceos	51,23
						TOTAL	73.180,7

Una especie de especial relevancia es el lechero (*Euphorbia laurifolia*), que no es un cultivo propiamente dicho, pero es ampliamente utilizado en la zona como cercos para la separación de diferentes parcelas y también como poste vivo para las explotaciones ganaderas. Este vegetal proporciona una gran cantidad de residuos, tiene una gran capacidad de propagación, y un crecimiento muy acelerado, tanto del fuste como de las ramas después de su poda. Además, la localización que ocupa dentro de las parroquias (linderos) facilita tanto su extracción como su transporte, ya que su extracción se puede realizar en los mismos puntos de carga que los residuos agrícolas.

Para la estimación de los residuos procedentes del ganado bovino se han contrastado con los datos obtenidos de las oficinas del MAGAP, mediante encuestas a los ganaderos del San Simón y San Lorenzo. Los resultados de la encuesta aportan una estimación de una media de 5 vacas y 2 cerdos por familia. Teniendo en cuenta el número de familias por parroquia, obtenemos el número total de animales.

San Lorenzo:

$$371 \text{ familias} \cdot 5 \frac{\text{vacas}}{\text{familia}} = 1855 \text{ vacas}; \quad 371 \text{ familias} \cdot 2 \frac{\text{cerdos}}{\text{familia}} = 742 \text{ cerdos}$$

San Simón:

$$227 \text{ familias} \cdot 5 \frac{\text{vacas}}{\text{familia}} = 1135 \text{ vacas}; \quad 227 \text{ familias} \cdot 2 \frac{\text{cerdos}}{\text{familia}} = 454 \text{ cerdos}$$

El cálculo de la cantidad de residuos anuales generados (excrementos) se realizó a partir de datos bibliográficos (ANEMBE, 2000; Gallardo, 2002; Barra, 2005). En la Tabla 7 se muestran las cantidades de residuos consideradas que generan los diferentes tipos de ganado anualmente.

Tabla 7. Residuos procedentes de ganado bovino y porcino.

Poblaciones	Animales	Nº animales	kg/animal x año	Total residuo (t)
San Lorenzo	Vacas	1855	3217	<b>5967,53</b>
	Cerdos	742	2750	<b>2040,5</b>
San Simón	Vacas	1135	3217	<b>3651,3</b>
	Cerdos	454	2750	<b>1248,5</b>

En la Tabla 8 se muestra un resumen de los recursos disponibles para aprovechamiento energético.

Tabla 8. Resumen residuos totales por parroquia.

<b>Poblaciones</b>	<b>Tipo de residuo</b>	<b>Residuo anual (t)</b>	<b>Diferencia Agrícolas- Ganaderos (t)</b>
<b>San Lorenzo</b>	Ganaderos	8008,04	65172
	Agrícolas	73180,7	
<b>San Simón</b>	Ganaderos	4900	32673
	Agrícolas	37573,3	

De los residuos vegetales considerados, se va a analizar su aprovechamiento energético mediante dos tecnologías: combustión directa y fermentación mezclados con residuos ganaderos. El aprovechamiento de la caña de maíz y paja de trigo mediante combustión directa requeriría una peletización previa. Sin embargo, la combustión directa de los residuos del lechero y la chilca no requieren este proceso necesariamente, puesto que son materiales leñosos y se puede realizar en forma de leñas o astillas.

A la vista de los resultados obtenidos en la cuantificación. Se observa que el factor limitante para la fermentación anaerobia de los residuos vegetales generados en cada población van a ser los residuos disponibles del ganado, que actúa como inoculador fermentativo de los residuos vegetales en codigestión. Esta limitación provocará la existencia de residuos agrícolas que no van a poder ser empleados con tal fin.

## **6. ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE BIOGÁS OBTENIBLE MEDIANTE FERMENTACIÓN**

### **6.1 Materiales y métodos del análisis (dispositivo experimental)**

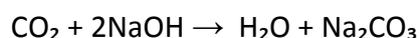
Para la determinación del biogás obtenible en la fermentación de distintas materias primas disponibles se ha realizado un diseño experimental mostrado en la Tabla 9. Como se puede observar se han probado diferentes proporciones de material vegetal con excrementos de ganado bovino.

Las muestras vegetales fueron recolectadas y dispuestas en una terraza de secado al aire hasta alcanzar humedad mínima constante. Tras el secado las muestras fueron trituradas para disminuir el tamaño de partícula, y por consiguiente, aumentar la superficie de contacto y la eficacia de la hidrólisis, permitiendo de esta forma una mayor degradación de la materia orgánica compleja. Tras el pesado de la fracción vegetal seca se mezcló con la fracción de excrementos correspondiente, llevando la muestra al biorreactor. Posteriormente, se procedió a la dilución con 150-240 ml de agua de la toma de agua corriente, para obtener un substrato más líquido, y favorecer la fermentación y mantener una proporción líquido-sólido de 60-40%.

Tabla 9. Proporciones de residuo vegetal y excrementos bovinos en el biorreactor

Material vegetal	Repetición	Peso material vegetal(g)	Peso excremento de ganado(g)	Proporción excrementos vs vegetal	Dilución(ml)
<b>Paja</b>	1	25	75	75%-25%	150
	2	25	75	75%-25%	150
	3	25	75	75%-25%	150
	4	25	75	75%-25%	150
	5	25	75	75%-25%	150
<b>Lechero</b>	1	50	100	66,7%-33,3%	225
	2	50	100	66,7%-33,3%	225
	1	25	75	75%-25%	150
	2	25	75	75%-25%	150
<b>Arveja</b>	1	25	135	84,4%-15,6%	240
	2	25	135	84,4%-15,6%	240
<b>Maíz</b>	1	25	75	75%-25%	150
	2	25	75	75%-25%	150
	3	25	75	75%-25%	150
	4	25	75	75%-25%	150
	1	50	50	50%-50%	150
	2	50	50	50%-50%	150

El esquema del dispositivo experimental es mostrado en la Figura 5. El sustrato a fermentar fue colocado en un matraz erlenmeyer de 2 litros de capacidad, que funcionaría como biorreactor tipo batch (discontinuo). Posteriormente se tapó la abertura del matraz con un tapón sellándose con silicona. El tapón disponía un orificio a través del cual pasaba un tubo de cristal por el que circularía el gas producido en la fermentación. El tubo de cristal se conectaba a una manguera por la cual se conducía el gas hasta la base de un kitasatos. Este kitasatos se encontraba lleno de una solución de NaOH 0.5M que actúa como filtro de absorción. El filtro de absorción se encarga de absorber de forma selectiva el CO<sub>2</sub> del biogás de acuerdo a la siguiente reacción:



Al absorber el CO<sub>2</sub> se mejora la pureza del gas obtenido a los niveles deseados del 60% de metano como mínimo, aumentando el poder calorífico. En la Tabla 10 se muestra la composición estimada del biogás obtenido de la digestión anaeróbica.

Tabla 10. Composición típica del biogás procedente de digestión anaeróbica

Componente	Porcentaje
Metano	60-80
Dióxido de carbono	20-40
Nitrógeno	1-2
Monóxido de carbono	0-1.5
Oxígeno	0-1
Ácido Sulfhídrico	0-1

Del filtro de absorción, el gas ya purificado se conduce hasta el gasómetro, lugar dónde se acumula y dónde se procede a la medición de su volumen.

Otra variable medida en el experimento fue el pH del sustrato. Se extraía 8 ml de la solución del sustrato contenido en el biorreactor mediante una jeringuilla situada en la base de éste. Luego se depositaba en unos recipientes de plástico y se procedía a la medición del pH con la ayuda de un pH-metro.

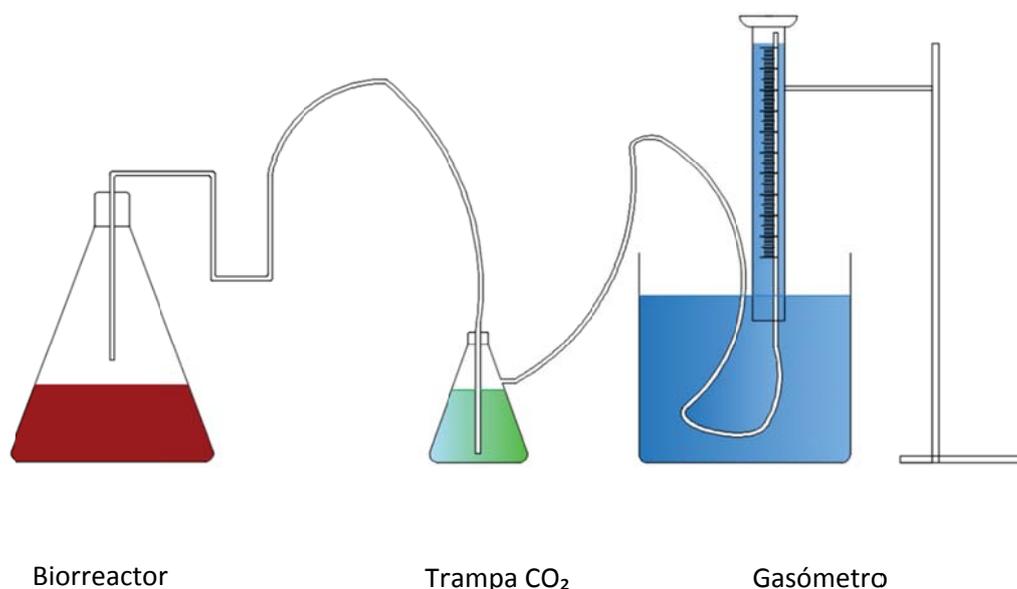


Figura 5. Esquema funcionamiento experimento.

## 6.2 Resultados de las pruebas de fermentación

En el anexo I se muestra la producción de biogás para los distintos sustratos probados. Tomándose como ejemplo, en la Figura 6 se representa la producción acumulada de biogás con el tiempo en la fermentación de la mezcla de 25% paja de trigo y 75% excrementos de ganado bovino.

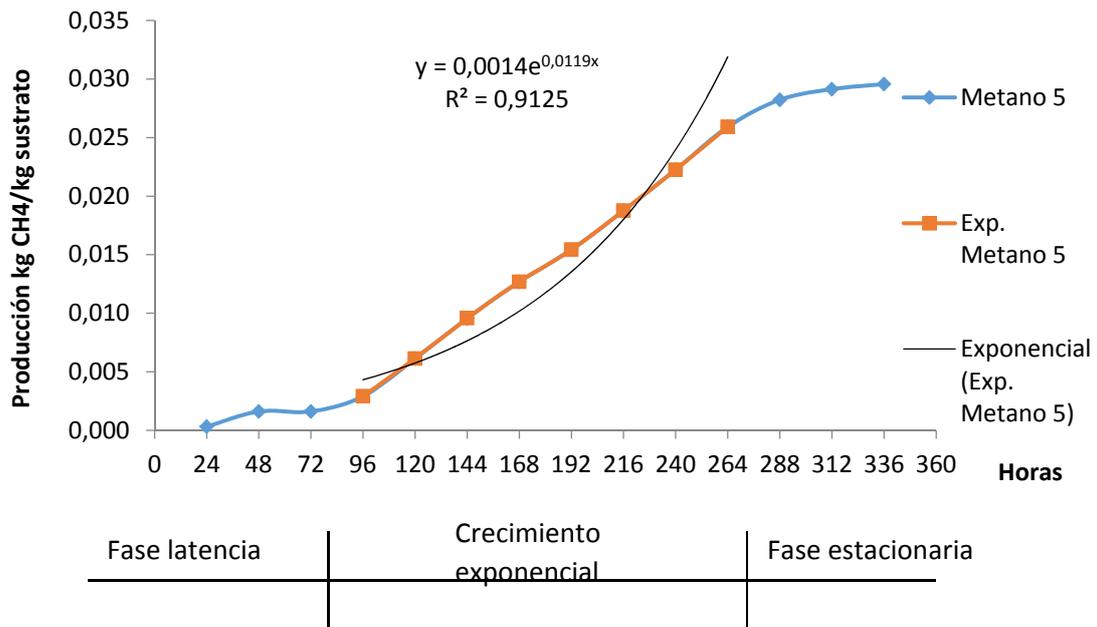


Figura 6. Evolución de la producción de biogás en la fermentación de la mezcla de 25% paja de trigo y 75% excrementos de ganado bovino.

El dispositivo empleado funcionando como un biorreactor de tipo batch o discontinuo, significa que el material a fermentar se introduce en el biorreactor y se deja fermentar durante un tiempo hasta considerar que la reacción haya concluido. En ese momento se procede al vaciado de éste. Este tiempo que permanece el sustrato dentro del biorreactor se llama *Tiempo de retención* (TR). Inicialmente, la producción de biogás es baja, y su crecimiento muy lento. Esto sucede porque el crecimiento de la concentración de células también es lento ya que necesitan un tiempo de adaptación. Una vez superada esta fase, el crecimiento celular se produce de forma exponencial, dado que las células disponen de una gran cantidad de alimento. Y la producción de metano sigue la misma tendencia. Cuando el alimento empieza a escasear, la velocidad de reproducción disminuye, y aumenta el número de muertes de células, llegando a equilibrarse el número de muertes con el de nacimiento de nuevas células. A esta fase se le denomina Fase estacionaria. Momento en que la producción de metano vuelve a ser lento y lineal. Finalmente la muerte celular por falta de alimento hace que la producción de metano sea nula.

