

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de la eficiencia de dos digestores anaerobios
existentes de dos granjas de crianza de cerdos

Trabajo de investigación presentado por Oscar Enrique
Sáenz Wirtz para optar al grado académico de Licenciado
en Ingeniería Química

Guatemala
2007

Evaluación de la eficiencia de dos digestores anaerobios
existentes de dos granjas de crianza de cerdos

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería


Evaluación de la eficiencia de dos digestores anaerobios
existentes de dos granjas de crianza de cerdos

Trabajo de investigación presentado por Oscar Enrique
Sáenz Wirtz para optar al grado académico de Licenciado
en Ingeniería Química

Guatemala

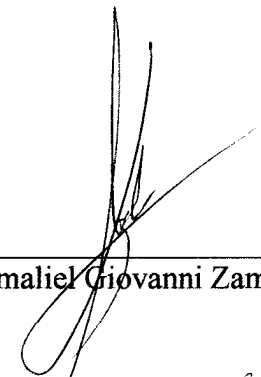
2007

Vo. Bo. :

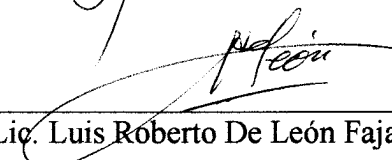
(f) 

Lic. Luis Roberto De León Fajardo
Asesor


Tribunal:

(f) 

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 

Lic. Luis Roberto De León Fajardo

(f) 

Ing. Cristián Rossi Sosa

Fecha de aprobación: 22 de enero de 2008

PREFACIO

Este trabajo de investigación surgió por la inquietud de documentar de manera más técnica el funcionamiento de dos digestores anaeróbicos construidos e instalados en Guatemala para tener un precedente más veraz del funcionamiento de dichos sistemas. Además, tomando el tema de dicha investigación como parte de mi trabajo de graduación, tomé la iniciativa de buscar apoyo tanto a nivel universitario como de la empresa que me permitió tomar mis respectivas mediciones. Así, de esa manera el mismo fue adquiriendo cuerpo y a pesar de diversas dificultades prácticas y técnicas en la obtención de resultados, fue posible concluirlo gracias al apoyo de diversas personas que, ya fuera en el lugar del análisis o a través de consejos y apoyo teórico-técnico, hicieron de la presente investigación toda una realidad. Y de esta manera me fue posible contribuir en cierto grado en la investigación del aprovechamiento energético en el país como una medida necesaria para lograr la sustentabilidad que tanto se ha buscado.

En primer lugar quiero agradecer a Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida, dándome inmerecidamente tantas gracias que me han posibilitado cumplir varias de las metas que me he trazado. Por ello y mucho más, no me queda más que darle gracias porque gracias a Él no sólo pude concluir la presente investigación sino en sí toda mi formación académica hasta el presente punto, umbral de concluir la Licenciatura en Ingeniería Química.

Además, quiero agradecer a mis padres porque han sido verdaderos bastiones de mi vida, por sus enseñanzas y por haberme criado y educado fuertemente en valores morales y cristianos; por todas sus preocupaciones, noches de desvelo a mi lado y penas compartidas. A mi hermana, por ser no sólo una excelente hermana sino una maravillosa amiga, que siempre ha estado a mi lado y de quien he recibido tanto apoyo, consejos y cariño. A la Mamita por todo su cariño y preocupación que me ha acompañado hasta este punto de mi vida. A mis abuelos por todo su apoyo, cariño y confianza y en sí a todos y cada uno de los miembros de mi familia por estar a mi lado en tantos momentos.

Un especial agradecimiento a todos mis amigos, que aunque no los cite nombre por nombre, saben perfectamente lo que significan para mí y lo mucho que han aportado en mi vida. Gracias por todo su apoyo, cariño y respeto y por permitirme ser una parte pequeña de sus vidas. Además por estar conmigo siempre, en diversos momentos de mi vida, y ser verdaderas bendiciones. Dios los bendiga.

También va mi gratitud a las autoridades de la Universidad del Valle de Guatemala, por haber aceptado que un servidor haya podido cursar la carrera y de manera particular por el apoyo recibido hacia mi persona durante estos cinco años, especialmente durante los últimos seis meses. Al Ing. Gamaliel Zambrano por todos sus consejos, enseñanzas e incondicional apoyo durante el último año, así como por su comprensión y confianza hacia mi persona.

Quiero aprovechar para agradecer a todos aquellos que permitieron que esta investigación se realizara. Así pues, agradezco a las autoridades de Empacadora Toledo S. A., por todo su apoyo durante este proyecto, en especial al Ing. Pablo Monzón, Dr. Luis Moreira por su aprobación al proyecto, al Ing. Julio de la Parra por todo su apoyo y por permitirme conocer mucho acerca del funcionamiento de los digestores; a Alex Quiché y Don Perfecto por su apoyo en el proceso de toma de muestras y mediciones *in situ*. Un agradecimiento muy especial hacia el Lic. Roberto De León Fajardo, mi asesor durante este trabajo de investigación, por todo su apoyo, consejos y guía tan acertada, y en sí por los conocimientos impartidos hacia mi persona en su labor como catedrático. A los ingenieros Jaime Rosales y Jorge Muñoz que, aunque ajenos al asesoramiento de la presente investigación, no dudaron en brindarme su apoyo y consejo durante algunas etapas del proceso de la misma. Al Ing. Jorge Godínez por su autorización y apoyo durante las determinaciones experimentales en el laboratorio, así como a Moisés Vásquez y Cristian García.

Por último, y no por ello menos importante, toda mi gratitud hacia la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, quienes con su apoyo en todo sentido han permitido que pueda cumplir el sueño que hace 5 años dio inicio. A Doña Isa por ese gran corazón del cual yo doy fe y le doy gracias a Dios por haberla conocido; a Don Edgar por ser uno de los mayores apoyos hacia mi persona en todo este tiempo, por confiar tanto en mi persona y ser una verdadera bendición para mí, y en sí a todos los integrantes de la Fundación y personas allegadas quienes me han manifestado tantas muestras de aprecio, confianza y ánimo. A todos, que Dios les bendiga.

Oscar Enrique Sáenz Wirtz

CONTENIDO

PREFACIO	v
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xxiii
RESUMEN	xxvi
ABSTRACT	xxviii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	4
<i>A. Digestión anaerobia como método de tratamiento de desechos</i>	<i>4</i>
<i>B. Funcionamiento de un biodigestor</i>	<i>7</i>
<i>C. Principales tipos de digestores</i>	<i>11</i>
<i>D. La carga</i>	<i>15</i>
<i>E. Los productos</i>	<i>16</i>
1. <i>El efluente</i>	<i>16</i>
2. <i>El biogás</i>	<i>16</i>
<i>F. Control del proceso de producción de biogás</i>	<i>17</i>
<i>G. Utilización del biogás</i>	<i>19</i>
<i>H. Sinopsis de la biodigestión anaerobia</i>	<i>20</i>
<i>I. Diagnóstico de un biodigestor</i>	<i>21</i>
III. JUSTIFICACIÓN	23
IV. OBJETIVOS	24
<i>A. GENERAL</i>	<i>24</i>
<i>B. ESPECÍFICOS</i>	<i>24</i>
V. PROBLEMA A RESOLVER	25
VI. METODOLOGÍA	26