La cantidad de producto generado por unidad de volumen y tiempo, metano en nuestro caso, es proporcional a la variación de concentración celular ( $X$ ). La constante de proporcionalidad  $Y_{p/x}$  se denomina *rendimiento producto-biomasa*.

$$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = Y_{p/x} \cdot \frac{dX}{dt}$$

Dado que a su vez la variación de concentración celular es proporcional a la concentración de células en un instante dado, se tiene que:

$$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = Y_{p/s} \cdot \mu X$$

La constante  $\mu$  se denomina tasa de crecimiento celular. Desarrollando la variación de concentración celular con el tiempo, se demuestra que la cantidad de producto obtenido (metano) sigue un crecimiento exponencial durante el crecimiento exponencial de los microorganismos. Es por ello que en los biorreactores tipo Batch se busca siempre trabajar en esta fase dado que es la de mayor rendimiento. Para ello, se debe de ajustar el tiempo de retención a la duración de esta etapa.

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \mu X \rightarrow \frac{dX}{X} = \mu \cdot dt \\ \int_{X_0}^X \frac{dX}{X} &= \int_{t_{\text{lag}}}^t \mu \cdot dt \\ \ln \frac{X}{X_0} &= \mu \cdot (t - t_{\text{lag}}) \\ X &= X_0 \cdot e^{\mu(t-t_{\text{lag}})} \end{aligned}$$

$X_0$  representa la concentración celular inicial en el reactor;  $X$  representa la concentración celular en un tiempo  $t$ ,  $t_{\text{lag}}$  es el tiempo de letargo o adaptación celular.

$$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = Y_{p/s} \cdot \mu X_0 \cdot e^{\mu(t-t_{\text{lag}})}$$

$$[\text{CH}_4] = Y_{p/s} \cdot X_0 \cdot (e^{\mu(t-t_{\text{lag}})} - 1)$$

Considerando que el valor de  $Y_{p/s} \cdot X_0$  es despreciable frente al de la exponencial, es decir  $Y_{p/s} \cdot X_0 \ll Y_{p/s} \cdot X_0 \cdot e^{\mu(t-t_{\text{lag}})}$ , se puede representar gráficamente el volumen acumulado obtenido en cada experiencia con el modelo de la ecuación (1), calculando la tasa de crecimiento celular, la productividad del sustrato, el tiempo de retención óptimo para un mayor aprovechamiento de la energía.

$$[\text{CH}_4] = Y_{p/s} \cdot X_0 \cdot e^{\mu(t-t_{\text{lag}})} \quad (1)$$

En la Tabla 11 se muestran los modelos obtenidos para cada uno de los experimentos. Se puede observar que los coeficientes de determinación  $R^2$  se sitúan entre el 0,85 y 0,99, lo que significa que explican entre el 85 y 99% de la variabilidad de la producción de metano por unidad de volumen. La Tasa de crecimiento celular tiene como media global 0,0115.

Se ha realizado un análisis estadístico ANOVA para determinar si existe influencia de los materiales lignocelulósicos sobre las tasas de crecimiento, o más bien este está influenciado por el excremento utilizado. En la Figura 7 se representan los intervalos LSD, donde se observa que todos los materiales proporcionaron tasas de crecimiento celular sin diferencias significativas entre ellos. La Tabla 12 muestra diferentes estadísticos de Tasa de crecimiento ( $\mu$ ) para cada uno de los materiales.

Tabla 11. Ecuaciones producción de metano por kg de sustrato (mezcla se material lignocelulósico, excremento y agua).

Repetición	Material	Ecuaciones	Tasa de crecimiento ( $\mu$ ) horas <sup>-1</sup>
1	Paja (25%)	$y = 0,0021e^{0,0125x}$ $R^2 = 0,9126$	0,0125
2	Paja (25%)	$y = 0,0026e^{0,0121x}$ $R^2 = 0,9666$	0,0121
3	Paja (25%)	$y = 0,0043e^{0,0051x}$ $R^2 = 0,9262$	0,0051
4	Paja (25%)	$y = 0,0021e^{0,0137x}$ $R^2 = 0,9146$	0,0137
5	Paja (25%)	$y = 0,0014e^{0,0119x}$ $R^2 = 0,9125$	0,0119
1	Lechero (33,3%)	$y = 0,0032e^{0,0064x}$ $R^2 = 0,8035$	0,0064
2	Lechero (33,3%)	$y = 0,0036e^{0,0059x}$ $R^2 = 0,8873$	0,0059
1	Lechero (25%)	$y = 0,0052e^{0,0038x}$ $R^2 = 0,7995$	0,0038
2	Lechero (25%)	$y = 0,0006e^{0,0264x}$ $R^2 = 0,8669$	0,0264
1	Arveja (15,6%)	$y = 0,004e^{0,0046x}$ $R^2 = 0,9093$	0,0046
2	Arveja (15,6%)	$y = 0,0025e^{0,006x}$ $R^2 = 0,691$	0,006
1	Maíz (25%)	$y = 0,0008e^{0,0241x}$ $R^2 = 0,908$	0,0241
2	Maíz (25%)	$y = 0,002e^{0,0174x}$ $R^2 = 0,9055$	0,0174
3	Maíz (25%)	$y = 0,0004e^{0,0259x}$ $R^2 = 0,9697$	0,0259
4	Maíz (25%)	$y = 0,0003e^{0,0061x}$ $R^2 = 0,8108$	0,0061
1	Maíz (50%)	$y = 0,0103e^{0,0032x}$ $R^2 = 0,809$	0,0052
2	Maíz (50%)	$y = 0,003e^{0,0087x}$ $R^2 = 0,8854$	0,0087

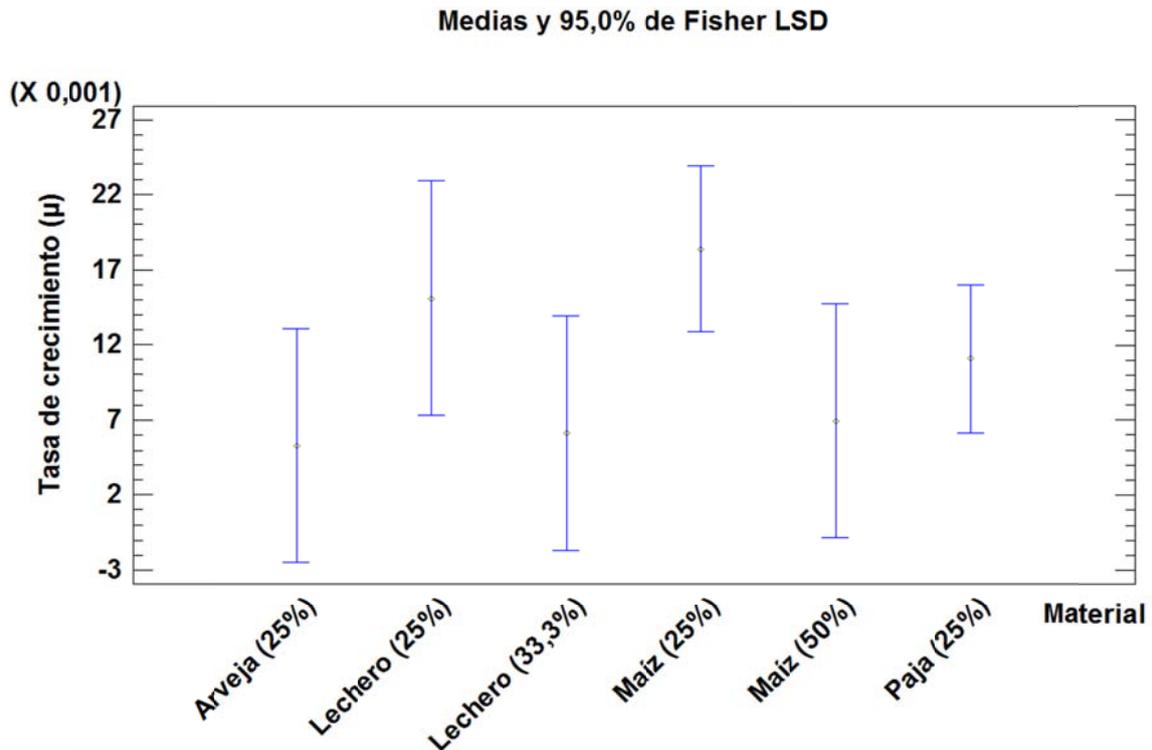


Figura 7. Intervalos LSD y gráfico de medias de las tasas de crecimiento para los diferentes sustratos.

Tabla 12. Resumen estadístico de las tasas de crecimiento  $\mu$  de diferentes sustratos

Material	Promedio horas <sup>-1</sup>	Desv. Estándar	Coef. de Variación	Mínimo	Máximo	Coef. Asimetría	Coef. Curtosis
Arveja (25%)	0,0053	0,000990	18,68%	0,0046	0,006		
Lechero (25%)	0,0151	0,015981	105,83%	0,0038	0,0264		
Lechero (33,3%)	0,0062	0,000354	5,75%	0,0059	0,0064		
Maíz (25%)	0,0184	0,008963	48,78%	0,0061	0,0259	-	0,177581
Maíz (50%)	0,0070	0,002475	35,61%	0,0052	0,0087	0,934797	
Paja (25%)	0,0111	0,003404	30,78%	0,0051	0,0137	-1,81861	1,94141

Tabla 13. Tabla ANOVA tasas de crecimiento.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	F	Valor-P
Entre grupos	0,000391475	5	0,000078295	1,57	0,2484
Intra grupos	0,00054999	11	0,000049999		
Total (Corr.)	0,000941465	16			

La tabla ANOVA el estadístico F es igual a 1,56593, Puesto que el valor-P de la F es mayor que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las

medias de Tasa de crecimiento ( $\mu$ ) entre un nivel de Material y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Los tiempos de retención teóricos se ajustan a la duración de la fase de crecimiento exponencial. Éstos son mostrados en la Tabla 14. Sin embargo, para el estudio de viabilidad vamos a considerar tiempos de retención de 30 días de tal manera que nos aseguramos que se extrae todo el potencial de metano, aunque se tenga que esperar más tiempo.

Tabla 14. Tiempo de retención por experimento.

Repetición	Material	Tiempo de retención (h)	Tiempo de retención medio(h)
1	Paja (25%)	168	<b>206,4</b>
2	Paja (25%)	168	
3	Paja (25%)	264	
4	Paja (25%)	168	
5	Paja (25%)	264	
1	Lechero (33,3%)	504	<b>504</b>
2	Lechero (33,3%)	504	
1	Lechero (25%)	504	<b>324</b>
2	Lechero (25%)	144	
1	Arveja (15,6%)	408	<b>456</b>
2	Arveja (15,6%)	504	
1	Maíz (25%)	144	<b>198</b>
2	Maíz (25%)	144	
3	Maíz (25%)	120	
4	Maíz (25%)	384	
1	Maíz (50%)	504	<b>408</b>
2	Maíz (50%)	312	

Las cantidades de biogás producido durante el TR se muestran en la Tabla 15. A la vista de los resultados, observamos que hay residuos con ciertas proporciones que requieren de más tiempo para su fermentación. El maíz, tiene un gran potencial, puesto que es el cultivo más abundante en ambas parroquias, con una producción de 101,83 l de biogás por hora a una proporción del 50% y el 50% de excrementos, sin embargo es estacional lo que obligaría a la construcción de silos para poder regular la producción de metano durante todo el año. Otro material muy interesante es el lechero, del cual se puede disponer en cualquier momento del año y que en su proporción de 33,3% frente al 67,3% de excremento. La arveja vemos que nos ofrece una producción un poco menor que el maíz y el lechero pero también con muy buenos resultados. La problemática de este cultivo recae en que es poco abundante en ambas parroquias como se puede ver en las Tablas 7 y 8 expuestas anteriormente. La paja de trigo ha obtenido buenos resultados en la producción de biogás, no obstante, ésta

resulta inferior a la de otros cultivos en relación a la masa del sustrato, a pesar de ser un cultivo de gran abundancia y que genera bastantes residuos aprovechables.

Tabla 15. Gas producido durante la fase de crecimiento exponencial para cada cultivo.

Repetición	Material vegetal residual	Tiempo de retención medio(h)	Biogás producido	Media producción (ml)	Producción por hora (l/h)	Producción por kg de sustrato(l biogás/kg)
1	Paja (25%)		11945			
2	Paja (25%)		14690			
3	Paja (25%)	206,4	9555	12487,89	0,06	49,95
4	Paja (25%)		13968			
5	Paja (25%)		12968			
1	Lechero (33,3%)	504	53695	53974,27	0,11	143,93
2	Lechero (33,3%)		54255			
1	Lechero (25%)	324	26230	24163,60	0,07	96,65
2	Lechero (25%)		22260			
1	Arveja (15,6%)	456	22015,05	28424,50	0,06	71,06
2	Arveja (15,6%)		36700			
1	Maíz (25%)		15592,5			
2	Maíz (25%)	198	16605	10709,56	0,05	42,84
3	Maíz (25%)		5800			
4	Maíz (25%)		8760			
1	Maíz (50%)	408	25700	25456,34	0,06	101,83
2	Maíz (50%)		25215			

Para analizar la energía que nos aporta el biogás obtenido de la fermentación se muestra el poder calorífico del metano en la Tabla 16.

Tabla 16. Poder calorífico del metano

	Fórmula	Masa molecular	PCS (kcal/kg)	PC (kcal/kg)l	PCS (kWh/kg)	PCI (kWh/kg)
Metano	CH <sub>4</sub>	16,04	13249	11940	15.40	13.88

(fuente: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>)

Los datos del poder calorífico vienen por unidad de masa, no de volumen, por lo que debemos calcular los moles de biogás generados y acumulados en el gasómetro del experimento. Para ello es necesario conocer la presión a la que se encuentra el gas, su volumen y la temperatura. Para esto, se empleó el principio de Bernoulli, sobre el cual está basado el funcionamiento del gasómetro explicado en la Figura 6.

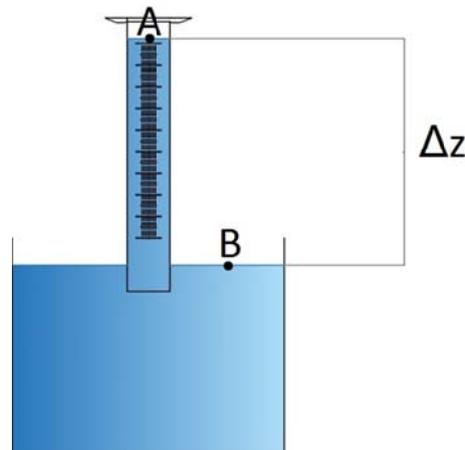


Figura 8. Esquema funcionamiento del gasómetro.

Se debe tener en cuenta que el lugar dónde se desarrolla el experimento está en la cordillera andina, a 2700 metros de altura, por lo tanto la presión atmosférica es de 0,719 atmósferas. El punto A (dónde se acumula el biogás) y el punto B (nivel del agua) tienen ambos la misma presión, es decir, ambos se encuentran a presión atmosférica. Se midió diariamente el incremento de volumen de gas para conocer el volumen generado por día de fermentación y el acumulado y, mediante la ecuación de los gases ideales ( $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ ), se obtuvo el número de moles de biogás que producido en la fermentación. Como el dispositivo experimental cuenta con un filtro de absorción, el gas obtenido está compuesto mayoritariamente por metano, ya que éste elimina el dióxido de carbono. No obstante, por precaución se ha tomado como referencia que el biogás obtenido contiene un 70% de metano y un 30% de dióxido de carbono. A partir de la masa molecular del metano y del dióxido de carbono, conociendo el número de moles obtenidos en la fermentación, se obtuvieron los kilogramos de metano generados en la fermentación para cada substrato. En la Tabla 17 se muestra la media de producción en kg de metano por kg de substrato sujeto del experimento. En esta tabla se tiene en cuenta la producción de metano total del sustrato durante la fermentación de 30 días, que será el tiempo de retención de los biorreactores instalados posteriormente.

Tabla 17. Resumen kg de biogás obtenido en la fermentación de cada sustrato

Repetición	Material vegetal residual	Tiempo de retención total (h)	kg CH <sub>4</sub> /kg sustrato x TDR	Media producción (kg CH <sub>4</sub> /kg sustrato día)	Producción TR 30 días (kg CH <sub>4</sub> /kg sustrato)
1	Paja (25%)	336	0,0183	0,0015	0,0457
2	Paja (25%)		0,0224		
3	Paja (25%)		0,0177		
4	Paja (25%)		0,0206		
5	Paja (25%)		0,0296		
1	Lechero (33,3%)	504	0,0481	0,0023	0,0691
2	Lechero (33,3%)		0,0486		
1	Lechero (25%)	504	0,0353	0,0016	0,0477
2	Lechero (25%)		0,0317		
1	Arveja (15,6%)	456	0,0185	0,0013	0,0377
2	Arveja (15,6%)		0,0308		
1	Maíz (25%)	504	0,0303	0,0010	0,0307
2	Maíz (25%)		0,0319		
3	Maíz (25%)		0,0092		
4	Maíz (25%)		0,0239		
1	Maíz (50%)	504	0,0426	0,0019	0,0560
2	Maíz (50%)		0,0361		

Estos datos han sido contrastados con otros mostrados en varios artículos científicos mostrándose del mismo orden (Zeeman, et al. 1985; Hashimoto, 1986; Hashimoto, 1989; Robbins et al., 1989; Angelidaki y Ahring, 1992; Angelidaki y Ahring, 1993; Trujillo et al., 1993; Angelidaki y Ahring, 1994). El lechero con proporción del 33,3% tiene la mayor producción de metano por kg de sustrato, esta es de 69,1 g CH<sub>4</sub>/kg sustrato. Tomando como valor medio la productividad de biogás de 0,21m<sup>3</sup>/kg SV con una cantidad de sólidos volátiles del 70% se obtiene:

$$\text{Volumen obtenido} = 0,21 \frac{\text{m}^3}{\text{kgSV}} \cdot 0,7 \frac{\text{kgSV}}{\text{kg sustrato}} = 0,147 \text{m}^3 = 147 \text{ litros/kg de sustrato}$$

Aplicando la ecuación general de los gases:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow n = \frac{0,719 \cdot 147}{0,082 \cdot 293} = 4,39 \text{ moles de biogás/kg sustrato}$$

Si el peso molecular del metano es de 16,04 g/mol y su proporción dentro del biogás es del 70%:

$$4,39 \text{ mol biogás} \cdot 16,04 \frac{\text{g biogás}}{\text{mol biogás}} \cdot 0,7 \frac{\text{g CH}_4}{\text{g biogás}} = 49,4 \text{ g CH}_4/\text{kg de sustrato}$$

A continuación, se calcula el potencial de biogás obtenible, optimizando el máximo aprovechamiento de los residuos disponibles. Como ejemplo, se describe los pasos realizados en el cálculo sobre la parroquia de San Lorenzo.

Los estudios de cuantificación indican que el recurso limitante en la fermentación es el excremento de ganado, dado que cada familia posee exclusivamente 4 o 5 vacas. La parroquia de San Lorenzo tiene un potencial de 1929,2 toneladas de residuos de lechero anual que son el recurso con mayor productividad en la fermentación. El segundo material en cuanto a la producción de metano son los residuos de maíz, la parroquia de San Lorenzo dispone de 53884,5 toneladas de residuo de caña de maíz, que la parroquia de San Lorenzo dispone de 1536 toneladas y, en último lugar, la paja de trigo, con una disponibilidad de 1536 toneladas. Las necesidades de mezcla de los distintos materiales con excremento animal son distintas tal que la máxima productividad de metano vendría dado por:

$$\text{Función objetivo: } \max P_{\text{Lechero}} \cdot A + P_{\text{Trigo}} \cdot B + P_{\text{Maíz}} \cdot C$$

dónde: A es la cantidad de lechero empleada en la fermentación, B es la cantidad de residuos de paja de trigo empleada en la fermentación y C es la cantidad disponible de residuos de maíz empleada en la fermentación. Y  $P_{\text{Lechero}}$  es la productividad del sustrato lechero al 33,3%,  $P_{\text{Trigo}}$  es la productividad del sustrato de paja de trigo al 25%, y  $P_{\text{Maíz}}$  es la productividad del sustrato de maíz al 50%. Son los tres sustratos escogidos para el estudio por sus características.

La restricción de que impone la limitación de excremento animal implica que

$$ER_{\text{lechero}} \cdot A + ER_{\text{trigo}} \cdot B + ER_{\text{maíz}} \cdot C \leq CE$$

Donde  $ER_{\text{lechero}}$ ,  $ER_{\text{trigo}}$ ,  $ER_{\text{maíz}}$  son la cantidad de excremento requerido para cada uno de los materiales y CE es la cantidad de excrementos disponibles.

Se siguen los mismos pasos anteriores para la población de San Simón. Los resultados de la optimización se muestran resumidos en la Tabla 18.

Tabla 18. Residuos con aprovechamiento para fermentación San Lorenzo y San Simón.

Parroquia	Material	Cantidad (t)	Excrementos disponibles (t)	Residuo vegetal utilizado (t)	Producción total potencial (kg metano)
San Lorenzo	Lechero (33,3%)	7716,8		1929,2	
	Trigo (25%)	1536	8008,04	0	365.493,50
	Maíz (50%)	53884,5		4144,20657	
San Simón	Lechero (33,3%)	4768,76		551,3	
	Trigo (25%)	1248	4900	0	250.771,16
	Maíz (50%)	26141,8		3795,74465	

Conocidos los kg de metano que se puede obtener a nivel global de ambas poblaciones, se calculó la energía obtenible

Tabla 19. kWh totales con posibilidad de ser producidos en ambas parroquias.

Parroquia	Cantidad metano (kg)	kWh/kg del metano	Total kWh
San Lorenzo	365.493,50	13,88	5.073.049,79
San Simón	250.771,16	13,88	3.480.703,63

Se sabe que el consumo de energía por persona es de 72,5 kWh al mes. En ambas parroquias se considera un tamaño medio de familia de 5 miembros. La población de San Lorenzo es de 1857 personas. Por lo tanto, las necesidades energéticas de esta población es de:

$$(1857 \cdot 72,5 \text{ kWh/mes}) \cdot 12 \text{ meses/año} = 1615590 \text{ kWh/año}$$

Analizando el balance energético, es decir, energía obtenida mediante fermentación de residuos en biorreactor frente a las necesidades del conjunto de la población:

$$5.073.049,79 \text{ kWh/año} - 1.615.590 \text{ kWh/año} = 3.457.459,79 \text{ kWh/año}$$

Existe el potencial suficiente para poder obtener un superávit de 3.457,46 MWh si son aprovechados la totalidad de los residuos.

Se realiza el mismo procedimiento para la población de San Simón. En este caso, al no disponer de los datos del censo y siendo este obtenido por estimación, se considera el número de personas más elevado, se acepta una población de 1250 personas, por tanto, las necesidades energéticas son:

$$(1250 \cdot 72,5 \text{ kWh/mes}) \cdot 12 \text{ meses/año} = 1087500 \text{ kWh/año}$$

Calculando el balance energético energía disponible vs necesidades se tiene que:

$$3.480.703,63 \text{ kWh/año} - 1.087.500 \text{ kWh/año} = 2.393.203,63 \text{ kWh/año}$$

Existe el potencial suficiente para poder obtener un superávit de 2.393,2 MWh.

Los datos de energía aparecen resumidos en la Tabla 20.

Tabla 20. Datos de energía potencial del biogás.

Poblaciones	Energía producida kWh	Energía necesaria kWh	Superávit kWh	Superávit MWh
San Lorenzo	5.073.049,79	1.615.590,00	3.457.459,79	3.457,46
San Simón	3.480.703,63	1.087.500,00	2.393.203,63	2.393,20
Total	8.553.753,42	2.703.090,00	5.850.663,42	5.850,66

En conclusión, ambas parroquias disponen de suficiente material como para producir energía suficiente para autoabastecerse e incluso para vender un extra de energía de 5.850,66 MWh si explotan todo el potencial de los residuos de la zona. Realmente y de forma práctica, es muy difícil obtener toda la energía ya que la ganadería es extensiva y es difícil de obtener el 100% de los excrementos que van produciendo a lo largo del día. No obstante esta información nos indica que aunque se tenga un rendimiento del 50% en la recogida de recursos, es posible suministrar y cubrir las necesidades de ambas poblaciones.

## 7. ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LA COMBUSTIÓN DIRECTA

El calor obtenido de la combustión directa se puede aprovechar tanto en la obtención de agua caliente mediante una caldera o en hornos de cocina adaptados. Las calderas u hornos de cocina, pueden ser alimentadas con astillas de madera de materiales leñosos, como son los residuos procedentes de la chilca y del lechero; o pélets, que podrían ser producidos además de los materiales leñosos también a partir de materiales lignocelulósicos herbáceos como la paja de trigo o caña de maíz.