VII. RESULTADOS.....	31
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
IX. CONCLUSIONES.....	50
X. RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	56
APÉNDICE.....	58
<i>A. Diagrama de los digestores.....</i>	<i>58</i>
1. <i>Diagrama general del sistema de digestión anaeróbica en la Granja La Flor.....</i>	<i>58</i>
2. <i>Diagrama general del sistema de digestión anaeróbica en la Granja Agua Blanca.....</i>	<i>61</i>
<i>B. Informes de resultados de calidad de afluentes y efluentes.....</i>	<i>65</i>
1. <i>Informes de análisis Granja La Flor.....</i>	<i>65</i>
2. <i>Informes de análisis Granja Agua Blanca.....</i>	<i>71</i>
<i>C. Caracterización de afluentes y efluentes.....</i>	<i>77</i>
1. <i>Datos originales.....</i>	<i>77</i>
2. <i>Cálculos.....</i>	<i>78</i>
<i>D. Determinación de calidad de biogás.....</i>	<i>80</i>
1. <i>Datos originales.....</i>	<i>80</i>
2. <i>Cálculos.....</i>	<i>83</i>
3. <i>Datos calculados intermedios.....</i>	<i>90</i>
<i>E. Cálculos para realizar el balance de masa de cada digestor.....</i>	<i>100</i>
1. <i>Datos originales.....</i>	<i>100</i>
2. <i>Cálculos.....</i>	<i>101</i>
3. <i>Datos calculados intermedios.....</i>	<i>107</i>
<i>F. Cálculos para realizar el balance de energía de cada digestor.....</i>	<i>108</i>
1. <i>Datos originales.....</i>	<i>108</i>
2. <i>Cálculos.....</i>	<i>109</i>
3. <i>Datos calculados intermedios.....</i>	<i>114</i>
<i>G. Determinación del Cp promedio de los sólidos contenidos en el efluente de los digestores.....</i>	<i>114</i>
1. <i>Datos originales.....</i>	<i>114</i>
2. <i>Cálculos.....</i>	<i>115</i>
<i>H. Cálculos para determinar la eficiencia de los quemadores.....</i>	<i>119</i>

1.	<i>Datos originales.</i>	119
2.	<i>Cálculos.</i>	120
3.	<i>Datos calculados intermedios.</i>	125
I.	<i>Análisis termodinámico del biogás en términos de combustión, para diferentes panoramas de purificación del gas.</i>	128
1.	<i>Datos originales.</i>	128
2.	<i>Cálculos.</i>	129
3.	<i>Datos calculados intermedios.</i>	134
J.	<i>Registro gráfico de los sistemas de biodigestión.</i>	169
1.	<i>Granja La Flor.</i>	169
2.	<i>Granja Agua Blanca.</i>	173
3.	<i>Quemadores de biogás.</i>	177
K.	<i>Características geográficas de la ubicación de las dos granjas de interés.</i>	179

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Parámetros característicos del efluente de los corrales hacia los sistemas de tratamiento para el caso de Colombia.	5
Cuadro 2: Principales productos obtenidos del tratamiento de excretas de cerdos, para el caso de Colombia.	6
Cuadro 3: Cuadro comparativo del metabolismo aeróbico y el anaeróbico (bacteriano)	7
Cuadro 4: Balance de energía para ambos digestores.....	32
Cuadro 5: Demanda química de oxígeno promedio antes y después del digestor para ambas granjas y efecto reductor.....	32
Cuadro 6: Demanda bioquímica de oxígeno promedio antes y después del digestor para ambas granjas y efecto reductor.....	32
Cuadro 7: Relación DQO/DBO promedio antes y después del digestor para ambas granjas.....	33
Cuadro 8: Sólidos suspendidos totales promedio antes y después del digestor para ambas granjas y efecto reductor.....	33
Cuadro 9: pH promedio antes y después del digestor para ambas granjas.	33
Cuadro 10: Producción de biogás y calidad del mismo para ambas granjas, en un período de 24 horas, tomando un máximo contenido de sulfuro de azufre igual al 1%.....	33
Cuadro 11: Eficiencia de los quemadores utilizados para la calefacción de lechones, con dos flujos diferentes de biogás y un 5% de exceso de aire.....	34
Cuadro 12: Especificaciones del sistema de digestión anaerobia de la Granja La Flor.....	59
Cuadro 13: Especificaciones de válvulas en el sistema de digestión de la Granja La Flor	59
Cuadro 14: Especificaciones del sistema de digestión anaerobia de la Granja Agua Blanca.....	62
Cuadro 15: Especificaciones de válvulas en el sistema de digestión de la Granja Agua Blanca.....	63
Cuadro 16: Demanda química de oxígeno para ambas granjas de crianza de cerdos, según resultados de análisis de laboratorio para tres diferentes muestras.....	77
Cuadro 17: Demanda biológica de oxígeno para ambas granjas de crianza de cerdos, según resultados de análisis de laboratorio para tres diferentes muestras.....	77

Cuadro 18: Sólidos suspendidos totales para ambas granjas de crianza de cerdos, según resultados de análisis de laboratorio para tres diferentes muestras.	78
Cuadro 19: Sólidos suspendidos totales para ambas granjas de crianza de cerdos, según resultados de análisis de laboratorio para tres diferentes muestras.	78
Cuadro 20: Masa de hidróxido de sodio (99% de pureza) para la preparación de 2.0000 ± 0.0005 L de solución.	80
Cuadro 21: Masa de ftalato ácido de potasio (99.9% de pureza) para la valoración de las soluciones estándares de hidróxido de sodio, realizada en triplicado.....	80
Cuadro 22: Volumen inicial y final de solución patrón de hidróxido de sodio consumida para la valoración con ftalato ácido de potasio.	81
Cuadro 23: Masa de carbonato de sodio (99.9% de pureza) para la valoración de solución patrón de ácido clorhídrico, preparada con 41.40 ± 0.05 mL de ácido clorhídrico (37.1% de pureza) aforados hasta 1000.00 ± 0.30 mL	81
Cuadro 24: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico para su valoración con estándar de carbonato de sodio.....	81
Cuadro 25: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico 0.5 M consumida para la determinación de alcalinidad total en alícuotas de 10.00 ± 0.05 mL de muestras tomadas en la Granja La Flor.....	82
Cuadro 26: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico 0.5 M consumida para la determinación de alcalinidad total en alícuotas de 10.00 ± 0.05 mL de muestras tomadas en la Granja Agua Blanca.	82
Cuadro 27: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico 0.5 M consumida para la determinación de alcalinidad total de alícuotas de 10.00 ± 0.05 mL de muestras tomadas en la Granja La Flor.....	82
Cuadro 28: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico 0.5 M consumida para la determinación de alcalinidad total de alícuotas de 10.00 ± 0.05 mL de muestras tomadas en la Granja Agua Blanca.	83