Se debe tener en cuenta que por las características que presenta la zona de estudio, no es viable la colocación de una caldera de grandes dimensiones que alimente a toda la población, ya que esta se encuentra distribuida de forma muy dispersa y no existe ninguna instalación previa para el transporte de agua caliente o de calor desde un punto central. Además las variaciones en la altura de los poblados distribuidos implicarían el uso de bombas.

## 7.1 Materiales y métodos del análisis de caracterización energética

### a) Proceso de secado

Inmediatamente después a su recogida en campo, las muestras fueron transportadas a una terraza, para analizar su secado al aire libre. En ese mismo momento, y diariamente una porción era llevada a la estufa, dónde se dejaba durante 24 horas a 105°C para determinar la humedad inicial del material. Todo el proceso de medición de humedad se ha realizado siguiendo la norma UNE-EN 14774-3 Determinación del contenido de humedad por el Método de secado en estufa, obteniendo el porcentaje de humedad según la ecuación:

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

Dónde:

$m_1$  es la masa en gramos del plato vacío y la tapa;

$m_2$  es la masa en gramos del plato, la tapa y la muestra antes del secado;

$m_3$  es la masa en gramos del plato, la tapa y la muestra después del secado.

### b) Caracterización proximal

El análisis proximal consistió en la determinación del porcentaje de cenizas, el porcentaje de volátiles y el carbono fijo, siguiendo la norma UNE-EN 14775 2010 para el cálculo de las cenizas y la norma UNE-EN 15148 2010 para la determinación de los volátiles.

Las muestras después de su desecación se colocaron en una mufla siguiendo el progreso de temperaturas y tiempo que la norma UNE hasta alcanzar 550°C, determinando el contenido de cenizas en base seca  $A_d$  por la ecuación:

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

Dónde:

$m_1$  es la masa en gramos del plato vacío;

$m_2$  es la masa en gramos del plato y la muestra;

$m_3$  es la masa en gramos del plato y la ceniza;

$M_{ad}$  es el porcentaje de humedad contenido en la muestra usada para la determinación.

El contenido de volátiles se calculó mediante la aplicación 940º durante 4 min según norma UNE:

$$V_d = \left[ \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} - M_{ad} \right] \times \left( \frac{100}{100 - M_{ad}} \right)$$

Dónde:

$m_1$  es la masa en gramos del crisol vacío y su tapa

$m_2$  es la masa en gramos del crisol, su tapa y la porción de ensayo antes del calentamiento;

$m_3$  es la masa en gramos del crisol, su tapa y su contenido tras el calentamiento;

$M_{ad}$  es el porcentaje de humedad contenido en la muestra usada para la determinación.

El carbono fijo  $CF$  de la muestra, el cual no se puede medir mediante ensayos directos, se obtuvo aplicando la siguiente fórmula:

$$CF = 100 - (V_d + A_d)$$

#### c) Caracterización elemental

Para la determinación del contenido de C, H y N de los distintos materiales se siguió la norma UNE-EN 15104. El aparato utilizado fue el analizador elemental TruSpec CHN de la marca LECO®. Se examinaron 30 muestras para cada especie, realizando dos repeticiones.

El procedimiento para la determinación del contenido de C, H y N fue el siguiente:

1. Se prepararon las muestras de entre 0.1 y 1 g.
2. Se envolvieron en láminas de titanio totalmente inorgánicas. Estas se colocaron en un carrusel de alimentación.
3. El ciclo de análisis consta de tres fases: purga, combustión y análisis.
4. Fase de purga: la muestra cae en el compartimento de carga, queda sellada y se eliminan los gases atmosféricos que entraron desde el exterior junto a la muestra.
5. Fase de combustión: la muestra cae en un compartimento a 950ºC y se inyecta oxígeno para que la combustión sea rápida y completa. Los gases de la combustión pasan a través de un post-quemador a 850 ºC para oxidar y eliminar partículas. Los gases de la combustión se recogen en el ballast (recipiente de recogida de gases).
6. Fase de análisis: A continuación, los gases de la combustión se homogenizan en el ballast. Tomando una alícuota de 3 cm<sup>3</sup> se purgan con helio a través de los detectores de infrarrojos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Los gases del bucle de la alícuota son

transportados al flujo de transporte de helio, a través de cobre caliente para eliminar el O y transformar el NOX a N2. Posteriormente, fluyen a través de los tubos que contienen Lecosorb y Anhidrona con el fin de eliminar el CO2 y H2O. El contenido en N se determina en una célula de conductividad térmica. Los resultados se muestran como porcentaje ó kg/mg.

7. El proceso se repite para todas las muestras.

d) Poder calorífico

El valor del poder calorífico de los materiales lignocelulósicos de cada una de las especies se obtuvo mediante un calorímetro isoperibólico automático LECO® modelo AC500, siguiendo la normativa UNE-EN 14918: 2011.

El valor de poder calorífico de cada muestra se determinó mediante su combustión en un medio controlado a una presión de 3000 kPa. El calor liberado en el proceso fue proporcional al poder calorífico de la muestra analizada. El procedimiento para determinar el poder calorífico de cada muestra fue el siguiente:

1. Cada muestra se preparó con una masa entre 0,1 y 1 g\*.
2. Se introdujo cada muestra en un recipiente de combustión, donde un fusible de alambre que provocaba el encendido. Se añadieron 10 ml de agua destilada en el interior. El recipiente de combustión se cerró herméticamente y se introdujo en su interior oxígeno hasta conseguir una presión de 3.000 kPa. Este recipiente se situaba en una cubeta con agua rodeada de una capa aislante para mantener una temperatura constante. Durante el análisis, la temperatura del agua se mide mediante un termómetro electrónico con una precisión de 1/10.000 de grado. Entre el exterior y el agua que rodea el recipiente de combustión puede haber algún intercambio de energía, por ello, se monitoreó continuamente la temperatura de la cubeta y de la capa aislante, aplicándose una corrección al resultado.
3. La temperatura del agua es medida por un microprocesador cada 6 segundos.
4. La diferencia entre la temperatura del agua antes del encendido y la de después del encendido se procesó a través de software del propio calorímetro.
5. Este procedimiento se repitió en todas las muestras.

\*Antes de analizar las muestras, el calorímetro era calibrado mediante la combustión de un reactivo patrón (ácido benzoico, 1 g) de poder calorífico conocido, proporcionado por el fabricante.

## 7.2 Resultados caracterización energética

### a) Proceso de secado

En la Figura 9 se muestran las curvas de secado de los materiales analizados para ser objeto de un aprovechamiento energético. Como se puede observar existen oscilaciones provocadas por variaciones de humedad ambiental y lluvias durante el proceso de secado. Sin embargo la tendencia decreciente de la humedad sigue una curva parabólica con coeficientes bastante altos, entre el 0,80 y 0,95

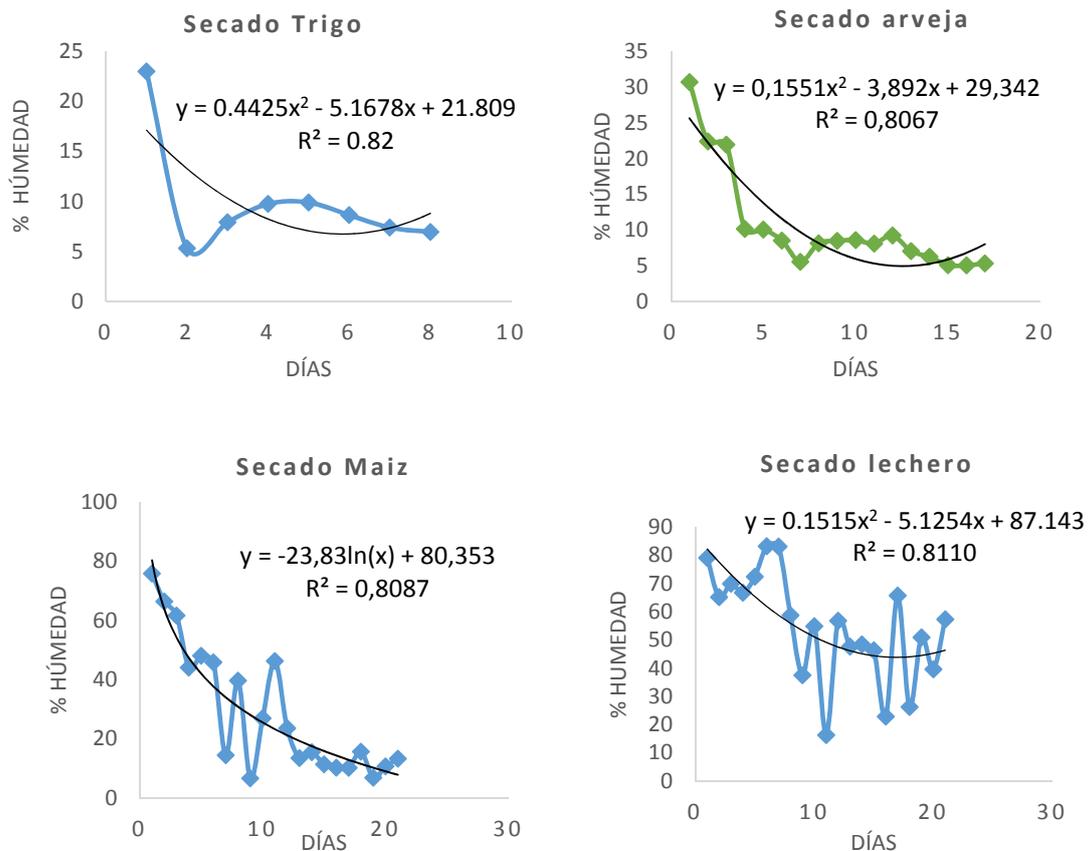


Figura 9. Curvas de variación de humedad en el proceso de secado al aire de los distintos materiales

Como se puede observar en las figuras anteriores, los tiempos necesarios para el secado de la biomasa residual son bastante dispares. El secado más rápido lo experimenta la paja de trigo, llegando a la humedad óptima para combustión en 2 días. La arveja también presenta un secado bastante rápido. Esto se debe a que los residuos de estos dos cultivos son puramente herbáceos. El tiempo de secado del maíz es un tanto más elevado, a pesar de ser una planta que sólo presenta crecimiento primario; las características de su tallo (caña) le otorga una resistencia al secado, ya que la capa exterior de la caña evita que se pierda humedad de forma rápida. No

obstante, los residuos más complicados para su secado son los procedentes del lechero. Ésta planta, procedente de la familia *euphorbiaceae*, contiene en el interior de sus ramas y fuste un líquido blanco y viscoso, que al encontrarse protegido es complicado que se produzca un secado del mismo. Este líquido provoca que el secado de estos residuos sea muy lento y variable. Se puede observar en la curva de secado, que la humedad a los 25 días oscila entre el 20 y el 40%.

#### b) Caracterización proximal

En la Tabla 20 se muestra el análisis proximal para los 4 cultivos sujetos de aprovechamiento energético en base seca.

Tabla 20. Resultados del análisis proximal de los residuos.

	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Carbono fijo (%)
<b>Paja de trigo</b>	3,79	90,28	5,93
<b>Arveja</b>	2,16	82,94	14,9
<b>Maíz</b>	1,24	80,51	18,25
<b>Lechero</b>	4,14	74,14	19,72

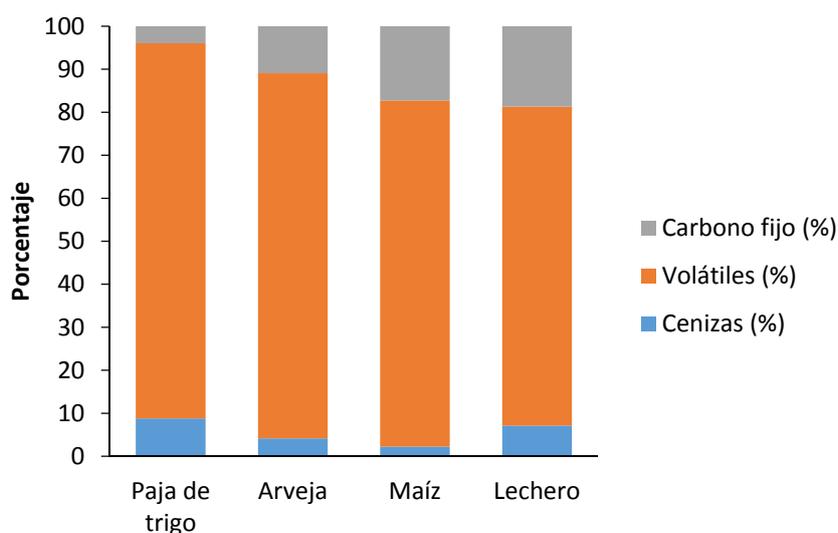


Figura 16. Gráfico resumen análisis proximal.

Según los resultados de la caracterización proximal, el lechero es el material que contiene el mayor porcentaje de cenizas, seguido de la paja de trigo. En principio esto supone una desventaja para su peletización. La arveja tiene un contenido bajo. El maíz contiene un 1,24% de cenizas, un contenido muy bajo, por lo tanto óptimo para su consideración como posible uso para la peletización, además de ser el residuo mayoritario de la zona de estudio. El contenido de volátiles es el normal dentro del material vegetal, rondando en todos un porcentaje que oscila entre el 74-85%. El

carbono fijo es la parte que no es volátil y que se quema en estado sólido. En los materiales del estudio su porcentaje ronda entre el 10 y el 18%.

### c) Caracterización elemental y poder calorífico

Se ha realizado un estudio estadístico de los resultados del análisis elemental de los materiales, que también han sido sujetos de experimentación como mezcla en el sustrato destinado a la fermentación anaerobia. Se puede observar que el coeficiente de asimetría y de curtosis se encuentra dentro de los límites de -2 y +2, por tanto, se puede considerar que los parámetros se distribuyen como poblaciones normales

Tabla 11. Análisis estadístico de las variables del análisis elemental para cada especie.

	Especie	Media	Desviación típica	Coefficiente de asimetría estándar.	Coef. de curtosis estándar.	Máx.	Mín.
PC (kcal/kg)	Arveja	4173,03	1,59478	0,801	0,85	4174,8	4171,7
	Lechero	4135,7	160,181	1,029	0,23	4317,3	4014,5
	Maíz	3814,95	105,005	1,020	-0,32	3889,2	3740,7
	Paja	2987,52	2,500	-0,061	0,24	2990	2985
C %	Arveja	43,20	0,7	0,364	0,52	43,9	42,5
	Lechero	42,57	0,404145	0,511	0,13	43,0	42,2
	Maíz	41,40	0,608276	1,188	-0,32	42,1	41
	Paja	40,97	0,945163	-0,983	0,36	41,7	39,9
H %	Arveja	7,3067	0,08737	1,740	0,15	7,38	7,21
	Lechero	6,9767	0,2324	-1,284	0,36	7,24	6,8
	Maíz	6,94	0,3306	-0,429	-0,39	7,3	6,65
	Paja	6,5167	0,2157	-1,303	0,26	6,67	6,27
N %	Arveja	0,66	0,100	-0,096	0,85	0,758	0,559
	Lechero	1,12	0,210	1,113	0,83	1,36	0,97
	Maíz	1,309	0,467	-0,075	-0,39	1,77	0,837
	Paja	-0,040	0,067	0,299	0,27	0,03	-0,103
S %	Arveja	0,525	0,136	0,36	0,88	0,6212	0,4284
	Lechero	0,356	0,107	-0,212	0,87	0,4588	0,2451
	Maíz	0,385	0,006	-1,230	-0,58	0,3891	0,3806
	Paja	0,588		0,366	0,25	0,5878	0,5878

PC: poder calorífico; C: carbono; H: hidrógeno; N: nitrógeno; S: azufre.

## 8. VIABILIDAD DE LA INSTALACIÓN DE FERMENTADORES ANAEROBIOS

El objetivo de este apartado es realizar una valoración de los costes que supone la construcción de plantas de biodigestión y las instalaciones necesarias para la aplicación de calderas.

### 8.1 Inversión de planta de fermentación familiar

Cada unidad doméstica necesita 362,5 kWh mensuales de consumo de gas para cocina y ACS. Para calcular cuánto sustrato se debe fermentar para cubrir tales necesidades, se consideran unas necesidades un 15% por encima de la energía empleada por unidad doméstica, resultando  $362,5 \times 1,15 = 416,88$  kWh/mes. Se procede a evaluar cada una de las materias primas disponibles:

- Lechero (33,3%)

La productividad del lechero es de 0,0023 kg de metano por 1kg de sustrato por día (mezcla de lechero, excremento bobino y agua). Si el tiempo de retención es de 30 días, la producción es de 0,0691 kg de metano por kg de sustrato. Esto supone 0,96 kWh de energía por kg de sustrato. Por lo tanto se precisas 434,72 kg de sustrato por mes para cubrir las necesidades energéticas necesarias que cubra las necesidades de cada unidad doméstica:

$$\frac{416,88\text{kWh/mes}}{0,96\text{kWh/kg}} = 434,72\text{kg/mes}$$

La densidad media de los sustratos probados es de 1055kg/m<sup>3</sup>. El volumen del reactor viene dado por:  $434,72/1055 = 0,412$  m<sup>3</sup>.

Se requiere de un biorreactor de 412,06 litros de capacidad. Se trabajará con un biorreactor de 600 litros. El sustrato necesario está formado por: 116 kg de excrementos, 58 kg de lechero y 261 litros de agua.

- Maíz (50%)

La productividad del maíz con un tiempo de retención de 30 días es de 0,056 kg de metano por kg de sustrato. Por lo tanto por cada kg de sustrato introducido en el biorreactor, se van a obtener 0,777 kWh de energía. Esto significa que para cubrir las necesidades energéticas son necesarios:

$$\frac{416,88\text{kWh/mes}}{0,777\text{kWh/kg}} = 536,02\text{kg/mes}$$

Cada ciclo de fermentación requiere el uso de 536,02 kg de sustrato. Esto supone: 321,61kg de agua y 107,2 kg de excrementos y 107,2 kg de restos de caña de maíz triturados. El volumen del biorreactor, siendo la densidad del sustrato 1055kg/m<sup>3</sup>, es de 508 litros. Para el maíz también se empleará un biorreactor de 600 litros de capacidad. Además de otorgar una mayor comodidad en el trabajo, se observa que para ambos sustratos se requiere el mismo volumen de reactor a efectos prácticos, con lo cual la población disfruta de mayor libertad para escoger según sus comodidades cualesquiera de los dos sustratos.

Tabla 21. Proporciones de los componentes por kg de sustrato estudiadas.

Sustrato	kg sustrato	Excrementos(kg)	Material vegetal(kg)	Agua (kg)
<b>Lechero 33,3%</b>	1	0,2667	0,1333	0,6
<b>Maíz 50%</b>	1	0,2	0,2	0,6

La cantidad de metano producida para obtener 416,875 kWh es de:

$$\frac{416,875 \text{ kWh}}{13,88 \text{ kWh}} = 30,034 \text{ kg de CH}_4$$

$$\frac{30,034 \text{ kg de CH}_4 \cdot 1000}{16,04 \text{ gCH/mol}} = 1872,45 \text{ moles de CH}_4$$

Los moles de CH<sub>4</sub> son el 70% de los moles totales, por tanto:

$$\text{N}^\circ \text{ moles de biogás} = \frac{1872,45 \text{ moles de CH}_4}{0,7} = 2674,92 \text{ moles de biogás}$$

Aplicando la ecuación de los gases se obtiene el volumen total de biogás que saldrá del biorreactor:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow V = \frac{2674,94 \cdot 0,082 \cdot 293}{0,719} = 89385,4\text{l}$$

Dónde:

P es la presión atmosférica en atmósferas, a 2700 metros de altitud; V es el volumen de biogás en litros; n, el n<sup>o</sup> de moles; R es la constante universal de los gases; y T es la temperatura en grados kelvin.

Se desea trabajar a la presión a la que se encuentran las bombonas de gas convencionales, esta presión es de 5 bares, equivalente a 4,93462 atmósferas. Se tiene en consideración que solo el 70% de los moles van a ser de CH<sub>4</sub>. Por tanto, el volumen que ocupará el gas, es de:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow V = \frac{2674,94 \cdot 0,6 \cdot 0,082 \cdot 289}{4,93462} = 13023,921$$

Las cifras del volumen obtenido son indicativas ya que no se va a disponer de todo el volumen al mismo tiempo, ya que el biogás generado va consumiéndose mientras se va generando. Este volumen calculado es el que se obtendría si solo hubiera flujo de entrada en el gasómetro con un flujo de salida =0.

- Análisis de costes instalación familiar:

El coste de gas propano actualmente utilizado se estima en 0,13 \$/kWh. A partir de ahí se puede estimar el valor máximo admisible de la inversión  $V_i$ . Los costes vienen definidos por los costes de amortización, los costes de mantenimiento y los costes de mano de obra.

El valor residual  $V_R$  se considera como el 10% del valor de la inversión, y la vida útil se estima en 15 años x 365 días x 24 h = 131400 horas. De tal manera que el coste de amortización se calcula como:

$$\text{Costes de amortización } (\$/h) = \frac{V_i - V_R}{V_{\text{util}}} = \frac{V_i - 0,1 \cdot V_i}{V_{\text{util}}} = \frac{0,9 \cdot V_i}{V_{\text{util}}} = \frac{0,9 \cdot V_i}{131400}$$

Los costes anuales de mantenimiento se consideran el 5 % del valor de la inversión, tal que:

$$\text{Costes de mantenimiento } (\$/h) = \frac{0,05 \cdot V_i}{365 \cdot 24}$$

Los costes de mano de obra se estiman el 1 h mensual a un coste de 10\$/h, tal que

$$\text{Costes de mano de obra } (\$/h) = \frac{10 \cdot 1}{30 \cdot 24} = 0,014 \text{ } \$/h$$

Los costes máximos de energía vendrán dados por:

$$\text{Costes de energía} = \frac{\frac{0,9 \cdot V_i}{131400} + \frac{0,05 \cdot V_i}{365 \cdot 24} + 0,014}{416,88/(30 \cdot 24)} < 0,13 \text{ \$/kWh}$$

Resultando  $V_i < 4848,64 \text{ \$}$

Como se estima el valor de la instalación de fermentación unifamiliar (Calentador de agua ACS más digestor) en 2200\$, el proyecto resulta viable.

Para una inversión de 2200 \$, el coste energético resulta:

$$\text{Costes de energía} = \frac{\frac{0,9 \cdot 2200}{131400} + \frac{0,05 \cdot 2200}{365 \cdot 24} + 0,014}{416,88/(30 \cdot 24)} = 0,072 \text{ \$/kWh}$$

La instalación a nivel familiar resulta rentable ya que  $0,072 \text{ \$/kWh} > 0,13 \text{ \$/kWh}$ . Se calcula a partir de cuantos kWh resulta rentable la inversión en la instalación para el cambio de matriz energética.

$$\text{kWh para rentabilización} = \frac{2200}{0,13 - 0,072} = 38.058,5 \text{ kWh}$$

Cada digestor proporciona mensualmente 416,88 kWh de energía, que suponen 5002,5 kWh/año. Sabiendo esto, se estima la cantidad de años necesarios para que la inversión sea rentabilizada.

$$\text{Años para rentabilización de la inversión} = \frac{38.058,5 \text{ kWh}}{5002,5} = 7,6 \text{ años}$$

La instalación familiar del biodigestor comenzará a reportar un ahorro de 0,058 \$/kWh a partir de los 7,6 años, suponiendo esto un ahorro anual de 290,15\$ para cada unidad doméstica.

## 8.2 Inversión de planta de fermentación a nivel poblado (50 personas).

En este apartado, se va a realizar el estudio de los costes que supondría la creación de un biorreactor que actuara a nivel de poblado. Se ha considerado una población media por poblado de unas 50 personas, más aparte la población que se concentra en el centro parroquial de San Simón y San Lorenzo. Los poblados con 50 personas tienen un consumo mensual de 3625kWh considerando un 15% por encima del consumo calculado: 4168,75kWh. En las Tablas 22 y 23, se muestra el consumo de energía,

material necesario de cada sustrato, biogás producido, volumen del reactor, volumen del acumulador de gas según el número de personas que se benefician de las instalaciones del biorreactor.

Tabla 22. Sustrato Lechero (33,3%).