Cuadro 29: Condiciones ambientales y datos experimentales en la operación de burbujeo de biogás en las soluciones de hidróxido de sodio, así como mediciones de velocidad lineal de salida de biogás en ambas granjas.	83
Cuadro 30: Moles de ftalato ácido de potasio y volumen de solución patrón de hidróxido de sodio utilizados para la valoración de las mismas.	90
Cuadro 31: Concentración de las soluciones estándar de hidróxido de sodio preparadas para el análisis del biogás.	91
Cuadro 32: Concentración de soluciones auxiliares para el análisis de biogás.	91
Cuadro 33: Moles de carbonato de sodio y su equivalente reaccionado de ácido clorhídrico y volumen de solución patrón de ácido clorhídrico utilizados para la valoración de las mismas.	92
Cuadro 34: Concentración de cada muestra de solución patrón de ácido clorhídrico analizada y concentración promedio de la solución global de ácido clorhídrico.	92
Cuadro 35: Consumo de solución patrón de ácido clorhídrico 0.520 ± 0.004 M, para la determinación de la alcalinidad total de las muestras analizadas, para ambas granjas.	93
Cuadro 36: Moles alcalinos (base) totales en las muestras analizadas para ambas granjas.	94
Cuadro 37: Alcalinidad total en las muestras analizadas para ambas granjas.	94
Cuadro 38: Alcalinidad total promedio para cada solución de muestra, en ambas granjas.	95
Cuadro 39: Consumo de solución patrón de ácido clorhídrico 0.520 ± 0.004 M, para la determinación de la concentración de hidróxido de sodio de las muestras analizadas, para ambas granjas.	95
Cuadro 40: Moles de hidróxido de sodio en las muestras analizadas para ambas granjas.	96
Cuadro 41: Concentración de hidróxido de sodio en las muestras analizadas para ambas granjas.	97
Cuadro 42: Concentración promedio de hidróxido de sodio para cada solución de muestra, en ambas granjas.	97
Cuadro 43: Concentración de hidróxido de sodio remanente en las muestras tomadas en ambas granjas, corregidas por las diluciones del tratamiento por el método de Winkler.	98
Cuadro 44: Reducción en la concentración de hidróxido de sodio de las soluciones de muestra, después del burbujeo de biogás, en ambas granjas.	98

Cuadro 45: Moles de hidróxido de sodio reaccionados después del burbujeo de biogás en las soluciones de muestra.....	98
Cuadro 46: Moles de dióxido de carbono reaccionados después del burbujeo de biogás en las soluciones de muestra.....	99
Cuadro 47: Características de flujo de biogás para ambas granjas, en las pruebas de burbujeo del mismo en soluciones de muestra de hidróxido de sodio.....	99
Cuadro 48: Concentración de dióxido de carbono en el biogás, para cada solución de muestra analizada.....	99
Cuadro 49: Concentración de metano en el biogás, para cada solución de muestra analizada, considerando únicamente biogás formado por metano y dióxido de carbono.....	100
Cuadro 50: Concentración promedio de dióxido de carbono y metano en el biogás, considerando biogás conformado únicamente por dichos dos componentes, para ambas granjas.....	100
Cuadro 51: Datos de medición de carga en los digestores de ambas granjas.....	100
Cuadro 52: Velocidades de flujo lineal medidas para la producción de biogás, en ambas granjas.....	101
Cuadro 53: Datos para la determinación de la presión interna del digestor.....	101
Cuadro 54: Volúmenes de carga de ambos digestores anaerobios.....	107
Cuadro 55: Porcentajes máxicos de sólidos en la corriente efluente para ambos digestores.....	107
Cuadro 56: Flujo volumétrico de producción de biogás para ambos digestores anaerobios y flujos molares de cada componente.....	108
Cuadro 57: Temperaturas de entrada y salida de las especies del biodigestor, para ambas granjas.....	108
Cuadro 58: Parámetros para el cálculo de Cp/R para cada una de las especies que salen del digestor.....	109
Cuadro 59: Parámetros para la determinación del Cp/R de los productos en ambas granjas.....	114
Cuadro 60: Calor absorbido por los productos del proceso de digestión par ambas granjas.....	114
Cuadro 61: Condiciones experimentales para la determinación del Cp de los sólidos del efluente de los digestores, en el análisis hecho para agua pura destilada.....	114
Cuadro 62: Condiciones experimentales para la determinación del Cp de los sólidos del efluente de los digestores, en el análisis hecho para una muestra del efluente.....	115

Cuadro 63: Parámetros para el cálculo de Cp/R para el agua.....	115
Cuadro 64: Mediciones realizadas para la determinación de la eficiencia de los quemadores utilizados para calefacción de los lechones en los corrales de levante de lechones.....	119
Cuadro 65: Mediciones de dióxido de carbono en los gases de combustión para dos diferentes flujos de biogás.....	120
Cuadro 66: Temperatura de salida de los gases de combustión para dos diferentes flujos de biogás.....	120
Cuadro 67: Valores de flujo tanto para la situación de la válvula totalmente abierta como para la válvula abierta a ½ de su giro.....	125
Cuadro 68: Flujo de dióxido de carbono calculado en base a los datos experimentales de concentración en los gases de combustión.....	126
Cuadro 69: Flujo de dióxido de carbono debido exclusivamente a la combustión del biogás calculado en base a los datos experimentales de concentración en los gases de combustión.....	126
Cuadro 70: Concentración de dióxido de carbono producto de la combustión en el flujo de gases de salida.....	126
Cuadro 71: Concentración de dióxido de carbono producto de la combustión en el flujo de gases de salida.....	126
Cuadro 72: Pérdidas en los quemadores por el proceso de combustión.....	127
Cuadro 73: Eficiencia de los quemadores, para ambas condiciones de flujo.....	127
Cuadro 74: Parámetros para la determinación del Cp de las diversas especies encontradas en el sistema de combustión del biogás.....	128
Cuadro 75: Calor de combustión de las especies combustibles en el biogás, para los diferentes panoramas de análisis.....	128
Cuadro 76: Condiciones termodinámicas de análisis en ambas granjas.....	128
Cuadro 77: Concentración de gases en el biogás para ambas granjas.....	129
Cuadro 78: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.....	134
Cuadro 79: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.....	134

Cuadro 80: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.....	135
Cuadro 81: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.	135
Cuadro 82: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.....	136
Cuadro 83: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro	136
Cuadro 84: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.....	137
Cuadro 85: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	137
Cuadro 86: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	138
Cuadro 87: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.	138
Cuadro 88: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	139
Cuadro 89: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	139
Cuadro 90: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	140

Cuadro 91: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno	140
Cuadro 92: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	141
Cuadro 93: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	141
Cuadro 94: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	142
Cuadro 95: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.	142
Cuadro 96: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.	143
Cuadro 97: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.	143
Cuadro 98: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%	144
Cuadro 99: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	144

Cuadro 100: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	145
Cuadro 101: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	145
Cuadro 102: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.	146
Cuadro 103: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.	146
Cuadro 104: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.	147
Cuadro 105: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%	147
Cuadro 106: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	148
Cuadro 107: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	148
Cuadro 108: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	149

Cuadro 109: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%	149
Cuadro 110: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%	150
Cuadro 111: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%	150
Cuadro 112: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%..	151
Cuadro 113: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.	151
Cuadro 114: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.	152
Cuadro 115: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.....	152
Cuadro 116: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.	153
Cuadro 117: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.	153
Cuadro 118: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro	154

Cuadro 119: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.....	154
Cuadro 120: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	155
Cuadro 121: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	155
Cuadro 122: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.	156
Cuadro 123: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	156
Cuadro 124: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	157
Cuadro 125: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.....	157
Cuadro 126: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno	158
Cuadro 127: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	158
Cuadro 128: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	159
Cuadro 129: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	159

Cuadro 130: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	160
Cuadro 131: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	160
Cuadro 132: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	161
Cuadro 133: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.....	161
Cuadro 134: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	162
Cuadro 135: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	162
Cuadro 136: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	163
Cuadro 137: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	163
Cuadro 138: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	164

Cuadro 139: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	164
Cuadro 140: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.....	165
Cuadro 141: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	165
Cuadro 142: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	166
Cuadro 143: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	166
Cuadro 144: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	167
Cuadro 145: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	167
Cuadro 146: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	168
Cuadro 147: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor	

de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.....	168
Cuadro 148: Características geográficas de la Granja La Flor	179
Cuadro 149: Características geográficas de la Granja Agua Blanca	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de tres etapas para la degradación completa de materia orgánica mostrando las rutas metabólicas generales así como los tres grupos metanogénicos principales: (1) Bacterias fermentativas, (2) bacterias productoras de H ₂ (como las bacterias reductoras y bacterias acetogénicas) y (3) bacterias metanogénicas.	9
Figura 2: Diferentes unidades para producción de biogás en el campo, en Centro América. (A) Horizontal, (B) diseño chino, (C) alto en sólidos (batería), y (D) horizontal modificado (ICAITI).....	10
Figura 3: Digestor experimental tipo laguna cubierta en Pennsylvania, Estados Unidos.....	12
Figura 4: Digestor de tanque agitado semicontinuo en China.	13
Figura 5: Digestor de flujo conectado (plug-flow) experimental en Pennsylvania	13
Figura 6: Esquema de operación de un reactor anaeróbico de secuencia batch.....	14
Figura 7: Esquema de operación de un reactor de biofilm fijado en soporte.....	15
Figura 8: Cambio de pH en función del tiempo para dos digestores anaerobios tipo batch (López, 2004:6)	19
Figura 9: Principales campos de acción y utilización de la digestión anaerobia	21
Figura 10: Balance de masa del digestor anaerobio ubicado en la Granja La Flor.....	31
Figura 11: Balance de masa del digestor anaerobio ubicado en la Granja Agua Blanca.	31
Figura 12: Temperatura ideal de los gases de combustión con diferentes escenarios de filtración para la Granja La Flor	35
Figura 13: Temperatura ideal de los gases de combustión con diferentes escenarios de filtración para la Granja Agua Blanca.....	36
Figura 14: Sistema de digestión anaerobia de la Granja La Flor.	58
Figura 15: Vistas de planta, elevación y perfil para el digestor anaerobio de la Granja La Flor	60
Figura 16: Sistema de digestión de la Granja Agua Blanca	61
Figura 17: Vistas de planta, elevación y perfil para el digestor anaerobio de la Granja Agua Blanca	64
Figura 18: Tanque de captación del digestor anaerobio de la Granja La Flor	169

Figura 19: Sistema de conducción de las aguas residuales hacia el tanque de captación de la Granja La Flor.	169
Figura 20: Consistencia del material alimentado al digester anaerobio de la Granja La Flor.	170
Figura 21: Cuerpo principal del digester anaerobio de la Granja La Flor.	170
Figura 22: Salida de biogás en el digester anaerobio de la Granja La Flor.	170
Figura 23: Tanque de descarga (efluente) del digester anaerobio de la Granja La Flor.	171
Figura 24: Rebalse del efluente del digester anaerobio de la Granja La Flor.	171
Figura 25: Trampa de agua para el biogás saliente del digester anaerobio de la Granja La Flor.	172
Figura 26: Sistema de escape para el biogás del digester anaerobio de la Granja La Flor.	172
Figura 27: Filtro de sulfuro de hidrógeno para el biogás del digester anaerobio de la Granja La Flor.	173
Figura 28: Tanque de captación del digester anaerobio de la Granja Agua Blanca.	173
Figura 29: Vista del digester anaerobio de la Granja Agua Blanca desde el punto de localización del tanque de captación.	174
Figura 30: Salida del biogás del digester anaerobio de la Granja Agua Blanca.	174
Figura 31: Tanque de descarga (efluente) del digester anaerobio de la Granja Agua Blanca.	174
Figura 32: Rebalse del tanque de descarga (efluente) del digester anaerobio de la Granja Agua Blanca. ...	175
Figura 33: Conducción desde el tanque de estabilización hacia la segunda pileta de estabilización, en la Granja Agua Blanca.	175
Figura 34: Conducción desde la segunda pileta de estabilización hacia campos aledaños a la Granja Agua Blanca.	175
Figura 35: Distribución del biogás del digester anaerobio de la Granja Agua Blanca hacia dos granjas de consumo.	176
Figura 36: Trampa de agua para el biogás consumido en la Granja Agua Blanca.	176
Figura 37: Filtro de sulfuro de hidrógeno para el biogás consumido en la Granja Agua Blanca.	177
Figura 38: Quemador utilizado para la calefacción de lechones en los corrales de levante.	177
Figura 39: Quemador de biogás en operación.	178

Figura 40: Aplicación de calor por medio de los quemadores de biogás a los lechones.	178
Figura 41: Vista satelital de ubicación de la Granja La Flor.	179
Figura 42: Vista satelital de la distribución de los corrales dentro de la Granja La Flor.	180
Figura 43: Mapa de la ubicación de San Luis Pueblo Nuevo.	181
Figura 44: Vista satelital de la ubicación de la Granja Agua Blanca.	181
Figura 45: Vista satelital de la distribución de galerías en la Granja Agua Blanca.	182

RESUMEN

En este reporte se muestran los resultados de la evaluación de dos digestores anaerobios ubicados en dos granjas de crianza de cerdos (Granja La Flor, ubicada aproximadamente a 909 metros sobre el nivel del mar y Granja Agua Blanca, ubicada aproximadamente a 1,725 metros sobre el nivel del mar), utilizando para el efecto las aguas de lavado de las excretas los cerdos de dichas granjas. En el análisis hecho en la Granja La Flor se determinó que para la fase de aguas residuales la demanda química de oxígeno antes del digestor fue de $19,473.33 \pm 11,370.95$ mg/L y después del digestor de $9,560.00 \pm 2,345.72$ mg/L, con una reducción del $50.91 \pm 32.24\%$; la demanda bioquímica de oxígeno antes del digestor fue de $11,175.00 \pm 4,341.59$ mg/L y después del digestor fue de $5,505.00 \pm 2,712.67$ mg/L, con una reducción del $50.74 \pm 31.84\%$; la concentración de sólidos suspendidos totales antes del digestor fue de $15,749.33 \pm 8,088.12$ mg/L y después del digestor de $9,284.00 \pm 527.00$ mg/L, con una reducción del $41.05 \pm 21.21\%$. En los tres casos la reducción fue menor a la esperada (en el rango de 80 a 90%). La relación DQO/DBO antes del digestor fue de 1.70 ± 0.47 y de 1.87 ± 0.47 después del digestor, dando referencia no sólo a una cantidad mayor de materia inorgánica de la esperada (se buscaban valores entre 1 y 1.30 como parámetro normal), sino también de la naturaleza eminentemente biológica del proceso, ya que después de digestión anaerobia aumentó la relación DQO/DBO. El pH antes del digestor fue de 6.50 ± 0.05 y de 7.32 ± 0.03 para después del digestor, lo cual se comportó respecto a lo esperado. En cuanto a la producción de gas, dicho digestor produce 76.34 ± 3.60 m³ de biogás al día, con una concentración de $62.63 \pm 0.73\%$ de metano, $36.37 \pm 0.73\%$ de dióxido de carbono y 1% de sulfuro de hidrógeno, con un rendimiento de 0.5127 ± 0.0667 m³día⁻¹m³ de digestor, lo cual es bajo para un digestor anaerobio que utiliza excretas de cerdo como sustrato (se buscan concentraciones de metano entre 65 y 70% y rendimientos cercanos a 1 m³día⁻¹m³ de digestor o mayores). La energía liberada por la reacción y absorbida por los productos en un periodo de 24 horas en el digestor fue de 329.23 ± 49.27 kJ, determinándose un calor de reacción a 20°C de 7.46 ± 3.99 kJ/(kg de sólidos en la carga). El tiempo de retención para dicho digestor fue de 27.53 ± 1.29 días.