Nº Personas	Energía	kg sustrato	Excrementos (kg)	Lechero (kg)	Agua (l)	Volumen reactor (l)
1	83,4	86,9	23,2	11,6	52,2	82,4
2	166,8	173,9	46,4	23,2	104,3	164,8
3	250,1	260,8	69,6	34,8	156,5	247,2
4	333,5	347,8	92,7	46,4	208,7	329,6
5	416,9	434,7	115,9	58,0	260,8	412,1
6	500,3	521,7	139,1	69,6	313,0	494,5
7	583,6	608,6	162,3	81,1	365,2	576,9
8	667,0	695,6	185,5	92,7	417,3	659,3
9	750,4	782,5	208,7	104,3	469,5	741,7
10	833,8	869,4	231,9	115,9	521,7	824,1
20	1667,5	1738,9	463,7	231,9	1043,3	1648,2
30	2501,3	2608,3	695,6	347,8	1565,0	2472,3
40	3335,0	3477,8	927,4	463,7	2086,7	3296,5
50	4168,8	4347,2	1159,3	579,6	2608,3	4120,6
60	5002,5	5216,6	1391,1	695,6	3130,0	4944,7
70	5836,3	6086,1	1623,0	811,5	3651,6	5768,8
80	6670,0	6955,5	1854,8	927,4	4173,3	6592,9
90	7503,8	7824,9	2086,7	1043,3	4695,0	7417,0
100	8337,5	8694,4	2318,5	1159,3	5216,6	8241,1
200	16675,0	17388,8	4637,0	2318,5	10433,3	16482,3
300	25012,5	26083,2	6955,5	3477,8	15649,9	24723,4
400	33350,0	34777,6	9274,0	4637,0	20866,5	32964,5
500	41687,5	43471,9	11592,5	5796,3	26083,2	41205,6
600	50025,0	52166,3	13911,0	6955,5	31299,8	49446,8
700	58362,5	60860,7	16229,5	8114,8	36516,4	57687,9
800	66700,0	69555,1	18548,0	9274,0	41733,1	65929,0
900	75037,5	78249,5	20866,5	10433,3	46949,7	74170,1
1000	83375,0	86943,9	23185,0	11592,5	52166,3	82411,3

Según la Tabla 22, si se usa el lechero en codigestión se requiere la fermentación de 4347,2 kg de sustrato por mes, están compuestos por: 1160kg de excrementos; 560kg de lechero triturado; y 2609 litros de agua. El volumen del reactor es de 4120 litros, se considera el uso de un biorreactor de 5000 litros. En la cabecera parroquial tanto de San Simón como de San Lorenzo, formadas ambas por una población media de alrededor de 500 personas. En estas poblaciones, dónde la concentración de personas es mayor, el consumo de energía mensual, es de 41687,5 kWh, la cantidad de sustrato

mensual necesario es de 43471,94 kg. El volumen mínimo del reactor es de 41205,62 litros.

Tabla 23. Sustrato 50% maíz + 50% excremento.

Nº Personas	Energía	kg sustrato	Excrementos (kg)	Maíz (kg)	Agua (l)	Volumen (l)
1	83,4	86,9	17,4	17,4	52,2	82,4
2	166,8	173,9	34,8	34,8	104,3	164,8
3	250,1	260,8	52,2	52,2	156,5	247,2
4	333,5	347,8	69,6	69,6	208,7	329,6
5	416,9	434,7	86,9	86,9	260,8	412,1
6	500,3	521,7	104,3	104,3	313,0	494,5
7	583,6	608,6	121,7	121,7	365,2	576,9
8	667,0	695,6	139,1	139,1	417,3	659,3
9	750,4	782,5	156,5	156,5	469,5	741,7
10	833,8	869,4	173,9	173,9	521,7	824,1
20	1667,5	1738,9	347,8	347,8	1043,3	1648,2
30	2501,3	2608,3	521,7	521,7	1565,0	2472,3
40	3335,0	3477,8	695,6	695,6	2086,7	3296,5
50	4168,8	4347,2	869,4	869,4	2608,3	4120,6
60	5002,5	5216,6	1043,3	1043,3	3130,0	4944,7
70	5836,3	6086,1	1217,2	1217,2	3651,6	5768,8
80	6670,0	6955,5	1391,1	1391,1	4173,3	6592,9
90	7503,8	7824,9	1565,0	1565,0	4695,0	7417,0
100	8337,5	8694,4	1738,9	1738,9	5216,6	8241,1
200	16675,0	17388,8	3477,8	3477,8	10433,3	16482,3
300	25012,5	26083,2	5216,6	5216,6	15649,9	24723,4
400	33350,0	34777,6	6955,5	6955,5	20866,5	32964,5
500	41687,5	43471,9	8694,4	8694,4	26083,2	41205,6
600	50025,0	52166,3	10433,3	10433,3	31299,8	49446,8
700	58362,5	60860,7	12172,1	12172,1	36516,4	57687,9
800	66700,0	69555,1	13911,0	13911,0	41733,1	65929,0
900	75037,5	78249,5	15649,9	15649,9	46949,7	74170,1
1000	83375,0	86943,9	17388,8	17388,8	52166,3	82411,3

El coste de gas propano actualmente utilizado se estima en 0,13 \$/kWh. A partir de ahí se puede estimar el valor máximo admisible de la inversión  $V_i$ . Los costes vienen definidos por costes de amortización, costes de mantenimiento y costes de mano de obra.

Donde el valor residual  $V_R$  se considera como el 10% del valor de la inversión y la vida útil 15 años x 365 días x 24 h = 131400 horas. Por tanto, el coste de la amortización viene dado por:

$$\text{Costes de amortización (\$/h)} = \frac{V_i - V_R}{V_{\text{util}}} = \frac{V_i - 0,1 \cdot V_i}{V_{\text{util}}} = \frac{0,9 \cdot V_i}{V_{\text{util}}} = \frac{0,9 \cdot V_i}{131400}$$

Los costes anuales de mantenimiento se consideran el 5 % del valor de la inversión, tal que:

$$\text{Costes de mantenimiento (\$/h)} = \frac{0,05 \cdot V_i}{365 \cdot 24}$$

Los costes de mano de obra se estiman en 4 h diarias a un coste de 8 \$/h, trabajando los 20 días laborales al mes para el operario que se encargue de la supervisión del biodigestor y su vaciado y recarga.

$$\text{Costes de mano de obra (\$/h)} = \frac{8 \cdot 4 \cdot 20}{30 \cdot 24} = 0,89 \text{ \$/h}$$

$$\text{Valor máximo de inversión} = \frac{\frac{0,9 \cdot V_i}{131400} + \frac{0,05 \cdot V_i}{365 \cdot 24} + 0,89}{416,88/(30 \cdot 24)} \leq 0,13 \text{ \$/kWh}$$

$$\text{Resultando } V_i < -10866,192 \text{ \$}$$

Este coste de la mano de obra hace inviable la posibilidad de producir biogás a mayor escala que la familiar. No obstante, en este estudio de viabilidad y por el carácter informativo, se va a realizar también el estudio teniendo en cuenta exclusivamente los costes de mano de obra de llenado y vaciado del biorreactor. Entonces, estimándose en 8 horas mensuales para la carga, descarga y puesta en marcha del material. El sustrato es proporcionado por la gente del poblado.

$$\text{Costes de mano de obra (\$/h)} = \frac{8 \cdot 10}{30 \cdot 24} = 0,12 \text{ \$/h}$$

Los costes máximos de energía vendrán dados por:

$$\text{Valor máximo inversión} = \frac{\frac{0,9 \cdot V_i}{131400} + \frac{0,05 \cdot V_i}{365 \cdot 24} + 0,12}{4168,75/(30 \cdot 24)} < 0,13 \text{ \$/kWh}$$

$$V_i < 50772,55 \text{ \$}$$

La instalación de la planta de biogás a nivel poblado incluye:

Tabla 24. Instalación planta biogás nivel poblado.

Maquinaria	Características	Precio (\$)
Biodigestor	V=5000l Acumulador de PVC	25000
Calentadores (10 familias)	200 USD por unidad	2000
Instalación gas	Obra para conectar viviendas. Instalación de acumuladores.	10000
<b>Valor Inversión</b>		<b>37000 USD</b>

Como se estima el valor de la instalación de fermentación a escala de poblado en 37000\$, el proyecto resulta viable. Para una inversión de 37000\$, el coste energético resulta:

$$\text{Costes de energía} = \frac{0,9 \cdot 37000}{4168,75 / (30 \cdot 24)} + \frac{0,05 \cdot 37000}{365 \cdot 24} + 0,12 = 0,1 \$/\text{kWh}$$

El precio de la energía indica una ventaja del sistema de fermentación frente a la utilización del gas propano, ya que  $0,1 \$/\text{kWh} < 0,13 \$/\text{kWh}$ . No obstante, si se analiza el tiempo en que se amortiza la inversión requerida se observa que ésta se prolonga a 24,6 años.

Años de amortización de la inversión:

$$\frac{37000 \$}{(0,13 \$/\text{kWh} - 0,1 \$/\text{kWh}) \cdot 4168,75 \text{ kWh/mes} \cdot 12 \text{ años}} = 24,6 \text{ años}$$

Dado que la vida útil de la instalación de biogás se estima en 15 años se constata que la inversión no resulta viable cuando se planifica para el abastecimiento de un poblado de 50 personas. Únicamente resulta rentable la instalación familiar a pequeña escala o podría resultar rentable una instalación totalmente voluntaria, ya que ahorrándose los costes de mano de obra el precio del kWh se obtiene a 0,08 \$, adelantándose la rentabilidad hasta los 15 años. Suponiendo que la instalación sea capaz de resistir un par de años más, el ahorro puede ser de 2500\$ anuales, aproximadamente unos 250\$ por familia.

### 8.3. Inversión de planta de fermentación a nivel parroquial

En las cabeceras parroquiales dónde la demanda es superior se considerará la mano de obra de 1 supervisor con un coste de 8 \$/h con un turno 8 horas diarias los 20 días laborales. El coste de mano de obra se obtiene de la ecuación:

$$\text{Costes de mano de obra (\$/h)} = \frac{8 \cdot 8 \cdot 20}{30 \cdot 24} = 1,78 \text{ \$/h}$$

Siguiendo el mismo procedimiento que en los casos anteriores, el valor de la inversión máxima admisible es de 454967,7 USD. El coste de la inversión viene desglosado en la Tabla 25.

Tabla 25. Valor inversión parroquias.

Maquinaria	Características	Precio unitario	Precio total
Instalación Biodigestor	V=50m <sup>3</sup> Acumulador de PVC	200000	200000
Calentador	200 USD por unidad	200	20000
Instalación gas	Obra para conectar viviendas.	100000	100000
Valor Inversión			320000USD

El coste de la energía es de 0,101\$/kWh < 0,13 \$/kWh, por lo tanto la inversión es amortizada a los 22 años. Considerando una vida útil de 15 años, la instalación de la planta a para la cabecera parroquial tampoco resulta viable. Si se considera que la instalación tiene una vida útil mayor a 22 años, si cabría realizar la inversión.

Como conclusión, el uso de la energía de biogás obtenida, resulta rentable para la instalación familiar. Al tratarse de una zona rural, se dispone de fácil acceso a los elementos del sustrato necesario. Las instalaciones de mayor tamaño no resultan rentables si el único propósito de autoabastecer a la población local. No obstante, podría considerarse la comercialización del gas excedente, creando grandes plantas de digestores lo que mejoraría la viabilidad.

## 9. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE COMBUSTIÓN DIRECTA

El objetivo de este apartado, es calcular el coste que supondría el uso del material residual en combustión en una caldera. Los materiales leñosos podrán utilizarse directamente en forma de astillas, lo materiales herbáceos requerirán una peletización previa.

### 9.1 Instalación de calderas de astillas

El consumo energético de agua caliente sanitaria (ACS) y de gas para cocina de cada habitante fue estimado en 72,5kWh mensuales. Considerando exclusivamente el uso de la caldera para producción de ACS, se determinó un consumo de una bombona de propano por mes para una familia media de 4 miembros, esto equivale a 193,32kWh, que por persona son 48,33kWh. El tamaño medio de familia estudiado se sitúa en torno a 5 miembros, por tanto, el consumo por familia de ACS es de 241,65kWh. Si se

aumenta un 15% para tener seguridad energética obtenemos unas necesidades térmicas mensuales de 278kWh para la producción de ACS.

El caudal mínimo instantáneo establecido por las normas de edificación para ACS se establecen en 0,2 l/s (Código Técnico de la Edificación de España), por tanto, considerando un consumo de agua caliente fraccionado en 4 periodos de 20 min de tiempo pico de demanda al día, el total del agua necesaria para cubrir las necesidades del tiempo pico es de:  $0,2\text{l/s} \cdot 60\text{s/min} \cdot 20\text{min} = 240$  litros

Se requiere un acumulador con capacidad mínima de 240 litros. Para un periodo de funcionamiento de la caldera en periodos de 2 h para llenar el acumulador en horas valle, calentamiento de agua de 5 a 60°C y un rendimiento de la caldera de 0,8, se calcula la potencia de la caldera requerida.

$$\text{Caudal agua de caldera} = \frac{240}{2 \cdot 3600} = 0,033\text{l/s}$$

$$Q_c = \frac{0,033\text{l/s} \cdot 4,18\text{kJ/kg} \cdot (60 - 5)^\circ\text{C}}{0,8} = 9,58\text{kW}$$

Se necesita una caldera de 9,58 kW para suministrar la energía de ACS necesaria para cada unidad doméstica. Funcionando 8 h/día, es decir 240 h al mes, las necesidades de astillas es de:

$$\text{Consumo mensual astilla} = \frac{Q_c}{PC_{\text{combustible}}} \cdot \frac{9,58\text{kW}}{4,433\text{kWh/kg}} \cdot 8\text{h/día} \cdot 30\text{días/mes} = 518,6$$

kg/mes familia

Los costes de transporte para distribución de los materiales entre las calderas de los poblados, se estima en 0,12 \$/km. En cada viaje se transportan aproximadamente 5 toneladas de astilla, lo que equivale a un abastecimiento de 9 familias. Considerando que la distancia recorrida en un abastecimiento son como máximo 25 km (contado ida y vuelta) los costes de transporte se estiman en:

$$\text{Costes de transporte de material} = \frac{25 \cdot 0,12}{278 \cdot 9} = 0,0012\$/\text{kWh}$$

La mano de obra en cada instalación se considera nula, ya que cada familia se encarga de su propia instalación, y el transporte incluye el llenado del silo de materia prima.