En el análisis hecho en la Granja Agua Blanca se determinó que para la fase de aguas residuales la demanda química de oxígeno antes del digestor fue de $22,666.67 \pm 3,140.02$ mg/L y después del digestor de $15,526.67 \pm 12,294.30$ mg/L, con una reducción del $31.50 \pm 25.32\%$; la demanda bioquímica de oxígeno antes del digestor fue de $15,550.00 \pm 2,392.17$ mg/L y después del digestor fue de $9,250.00 \pm 7,364.27$ mg/L, con una reducción del $40.51 \pm 32.85\%$; la concentración de sólidos suspendidos totales antes del digestor fue de $21,383.33 \pm 9,337.66$ mg/L y después del digestor de $8,320.00 \pm 1,504.72$ mg/L, con una reducción del $61.09 \pm 28.87\%$. De igual manera que en la Granja La Flor, la reducción en los tres casos fue menor a la esperada. La relación DQO/DBO antes del digestor fue de 1.48 ± 0.29 y de 1.68 ± 0.07 después

del digestor, con un comportamiento similar al de la Granja La Flor (alto contenido de materia inorgánica y actividad biológica del proceso). El pH antes del digestor fue de 6.38 ± 0.19 y de 7.23 ± 0.04 para después del digestor, lo cual se comportó respecto a lo esperado. En cuanto a la producción de gas, dicho digestor produce $46.60 \pm 2.54 \text{ m}^3$ de biogás al día, con una concentración de $57.94 \pm 0.73\%$ de metano, $41.06 \pm 0.73\%$ de dióxido de carbono y 1% de sulfuro de hidrógeno, con un rendimiento de $0.2926 \pm 0.0380 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1} \text{ m}^3$ de digestor, mostrando de igual manera un rendimiento por debajo de lo esperado, así como una menor calidad del biogás, no sólo a lo esperado sino también en relación al a Granja La Flor. La energía liberada por la reacción y absorbida por los productos en un período de 24 horas en el digestor fue de $244.83 \pm 40.47 \text{ kJ}$, determinándose un calor de reacción a 17°C de $3.92 \pm 1.83 \text{ kJ}/(\text{kg de sólidos en la carga})$. El tiempo de retención para dicho digestor fue de 39.59 ± 0.88 días.

El digestor de la Granja La Flor mostró mejores resultados, resaltando la importancia que tiene la temperatura en los sistemas de digestión anaerobia, ya que a mayores temperaturas se logra no sólo un mejor tratamiento de las aguas residuales sino también una mayor producción de biogás, tanto en cantidad como en calidad. Aún así, en ambas granjas los resultados estuvieron por debajo de los valores promedios de operación de digestores anaerobios con sus características, especialmente debido a la operación a temperaturas menores a la óptima (35°C aproximadamente) y por no contar con sistemas de agitación.

En cuanto a la eficiencia de los quemadores utilizados para calefacción de los cerdos, fue de $65.84 \pm 14.82\%$ para un flujo de $0.0009366 \pm 0.0000476 \text{ m}^3/\text{s}$ (válvula de admisión totalmente abierta) y de $60.75 \pm 9.05\%$ para un flujo de $0.0005301 \pm 0.0000306 \text{ m}^3/\text{s}$ (válvula de admisión abierta a $\frac{1}{2}$ de su giro total), con lo cual no sólo se verificó una mayor eficiencia con flujos altos de biogás sino también la ineficiencia en sí de los quemadores basados en radiación para calefacción, ya que se esperaba obtener eficiencias mayores al 80% .

Por medio de un acercamiento teórico al comportamiento de combustión del biogás de ambos digestores fue posible determinar que la utilización de filtros tanto de dióxido de carbono como de sulfuro de hidrógeno es necesaria, en el caso del primero, por motivos ambientales (menor emisión de dióxido de carbono al ambiente) y técnicos (mayores temperaturas ideales de los gases de combustión, relacionadas directamente con la facilidad de liberación de energía) y en el segundo por casos ambientales (se evita liberar dióxido de azufre al ambiente, relacionado con la lluvia ácida).

ABSTRACT

The current report shows the results of the evaluation of two anaerobic digesters located in two different farms where pigs are bred (“La Flor” farm, located at 909 meters over the sea level and “Agua Blanca” farm, located at 1,725 meters over the sea level), using for that purpose the sewage waters coming from the washing of the animal’s manure. In the analysis made to the digester located at “La Flor” farm it was determined that the chemical oxygen demand (COD) before the digester was $19,473.33 \pm 11,370.95$ mg/L and after the digester was $9,560.00 \pm 2,345.72$ mg/L, with a reduction of $50.91 \pm 32.24\%$; the biochemical oxygen demand (BOD) before the digester was $11,175.00 \pm 4,341.59$ mg/L and after the digester was $5,505.00 \pm 2,712.67$ mg/L, with a reduction of $50.74 \pm 31.84\%$; the total suspended solids concentrations before the digester was $15,749.33 \pm 8,088.12$ mg/L and after the digester was $9,284.00 \pm 527.00$ mg/L, with a reduction of $41.05 \pm 21.21\%$. In the three cases the reduction results were lower than the expected ones (in the range of 80 to 90%). The COD/BOD rate before of the digester was 1.70 ± 0.47 and 1.87 ± 0.47 after de digester, showing that the amount of inorganic matter was greater than the expected (the normal value for COD/BOD for pig’s manure digestion is between 1 and 1.30), and also that the process is mostly of biological kind, because the COD/BOD rate increased after the digestion process. The pH before the digester was 6.50 ± 0.05 and 7.32 ± 0.03 after de digester, which was according to the expected values. About the gas production, the digester produces 76.34 ± 3.60 m³ of biogas per day, with a concentration of $62.63 \pm 0.73\%$ of methane, $36.37 \pm 0.73\%$ of carbon dioxide and 1% of hydrogen sulfide, and with a yield of 0.5127 ± 0.0667 m³day⁻¹m³ of digester, value that is low for pig manure digestion (it was expected to have methane concentration in biogas between 65 y 70% and yields close to 1 m³day⁻¹m³ of digester or greater). The freed energy by the reaction and the absorbed one by the products in a term of 24 hours was 329.23 ± 49.27 kJ, being determined a heat of reaction at 20°C of 7.47 ± 3.99 kJ/(kg of solids in the entrance of the digester). The retention time of the sewage water in the digester was 27.53 ± 1.29 days.