Costes de mano de obra (\$/h)=0

El valor de la inversión admisible para una familia viene dado por:

$$\text{Costes de energía} = \frac{0,9 \cdot V_i}{278/(30 \cdot 24)} + \frac{0,05 \cdot V_i}{8760} + 0,0012 \leq 0,13 \text{ \$/kWh}$$

$$V_i < 3938,04\$$$

La inversión familiar se resume en la Tabla 26.

Tabla 26. Desglose valor de inversión uso de caldera familiar.

Instalación	Descripción	Precio USD	
Caldera 10 kW policombustible	Potencia nominal (kW)	10,1	
	Rendimiento a Potencia nominal (%)	93,5	
	Potencia carga parcial (kW)	2,9	
	Potencia eléctrica	485W	
	Tª retorno mínima	25°C	2800 USD
	Tiro mín. chimenea (Pa)	10	
	Tiro max. chimenea (Pa)	20	
	Vol. Cámara de agua (l)	46	
	Combustible al 100% (kg)	2,3	
	Peso (kg)	190	
Silo metálico	Largo mm	1000	
	Ancho mm	1000	
	Altura mm	1485	491 USD
	Capacidad (kg)	450-650	
Deposito acumulador agua Lapesa Coral Vitro	Modelo	Cv200	
	Capacidad	200l	530 USD
		Total Inversión	3821 USD

El valor total de la inversión por cada caldera familiar es de 3821USD, por tanto el precio de la energía con el uso de caldera se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$\text{Precio energía} = \frac{0,9 \cdot 3821}{278/(30 \cdot 24)} + \frac{0,05 \cdot 3821}{8760} + 0,0012 = 0,129\$/\text{kWh} \approx 0,13\$/\text{kWh}$$

Siendo el precio de la energía tradicional de 0,13 \$/kWh y el precio de la energía de la instalación familiar de 0,129\$/kWh no se contempla una rentabilidad muy notable, pero los beneficios medioambientales para la zona que aportaría el cambio de propano a astillas hace interesante el aprovechamiento energético de estas. Si en lugar del empleo de silos de almacenamiento, se estudia la opción de que el transporte realice un reparto de astillas en sacos y la carga de la caldera se realice de forma manual, se observa que el coste de inversión disminuye hasta los 3330 \$, suponiendo esto una disminución del precio de la energía hasta los 0,11 \$/kWh. Las astillas de madera tienen un poder calorífico de entre 3,4 y 4 kWh/kg, y se encuentran a una humedad que ronda entre el 20 y el 30%. El precio de recogida y astillado de la madera se estima en los 25 y 20\$/t respectivamente, por tanto al precio de la energía obtenido de la instalación, hay que sumarle el coste de producción de la astilla, el cual es:

$$\text{Precio producción astilla} = \frac{(20\$/t + 25\$/t)}{1000 \text{ kg/t} \cdot 3,4 \text{ kWh/kg}} = 0,013\$/\text{kWh}$$

Si se omite la instalación de silos y la carga de astillas en la caldera se realiza de forma manual, el precio de la energía definitivo se queda en 0,123\$/kWh, el cual deja un margen demasiado escaso como para amortizar el valor de la inversión, por tanto, se procede al cálculo de una instalación a mayor escala, la instalación a nivel poblado.

El valor de la inversión admisible para un poblado de 10 familias sería 10 veces mayor. Es decir 39380,4 USD. En el caso de la instalación centralizada, se requiere del uso de un silo de almacenamiento obligatoriamente para que la instalación pueda autoabastecerse durante un mes como mínimo. Se va a considerar para el cálculo de la instalación que no se trata de un sistema estacionario, sino que hay variaciones de demanda a lo largo del día, surgiendo horas de consumo pico y horas valle, se obliga entonces a la instalación de un sistema con acumulador, dónde en las horas valle se aproveche el superávit de energía para compensar las horas pico, almacenándose esta energía en el acumulador. Se va a considerar una demanda de 90 litros por persona y día de ACS, según aparece en la Tabla 27.

Tabla 27. Cuadro para los cálculos de P y V.

Tipo de edificio	Necesidades ACS	Demanda punta horaria	hv (duración periodos valle)(h)	hp (duración periodos valle)(h)	Hv (horas/día valle)	Hp (horas/día punta)	H (horas al día)
Viviendas	60-120 litros por persona y día	1/10G	4	2	12	6	18

En instalaciones centralizadas, en general, se debe limitar la temperatura de almacenamiento a 60°C, debiendo distribuirse a una temperatura máxima de 50°C medidos a la salida del depósito acumulador.

El gasto diario de agua (G) para la población media de los poblados de 50 personas es de 4500 litros de ACS. Se considera un funcionamiento de la caldera de 18 horas diarias. Por tanto, el caudal medio de los periodos puntas y periodos valle es de:

$$\dot{m}_p = \frac{1}{10} \cdot 4500 = 450 \text{ l/h} = 450 \cdot \frac{1}{3600} = 0,125 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_v = \frac{G - \dot{m}_p \cdot H_p}{H - H_p} = \frac{4500 - 450 \cdot 6}{18 - 6} = 150 \text{ l/h} = 0,042 \text{ kg/s}$$

Dónde:

$\dot{m}_p$  = flujo másico consumido en las horas pico.

$\dot{m}_v$  = flujo másico consumido en las horas valle.

La potencia de la caldera necesaria es de:

$$Q_c = 4,18 \cdot \frac{T_s - T_e}{t_v + t_p} \cdot (\dot{m}_p \cdot t_p + \dot{m}_v \cdot t_v) = 4,18 \cdot \frac{60 - 5}{14400 + 7200} \cdot (0,125 \cdot 7200 + 0,042 \cdot 14400) = 16,02 \text{ kW}$$

El caudal de régimen de la caldera ( $\dot{m}_c$ ) viene dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_p \cdot t_p + \dot{m}_v \cdot t_v}{t_p + t_v} = \frac{0,125 \cdot 7200 + 0,042 \cdot 14400}{7200 + 14400} = 0,07 \text{ kg/s}$$

El volumen de agua almacenado en el acumulador durante las horas valle será de:

$$\dot{m}_{\text{Entrada acumulador}} = 0,07 - 0,042 = 0,028 \text{ kg/s}$$

El volumen suministrado por el acumulador durante las horas pico es de:

$$\dot{m}_A = 0,125 - 0,07 = 0,055 \text{ kg/s}$$

El volumen mínimo del acumulador es de:

$$V_A = 0,055 \text{ kg/s} \cdot 7200 = 396 \text{ litros}$$

Durante el ciclo normal producción-acumulación se calcula en un 15% las pérdidas de calor por difusión en la caldera y circuito primario, mientras que tal pérdida puede estimarse en un 10% con respecto al acumulador, lo que totaliza un 25% de la producción. Igualmente; dadas las normales distorsiones de consumos de algún

período puntas respecto a los promedios previstos, se hace aconsejable aumentar P en otro 15%, con lo que, junto con lo anterior quedaría que Potencia a instalar = 1,4P  
La potencia real a instalar es de 22,5kW.

$$\text{Consumo mensual} = \frac{Q_c}{PC_{\text{combustible}}} = \frac{22,5\text{kW}}{4,433\text{kWh/kg}} \cdot 18\text{h/día} \cdot 30\text{días/mes} = 2740,81\text{kg}$$

Se procede al cálculo del coste de energía, en la Tabla 28. Se muestra el valor de la inversión.

Tabla 28. Desglose valor de inversión uso de caldera en poblado.

Instalación	Descripción	Precio USD	
Caldera 22,5 kW policombustible	Potencia nominal (kW)	23,3	
	Rendimiento a Potencia nominal (%)	95	
	Potencia carga parcial (kW)	6,9	
	Potencia eléctrica	485W	
	Tª retorno mínima	25°C	4000 USD
	Tiro mín. chimenea (Pa)	10	
	Tiro max. chimenea (Pa)	20	
	Vol. Cámara de agua (l)	73	
	Combustible al 100% (kg)	5	
	Peso (kg)	284	
	Silo flexible	Largo mm	2040
Ancho mm		2040	
Altura mm		1970	3360 USD
Capacidad (t)		2,8-3,2	
Acumulador A.C.S. vertical Logalux ER /ER W	Modelo	500	
	Capacidad	465 litros	
	Peso	119 kg	1616 USD
	Diámetro	700mm	
Obra de instalación	Altura	1921mm	
	Construcción local almacenamiento	15000USD	
	Conexión de hogares Material		
Total Inversión		23976 USD	

Se considera que esta instalación requiere de mano de obra, de 1 hora mensual a 10 \$/h, para la supervisión de funcionamiento. Por tanto, los costes de mano de obra son de:

$$\text{Costes de mano de obra } (\$/h) = \frac{10}{30 \cdot 24} = 0,014 \text{ } \$/h$$

$$\text{Precio energía} = \frac{\frac{0,9 \cdot 23976}{131400} + \frac{0,05 \cdot 23976}{8760} + 0,014}{2778,98/(30 \cdot 24)} + 0,0012 = 0,083\$/\text{kWh}$$

La instalación centralizada, resulta más rentable que la instalación familiar disminuyendo los costes por unidad doméstica y por kWh generado. La instalación centralizada respecto a la preexistente de gas propano, resulta rentable a partir de los 514681,462 kWh, rentabilizándose la inversión a los 15,4 años de su puesta en marcha. Incluyendo los costes de astillado se obtiene un precio de energía de 0,096\$/kWh, lo cual retrasa la rentabilización hasta los 21,57 años.

El uso de astillas en las instalaciones centralizadas con suministro para 50 habitantes, resultan rentables por su optimización en el consumo y por la proximidad de las viviendas a las que suministra cada estación. No obstante, por las características de la zona, resultaría muy interesante el aprovechamiento de la enorme cantidad de residuos agrícolas que en ella se genera, por lo que se va a proceder al estudio de viabilidad de puesta en marcha de una planta de pélet que procese y suministre los residuos herbáceos procedentes del principal cultivo de la zona

## 9.2 Inversión planta de pélets.

Para poder utilizar los residuos herbáceos como combustibles en calderas se plantea la posibilidad de montar una planta de pélets.

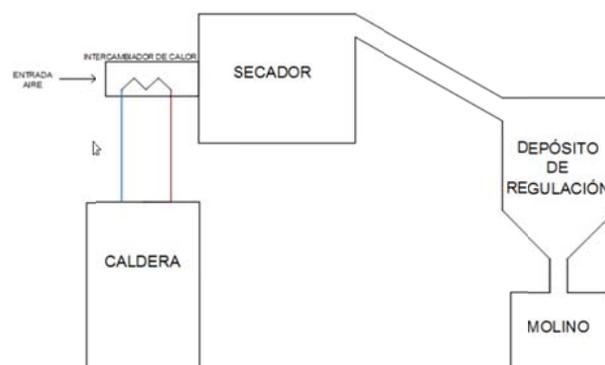


Figura 18. Esquema Caldera-Secador planta de pélets.

En primer lugar, la energía anual de ACS de ambas parroquias es de:

$$48,33 \text{ kWh/persona} \cdot 3107 \text{ personas} \cdot 12 \text{ meses} \cdot 1,15 = 2072226,08 \text{ kWh}$$

1 kg de pélet de paja de maíz proporciona 4,433kWh con una humedad del 10%, se considera un rendimiento medio de la caldera de funcionamiento de  $\eta=0,89$ . La cantidad de pélet necesaria para cubrir estas necesidades es de 526 toneladas de caña de maíz:

$$\frac{2072226,08 \text{ kWh}}{4,433 \text{ kWh/kg} \cdot 0,89} = 525229,85 \text{ kg}$$

La cosecha del maíz tiene lugar 2 veces al año, como se muestra en las Tablas 5 y 6. Por tanto, habrá que disponer del espacio suficiente para la acumulación anual de estos residuos. La humedad a la que se requiere la paja de maíz es del 10% y la humedad en el momento de la cosecha en húmedo se considera del 80%, por tanto hay que determinar la masa de acopio de caña con el 80 % de humedad:

$$m_{\text{seca}} = \frac{100 - 10}{100} \cdot 526 = 473,4\text{t}$$

$$m_{80\%} = \frac{100}{100 - 80} \cdot 473,4 = 2367\text{t}$$

El coste del gas propano actualmente utilizado se estima en 0,13 \$/kWh. A partir de ahí se estima el valor máximo admisible de la inversión.