In the analysis made to the digester located at “Agua Blanca” farm it was determined that the chemical oxygen demand (COD) before the digester was $22,666.67 \pm 3,140.02$ mg/L and after the digester was $15,526.67 \pm 12,294.30$ mg/L, with a reduction of $31.50 \pm 25.32\%$; the biochemical oxygen demand before the digester was $15,550.00 \pm 2,392.17$ mg/L and after the digester was $9,250.00 \pm 7,364.27$ mg/L, with a reduction of $40.51 \pm 32.85\%$; the total suspended solids concentration before the digester was $21,383.33 \pm 9,337.66$ mg/L and after the digester was $8,320.00 \pm 1,504.72$ mg/L, with a reduction of $61.09 \pm 28.87\%$. Likely the results at “La Flor” farm, the reduction in the three parameters was lower than the

expected. The COD/BOD rate before the digester was 1.48 ± 0.29 and 1.68 ± 0.07 after the digester, with a similar performance than the “La Flor” farm (high content of inorganic matter and biological activity in the process). The pH before the digester was 6.38 ± 0.19 and 7.23 ± 0.04 after the digester, which was according to the expected behavior. About the gas production, the digester produces $46.60 \pm 2.54 \text{ m}^3$ of biogas per day, with a concentration of $57.94 \pm 0.73\%$ of methane, $41.06 \pm 0.73\%$ of carbon dioxide and 1% of hydrogen sulfide, with a yield of $0.2926 \pm 0.0380 \text{ m}^3\text{day}^{-1}\text{m}^3$ of digester, showing again a yield lower than the value expected and also a lower quality of biogas, not only from the expected but also compared to the production of “La Flor” farm. The freed energy by the reaction and absorbed by the products in a period of 24 hours was $244.83 \pm 40.47\text{k J}$, determined as heat of reaction at 17°C of $3.92 \pm 1.83 \text{ kJ}/(\text{kg of solids in the entrance of the digester})$. The retention time of the sewage water in the digester was 39.59 ± 0.88 days.

The digester at “La Flor” farm showed better results pointing out the importance of temperature in the anaerobic digestion systems because at higher temperatures it’s accomplished a better treatment for the sewage water and also produced more biogas (in amount and in quality). Nevertheless, the results in both farms were lower than the reported in literature for anaerobic digesters of their characteristics which can be explained because of the operation temperature of both digesters, lower than the optimal one (close to 35°C) and because of the lack of any agitation system.

Concerning to the efficiency of the devices used to burn the biogas to heat the pigs in the farms, this efficiency was of $65.84 \pm 14.82\%$ for a volumetric flow of biogas of $0.0009366 \pm 0.0000476 \text{ m}^3/\text{s}$ (totally opened admission valve) and of $60.75 \pm 9.05\%$ for a volumetric flow of biogas of $0.0005301 \pm 0.0000306 \text{ m}^3/\text{s}$ (half the total open of the admission valve), which showed that at higher flows of biogas it’s accomplished a better efficiency, but that the burners used in the farm are inefficient (it was expected a value of 80%).

Finally, by a theoretical approach to the behavior of the combustion of biogas in both digesters it was possible to determine that the presence of carbon dioxide and hydrogen sulfide filters in the system are very important. In the case of the carbon dioxide filter, it helps environmentally because it lowers the amount of carbon dioxide liberated to the air and it also helps technically because the ideal temperature of the combustion gases goes up when the carbon dioxide is removed (this directly related to the process of heating the pigs), and in the case of the hydrogen sulfide filter the impact is mostly environmentally (preventing from liberating sulfur dioxide, related to cases of acid rain).

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el factor energético es uno de los más importantes en la operación de la mayoría de actividades humanas, desde las meras cotidianas hasta las que requieren de consideraciones técnicas especiales. Por ello, las consideraciones de obtención y utilización de fuentes de energía son claves en la industria actual. Debido a la alta demanda de combustibles fósiles, así como a factores limitantes de distribución, tanto técnicos como económicos y políticos, el estudio y desarrollo de tecnologías para obtener otras fuentes de energía ha tomado forma y camino.

Dentro de este marco, los biocombustibles se han convertido en una de las principales opciones para lograr modificar el panorama y lograr una mayor sustentabilidad en al área de fuentes energéticas. Aunque se han realizado estudios más formales del tema durante los últimos cincuenta años, todavía se requiere de más investigación y desarrollo en el mismo.

Los biocombustibles muestran, en la mayoría de los casos, la peculiaridad de que requieren de fuentes renovables de energía, lo cual hace de ellos atractivos en términos de sostenibilidad, así como los hacen más versátiles, pues las mismas fuentes de las cuales se obtienen son de orígenes muy variados.

El biogás, que en términos generales es una mezcla de metano, dióxido de carbono y en menor cuantía algunos gases orgánicos, es el producto de la digestión anaerobia de material orgánico. En la medida en que se tenga una mayor o menor concentración de metano, las propiedades termodinámicas del mismo varían, pero en términos generales se constituye como un buen combustible. La descomposición anaerobia de materia orgánica, entre la que puede mencionarse follaje, excremento animal, residuos de alimentos, entre otros, es el mecanismo por el cual se produce dicho gas.

Aunque la tecnología no es nueva, la utilización de digestores anaerobios en granjas de crianza de animales está adquiriendo cada vez más adeptos. En la mayoría de los casos la instalación de los mismos se hace de manera artesanal, sin mayores consideraciones técnicas.

Este estudio muestra la evaluación de dos digestores anaerobios utilizados en dos granjas de crianza de cerdos, ubicándose cada digestor en una de las granjas. Ambos fueron instalados con el objeto de utilizar de alguna manera todo el material orgánico proveniente de las excretas de los cerdos de las granjas y aprovechar el biogás generado para calefacción en las galeras en las cuales se colocan a los lechones de pocas semanas de nacidos, para cumplir con el requerimiento de calor del cual, por ser separados de sus madres, carecen. Una de las granjas, llamada “La Flor”, se ubica en el km 94.5 de la carretera entre

Antigua Guatemala y Escuintla, mientras que el segundo digestor se encuentra en la granja llamada “Agua Blanca”, ubicada en las cercanías de San Luis Pueblo Nuevo, entre Sacatepéquez y Chimaltenango.

La evaluación se centra en dos áreas principales: Análisis de afluentes y efluentes, y análisis del biogás producido. En el primer caso, se realizaron pruebas para determinar el efecto que el biodigestor tiene sobre la calidad del agua (con su respectiva carga de sólidos) que pasa por el mismo. En el caso del análisis del biogás, se determinó la tasa de producción, así como la calidad con la cual se produce el mismo y la eficiencia de utilización de éste.

En este reporte se muestran los resultados de la evaluación con su respectivo análisis y todas aquellas recomendaciones que puedan hacerse a raíz de dichos resultados, entre lo cual cabe resaltar que el digestor de la Granja La Flor dio mejores resultados en cuanto a la reducción de parámetros como DQO y DBO, así como en cuanto a la producción de gas, siendo su producción diaria de $76.34 \pm 3.60 \text{ m}^3$ de biogás al día, con una concentración de $62.63 \pm 0.73\%$ de metano, $36.37 \pm 0.73\%$ de dióxido de carbono y 1% de sulfuro de hidrógeno, con un rendimiento de $0.5127 \pm 0.0667 \text{ m}^3\text{día}^{-1}\text{m}^3$ de digestor, en comparación con la producción del digestor de la Granja Agua Blanca la cual es de $46.60 \pm 2.54 \text{ m}^3$ de biogás al día, con una concentración de $57.94 \pm 0.73\%$ de metano, $41.06 \pm 0.73\%$ de dióxido de carbono y 1% de sulfuro de hidrógeno, con un rendimiento de $0.2926 \pm 0.0380 \text{ m}^3\text{día}^{-1}\text{m}^3$ de digestor. A pesar de lo anterior, los resultados estuvieron por debajo de los valores esperados por la experiencia de otros digestores de características similares, habiéndose concluido que los principales factores críticos que incidieron en dichos resultados fueron la falta de agitación adecuada en ambos digestores, así como el que se operaron por debajo de la temperatura óptima de producción de biogás, cercana a 35°C .

Así, en este documento se hace un análisis detallado de las evaluaciones realizadas y sus causas relacionadas con las características físicas, técnicas y operativas de ambos sistemas y se dan una serie de recomendaciones para el mejoramiento de dichos digestores en miras de establecerlos como verdaderas unidades productivas de biogás.

La información se ordena en diferentes secciones. A manera de apertura se posee un resumen con los principales resultados de la investigación y su respectiva versión en inglés (Abstract). En la sección de antecedentes se muestra información relevante concerniente al tema de estudio tomando en cuenta estudios realizados con anterioridad. A continuación se presentan los objetivos del estudio, su justificación y una descripción del problema a resolver, con el objeto de darle explicación y relevancia al mismo. Se continua con una descripción de la metodología de estudio y análisis aplicada. Posteriormente se exponen los resultados y su respectiva discusión y análisis. Tomando en cuenta lo anterior se presenta una sección con conclusiones del estudio y otra con una serie de recomendaciones prácticas. Por último, en la sección de apéndice se muestra material referencial con información utilizada durante el estudio, principales métodos

y resultados de cálculo, así como una serie de referencias gráficas que permiten dar sustento a varias de las recomendaciones presentadas en este informe.

II. ANTECEDENTES

A. Digestión anaerobia como método de tratamiento de desechos.

La digestión anaerobia es un proceso que se da en la naturaleza de manera natural como resultado del trabajo metabólico de bacterias y otros microorganismos. La utilización de residuos de biomasa, desde hace mucho tiempo, ha sido de conocimiento humano, pero en los últimos cincuenta años se ha tomado conciencia en el uso de dichos residuos de manera más eficiente y específica.

El enfoque de la utilización de residuos de la industria pecuaria ha tomado mucho énfasis a partir de los esfuerzos, tanto técnicos como legales, porque sus efectos sean lo menos dañinos ambientalmente hablando. En este marco, las granjas de crianza de cerdos tienen una especial atención, debido a las altas cargas de residuos orgánicos que de ellas se eliminan, generalmente a través de cuerpos de agua.

Pero frente a esta situación se ha sobrepuesto la postura de considerar dichos “residuos” como subproductos, los cuales pueden utilizarse para beneficio productivo y esto ha llevado al desarrollo, si bien artesanal en muchos casos, de dispositivos de aprovechamiento de dicha materia orgánica. Así, dos enfoques convergen en una misma realidad: La manipulación, utilización y disposición de las excretas de ganado porcino, tanto en granjas como en rastros (Chará, 2000).

Tomando como punto de partida el problema ambiental que causa descartar una gran cantidad de material orgánico proveniente de las granjas y rastros, se tienen dos problemas en especial: El primero radica en que dicho material proveniente de las excretas de los cerdos es una fuente de contaminación de recursos hídricos en los cuales pueda ser descartado, ya sea de manera directa o indirecta (por filtración y lixiviación) y por otra parte, la utilización de una cantidad grande de agua, no sólo como medio de hidratación para los cerdos sino para todas las actividades de limpieza y lavado de corrales (Chará, 2000).

Por ello, todo ese caudal de agua con una gran cantidad de sólidos orgánicos debe someterse a algún tipo de tratamiento para lograr mejorar la calidad del agua que sale de la granja. Si bien es cierto que la utilización de excremento como un abono orgánico tiene mucha aceptación, especialmente en zonas agrícolas de pequeña escala, es necesario realizar cierto acondicionamiento de dicho material para que pueda aplicarse adecuadamente, sin repercusiones dañinas al suelo en el cual se apliquen.

Así, pues, algunos sistemas de tratamiento de dicho material han tomado un papel preponderante en el mismo proceso. Para poder conocer y comprender bien la naturaleza de los mismos es necesario comprender de dónde viene el material a ser tratado.

En la mayoría de granjas de crianza de cerdos, se cuenta con un sistema de corrales en los cuales se coloca cierto número de cerdos, según su edad, tamaño y función. Así, es común observar tramos o corrales de 20 a 25 cerdos en el caso de lechones y cerdos en primeras etapas de crecimiento. En el caso de cerdos en últimas etapas de crecimientos los corrales pueden contar con 15 a 20 cerdos. En el caso de cerdas en gestación y maternidad, tienden a colocarse una por corral, caso similar para los verracos (cerdos cuya función es la fecundación de cerdas para reproducción).

Dependiendo de las características de los corrales, así como de la edad y alimentación de los cerdos así será la característica de sus excretas, las cuales constituyen la materia prima para el funcionamiento de los digestores. Además, las prácticas de lavado también son vitales, ya que de ellas depende la relación sólidos-agua con la cual dicho afluente ingrese al digestor. De manera aproximada se puede establecer un procedimiento general de lavado en el cual se pueda saber que se tienen una relación sólidos-agua determinada, pero lo más conveniente es contar con un sistema de monitoreo para determinar la relación de sólidos que ingresa en el digestor, como sistema de tratamiento (Burns, 2004).

En la mayoría de granjas de crianza porcina no se cuenta con métodos sistemáticos para el tratamiento de sólidos, y aunque se han instalado sistemas como lo pueden ser digestores, en la mayoría se trabajan dichos equipos en forma muy rústica. Por ello no se cuenta con suficientes datos de referencia que puedan servir para el diseño de digestores u otros sistemas de tratamiento de manera precisa y es necesario utilizar datos experimentales para poder determinar el estado de los mismos. Un estudio para granjas de cerdos en Colombia estableció los siguientes parámetros como aproximados y característicos en términos de ganado criado, tanto de levante (lechones) como de cebado (engorde), en una instalación con 100 animales de 50 kg promedio:

Cuadro 1: Parámetros característicos del efluente de los corrales hacia los sistemas de tratamiento para el caso de Colombia.

Parámetro	Por 100 kg de peso vivo	100 cerdos en ceba/día	Por año
Demanda bioquímica de oxígeno (kg)	0.25	12.5	4,562
Demanda química de oxígeno (kg)	0.75	37.5	13,687
Sólidos suspendidos totales (kg)	0.6	30	10,950
Sólidos totales (kg)	0.75	2.25	13,687
Nitrógeno (kg)	0.045	1.5	547.5

(Chará, 2000)

La tendencia actual, y en la cual se justifica la utilización de algunos sistemas de tratamiento, es en considerar las excretas no como desechos, sino como subproductos utilizables para procesos productivos. Así, utilizando sistemas de biodigestión anaerobia se produce biogás, el cual es una fuente energética renovable. Además, el flujo de sólidos en agua, después de pasar por sistemas de tratamiento, se fortalece en nutrientes como nitrógeno y fosfatos, como se muestra en el siguiente cuadro, con el mismo caso del estudio realizado en Colombia:

Cuadro 2: Principales productos obtenidos del tratamiento de excretas de cerdos, para el caso de Colombia.

Producto	Tasa de producción	Producción diaria por 100 cerdos	Producción anual por 100 cerdos	Equivalente
Biogás (m ³)	0.69 – 1.02 m ³ /kg de MS ¹	25.9 - 38.2	9,400 a 13,900	990 a 1,460 gal de diesel ²
Nitrógeno (kg)	0.045 kg/100 kilos de peso	2.25	821	1,784 kg de urea
P ₂ O ₅ (kg)	0.031 kg/100 kilos de peso	1.5	547	1,190 kg de super-fosfato triple

¹: Producción de materia seca: 0.75 kg/100 kpv (Cornare, 1997).