Los costes vienen definidos por:

$$\text{Costes de amortización (\$/h)} = \frac{V_i - V_R}{V_{\text{util}}} = \frac{V_i - 0,1 \cdot V_i}{V_{\text{util}}} = \frac{0,9 \cdot V_i}{V_{\text{util}}} = \frac{0,9 \cdot V_i}{131400}$$

Dónde el valor residual ( $V_R$ ) se considera el 10% del valor de la inversión y la Vida útil de 131400 horas (equivalente a 15 años con todos los días y las horas)

$$\text{Costes de mantenimiento (\$/h)} = \frac{0,05 \cdot V_i}{365 \cdot 24} = \frac{0,05 \cdot V_i}{8760}$$

La planta tendrá en nómina a 2 operarios por turno, con un sueldo mensual de 8\$/h en bruto. Y un técnico encargado de la supervisión que trabajará en jornada única, con un sueldo bruto de 10\$/h.

$$\text{Costes mano de obra (\$/h)} = \frac{(8 \cdot 4 \cdot 8 + 10 \cdot 1 \cdot 8) \cdot 20}{30 \cdot 24} = 9,33\$/h$$

$$\text{Costes seguridad planta} = 1200\$/\text{mes} = \frac{1200}{30 \cdot 24} = 1,7\$/h$$

Hay que tener en cuenta también los costes de recogida y acopio del material. La recolección del maíz se realiza mediante partidas de jornaleros, sobre unos 15 jornaleros trabajando, contratados por los propios agricultores de la zona o por la empresa que se dedica a la cosecha de maíz. El rendimiento de cosecha manual de los 15 jornaleros es de 6 hectáreas por jornada laboral. Como la cosecha de maíz es muy puntual, la jornada que se realiza es de unas 12 horas, incluyendo los descansos para las comidas. El salario de los jornaleros es de 10\$/día, por tanto, si la media es de 15 jornaleros tendremos un gasto de 150\$ por las 4 hectáreas, la hectárea sale a 37,5\$, unos 50\$/ha si se incluye el transporte. La planta requiere 1908 toneladas de maíz anuales, una ha de maíz, de las tablas de cuantificación de la memoria (Tabla 5 y Tabla 6) se obtiene las toneladas por hectárea, nos aporta:

$$\text{Maíz húmedo (80\%)} = \frac{21480 + 40413,36}{1200 + 1125} = 26,6 \text{ toneladas maíz/ha}$$

Hasta llegar a las 2367 toneladas, se necesita la materia prima de una superficie de 89 ha:

$$\frac{2367}{26,6} = 88,98 \text{ ha}$$

$$\text{Los costes de recogida de materia prima son} = C_r = \frac{88,98 \text{ ha} \cdot 50 \$/\text{ha}}{365 \cdot 24} = 0,51 \$/\text{h}$$

El consumo mensual de energía es de 172685,5 kWh, energía que debe ser proporcionada por la planta de pélet. Se calcula el valor de la inversión en función de que el coste de energía sea menor al del combustible empleado actualmente, dándonos el umbral sobre el cual podemos actuar. Este valor de inversión calculado con la energía de ambas parroquias nos dará el Valor de inversión incluyendo las calderas y acumuladores instalados en cada hogar o poblado.

$$\text{Valor de la inversión global} = \frac{\frac{0,9 \cdot V_i}{131400} + \frac{0,05 \cdot V_i}{8760} + 9,33 + 1,7 + 0,51}{172685,5 / (30 \cdot 24)} \leq 0,13 \$/\text{kWh}$$

$$V_i < 1553558,45 \$$$

Según la Tabla 28, el total de la inversión para la construcción de la planta de pélet es de 4013605,12 USD, por lo que el precio del kWh en la planta de pélet tiene un coste de producción de 0,067 \$/kWh. En la ecuación 1 se calcula el coste de la energía:

$$\text{Coste energía} = \frac{\frac{0,9 \cdot 401605,12}{131400} + \frac{0,05 \cdot 401605,12}{8760} + 9,33 + 0,51 + 1,67}{172685,51 / (30 \cdot 24)} = 0,068 \$/\text{kWh}'$$

Tabla 29. Inversión planta de pélet

Instalación	Descripción	Precio USD
Planta Pélet	Secador	
	Molino	
	Peletizadora	
	Enfriadora Tamizadora	
	Ensacadora	96.250
	Cintas transportadoras	
	Instalación eléctrica	
	Transporte e instalación del material	
Astilladora	Astilladora diésel-18HP	11355,12
Cargadora	Caterpillar 236D	84000
Nave industrial	Construcción	
	Mano de obra	
	Materiales	210000
	Instalación eléctrica	
	Instalación de fontanería	
	Compra del terreno	
	<b>Total Inversión</b>	<b>401.605,12 USD</b>

Tabla 28. Costes energéticos planta pélet.

	Coste Planta	Coste energético (\$/kWh)
Planta pélet	401.605,12 USD	0,068
Plantas GLP	0	0,13

El umbral que marca la rentabilidad de la planta viene indicado por los kWh a partir de los cuales se ha amortizado la inversión:

$$\text{kWh para rentabilización} = \frac{401605,12}{0,13 - 0,068} = 6530150,05 \text{ kWh}$$

Si el consumo anual es de 2072226,08kWh:

$$\text{Años para rentabilización} = \frac{6530150,05}{2072226,08} = 3,15 \text{ años}$$

Si no se consideran los gastos derivados de las instalaciones domésticas y el transporte del pélet la inversión en la planta resultaría rentable en un plazo de 3,15 años,

suponiendo un ahorro anual energético durante los restantes 12 años de vida útil de instalación de:

$$\text{Ahorro anual} = 2072226,08 \cdot (0,13 - 0,068) = 128478,02\text{USD}$$

La inversión de la instalación de la caldera de pélet, con acumulador, silo y los gastos derivados del transporte, es la misma que la planteada en el apartado anterior para la astilla, es decir, de 3330\$ si consideramos la instalación familiar con carga manual de la caldera y de 23970\$ si se considera la instalación centralizada para el suministro de ACS para 10 familias. La utilización de pélet en la instalación familiar no resulta rentable, ya que si se suma el precio de la producción de pélet e instalación de caldera ( $0,11\$/\text{kWh} + 0,068\$/\text{kWh}$ ), tenemos un precio de  $0,178\$/\text{kWh}$ , precio superior a los  $0,13\$/\text{kWh}$  del uso de gas propano. Algo similar ocurre cuando se considera la instalación centralizada, para suministro de ACS a una población de 50 personas. Para una población de 3107 habitantes, se requiere la instalación de 62 calderas aproximadamente. El coste global de la planta de pélet más el de todas las calderas es de  $1891100,92\%$ , y el valor máximo de inversión para ambas parroquias es de  $1552452,39\%$ . El precio del kWh se obtiene a  $0,159\$/\text{kWh} > 0,13\$/\text{kWh}$ , por tanto la instalación no es rentable. Este resultado también se puede calcular sumando los precios por kWh de cada instalación por separado, teniendo  $0,083\$/\text{kWh} + 0,068\$/\text{kWh}$  de la caldera centralizada y la planta de pélet respectivamente, sumando un total de  $0,151\$/\text{kWh}$ , en ambos casos, se demuestra que la inversión que supone la planta de pélet no es rentable a la escala a la que se ha realizado el estudio, si se trabajara a mayor escala, resultaría más rentable la inversión, puesto que cuanto más energía suministre, menor es el tiempo de amortización de la inversión y el precio del kWh.

## 11. CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado los recursos existentes en las parroquias de San Simón y San Lorenzo para producir energía de la combustión directa y de la fermentación. Se ha demostrado que ambas parroquias disponen de suficiente material para producir energía suficiente para autoabastecerse e incluso para vender un extra de energía de 5.850,66 MWh si explota todo el potencial de los residuos de la zona. No obstante, de forma práctica, es muy difícil aprovechar toda la energía potencial ya que la ganadería es extensiva y es difícil de obtener el 100% de los excrementos que van produciendo a lo largo del día. No obstante esta información nos indica que aunque se tenga un rendimiento del 50% en la recogida de recursos, es posible suministrar y cubrir las necesidades de ambas poblaciones.

Se ha evaluado el potencial del biogás obtenible mediante la fermentación con distintas proporciones de materias primas en las condiciones locales con una elevada rentabilidad, variando la producción de metano entre los 0,15 y los 0,21 m<sup>3</sup> de biogás

por kg de sólidos volátiles. Se ha evaluado el potencial de la zona para la combustión directa de la biomasa, viéndose que sí que resulta muy interesante la implantación de instalaciones centralizadas de astillas, obteniendo la energía a un coste de 0,093\$/kWh, lo cual supone un ahorro de casi 4 centavos por cada kWh producido, además de aportar un beneficio medio ambiental y una reducción del riesgo de incendio por disponer del monte limpio. La peletización de los residuos agrícolas es interesante tanto por el aprovechamiento de la gran cantidad de caña de maíz que se genera en la zona, como por el bajo precio al que se obtiene su recolección y acopio. Sin embargo, el uso de caldera de pélet más la planta de producción de éste, eleva el precio de la energía por encima del límite, los 0,13 \$/kWh que supone el uso de la energía convencional, basada en tanques de gas propano. Por tanto, no resulta viable la peletización de los residuos agrícolas.

El análisis físico-químico de las materias disponibles ha permitido documentar las características de la materia prima abundante presente en la provincia de Bolívar, Ecuador. Los objetivos del estudio han sido satisfactorios en gran medida.

A través del proyecto ADSIDEO, se han obtenido numerosos resultados positivos para la zona:

- Información cartográfica mediante ArcGis de una zona dónde no había con anterioridad.
- Modelos de predicción de residuos agrícolas aplicables.
- Volumen de biogás producido con diferentes mezclas con estiércol y residuos vegetales de plantas y animales de la zona.
- Caracterización de biomasa residual vegetal de la zona andina: Análisis proximal, análisis elemental, poder calorífico y curvas de secado.
- Información para la población local de un posible uso rentable de sus residuos, eliminando la necesidad de quema de éstos.
- Publicación de artículos científicos que permiten a la UEB estar mejor posicionada ante su acreditación como universidad,
- Dossier divulgativo, para agricultores, técnicos y administración.
- Sensibilización de las administraciones locales, provinciales y gubernamentales de las potenciales oportunidades que ofrece el aprovechamiento energético de los recursos agrícolas para el desarrollo local
- Formación de técnicos de la UEB, MAGAP y de las parroquias de San Simón y San Lorenzo.

Se han participado de varios foros, organizados por distintos miembros de la red ECUMASA en donde se ha socializado el proyecto.

**REFERENCIAS**

Angelidaki I., Ahring B.K. (1992). Effects of free long fatty acids on thermophilic anaerobic digestion. *Applied Microbiology and Biotechnology* 37(6): 808-812.

Angelidaki I., Ahring B.K. (1993). Effect of the clay mineral bentonite on ammonia inhibition of anaerobic thermophilic reactors degrading animal waste. *Biodegradation* 3: 409-414.

Angelidaki I., Ahring B.K. (1994). Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature. *Water Research* 28(3): 727-731.

ANEMBE (2000). Asociación Nacional de Especialistas en Medicina Bovina de España, Boletín Nº 14. 2000. Consistencia de las heces, Marca Líquida, Córdoba, oct/2000, 26.

ARCCE (2015). Agencia De Regulación Y Control Del Consumo Eléctrico. Gobierno de Ecuador: <http://www.conelec.gob.ec/documentos.php?cd=3073&l=1>.

Barra, F. (2005). Manejo de la alimentación de animales a corral, *Acaecer*, Bs. As., 30(346):26-32.

Gallardo, M. 2002. Observación y estudio de las deposiciones fecales y su relación con el proceso digestivo. Estación Experimental Agraria Rafaela INTA.

Curso de generación de Energía eléctrica

<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>

Hashimoto A.G. (1986). Ammonia Inhibition of methanogenesis from cattle wastes. *Agricultural Wastes* 17: 241-261.

Hashimoto A.G. (1989). Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and production rate from straw. *Biological wastes*. 28: 247-255.

Robbins J.E., Gerhardt S.A., Kappel T.J. (1989). Effects of total ammonia on anaerobic digestion and an example of digester performance from cattlemanure-protein mixture. *Biological wastes* 27: 1-4.

Trujillo D., Pérez J.F., Cebreros F.J. (1993). Energy recovery from wastes. Anaerobic digestion of tomato plant mixed with rabbit wastes. *Bioresource Technology* 45: 81-83.

SWISSAID (2015). <http://www.swissaid.org.ec/node/22>

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* 14: 19-35.

<http://www.tumejorenergia.com/es/calderas-policombustibles-biomasa/1060-caldera-biomasa-pellets-hueso-aceituna-domusa-biobio-class-ng-25.html>

[http://editorial.dca.ulpgc.es/servicios/2\\_fontaneria/28/s280.htm](http://editorial.dca.ulpgc.es/servicios/2_fontaneria/28/s280.htm)

[http://www.solostocks.com/venta-productos/silo-pellets\\_b](http://www.solostocks.com/venta-productos/silo-pellets_b)