²: Un m³ de biogás equivale a 0.1 galones de diesel (Polprasert, 1989).

Básicamente existen diversos sistemas de tratamiento para las aguas residuales, los cuáles pueden ser físicos, utilizando sistemas de filtración o sedimentación, y pueden también ser químicos. La denominación “químicos” es relativa, ya que en muchos casos se dan por procesos bioquímicos, los cuales pueden ser aeróbicos o anaeróbicos. Según el medio, se mostrará acción metabólica diferente por parte de la biota presente en el agua a tratar. A continuación se muestra un cuadro comparativo de ambos tipos de metabolismo:

Cuadro 3: Cuadro comparativo del metabolismo aeróbico y el anaeróbico (bacteriano)

Característica	Metabolismo aeróbico	Metabolismo anaeróbico
Reacción química	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4$
Generación de calor	2,840 kJ/mol de glucosa	393 kJ/mol de glucosa
Destino del carbono	<ul style="list-style-type: none"> - 50% se convierte en CO_2 - 40 - 50% se incorpora a biomasa microbiana. 	<ul style="list-style-type: none"> - 95% se convierte en CH_4 y CO_2. - 5% se convierte en biomasa bacteriana
Destino de la energía	<ul style="list-style-type: none"> - 60% se almacena en nueva biomasa - 40% se pierde como calor 	<ul style="list-style-type: none"> - 90% retenida en CH_4 - 3 - 5% perdida en calor - 5 - 7% almacenada en biomasa
Consumo de energía	Alto	Nulo
Adición de nutrientes	Alta, especialmente Nitrógeno	Mínima a nula
Tiempo de arranque	Corto	Largo
Avance de la tecnología	Tecnología establecida	Reciente, en investigación
Tolerancia a la temperatura	Amplio rango	Mayores de 15° C

(Chará, 2000).

B. Funcionamiento de un biodigestor.

La digestión anaerobia es un proceso muy utilizado actualmente con el objeto de lograr un tratamiento de desechos al remover componentes orgánicos así como microorganismos peligrosos tanto en desechos domésticos como industriales. En el caso de las reacciones de digestión anaerobia es necesario hacer estudios para la determinación del funcionamiento de dichos digestores para observar de qué manera puede aumentarse la velocidad de reacción así como la eficiencia de dichos sistemas para reducir los tamaños de reactores y disminuir costos.

En términos generales, dentro de un digestor anaerobio ocurre una reacción fermentativa, que puede ocurrir en un esquema de dos etapas o de tres etapas, y lo anterior depende de los grupos metabólicos de bacterias presentes en el sistema (McInerney y Bryant, 1981:20)

Desde 1930, aproximadamente, se creyó que la fermentación anaeróbica ocurría en dos etapas, por la presencia de dos grandes grupos de bacterias. El primer grupo se constituía por un complejo conglomerado de especies de bacterias fermentativas que degradaban la mayor cantidad de sustratos mayores, como

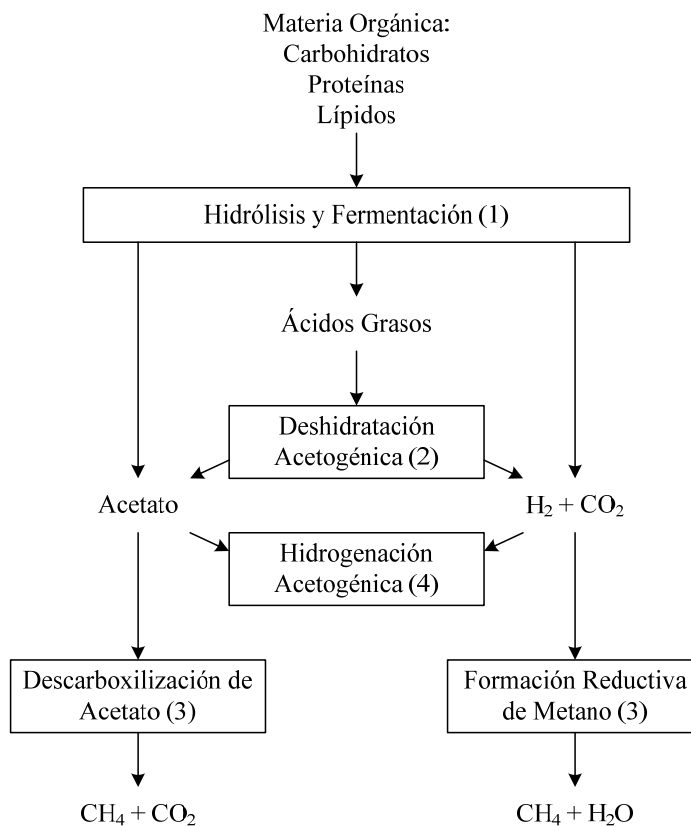
polisacáridos, proteínas y lípidos, con la producción de ácidos grasos volátiles, alcoholes, dióxido de carbono, hidrógeno, amoníaco y sulfuros. Por su parte, el segundo grupo estaba compuesto por bacterias metanogénicas, las cuales degradaban los ácidos grasos, alcoholes y el hidrógeno para producir metano y dióxido de carbono. Para 1967, estudios de Bryant *et al* demostraron que la fermentación de etanol y alcoholes similares se daba por la asociación sintrófica de dos especies de bacterias, actuando inicialmente un grupo de bacterias no metanogénicas para producir acetato e hidrógeno, y posteriormente entrando en acción otro grupo de bacterias de características metanogénicas para la degradación del hidrógeno en dióxido de carbono y metano (McInerney y Bryant, 1981:20).

Por otro lado, está el esquema de fermentación de tres etapas, que es el que ha sido más aceptado en años recientes. En dicho esquema se tiene un primer grupo de bacterias que son las bacterias fermentativas, las cuales son responsables de la degradación primaria de los sustratos mayores. Posteriormente se tiene un segundo grupo de bacterias las cuales se encargan a producir hidrógeno (H_2). De manera general dichas bacterias degradan propionatos y otras cadenas largas de ácidos grasos para producir acetato, dióxido de carbono e hidrógeno. Por último, el tercer grupo, el cual es el de bacterias metanogénicas, se encarga de utilizar el hidrógeno producido para reducir el dióxido de carbono a metano, así como la conversión de los acetatos en metano y dióxido de carbono.

En la Figura 1 puede observarse un cuarto grupo de bacterias que llevan a cabo una hidrogenación acetogénica para la formación de acetato a partir de hidrógeno y monóxido de carbono. Generalmente las bacterias fermentativas y las que utilizan hidrógeno para producción de metano se encuentran dentro del tracto digestivo de los animales, aunque el cuarto grupo de bacterias (que utilizan H_2 y CO_2 para producción de acetato) pueden también encontrarse en esta etapa.

En el panorama centroamericano se tiene que el desaparecido Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI) realizó diversos estudios acerca de la utilización de desechos agroindustriales y se encontró que la producción de biogás era una de las rutas más factibles y beneficiosas. Así, dichos estudios llevaron en 1979 a que se propusieran ciertos modelos y prototipos de digestores para la producción de biogás. Con base a los sistemas clásicos utilizados para la producción de biogás, dicho instituto presentó una modificación al modelo horizontal, utilizando un digestor rectangular, parcialmente enterrado para el almacenaje de gas y control de presión.

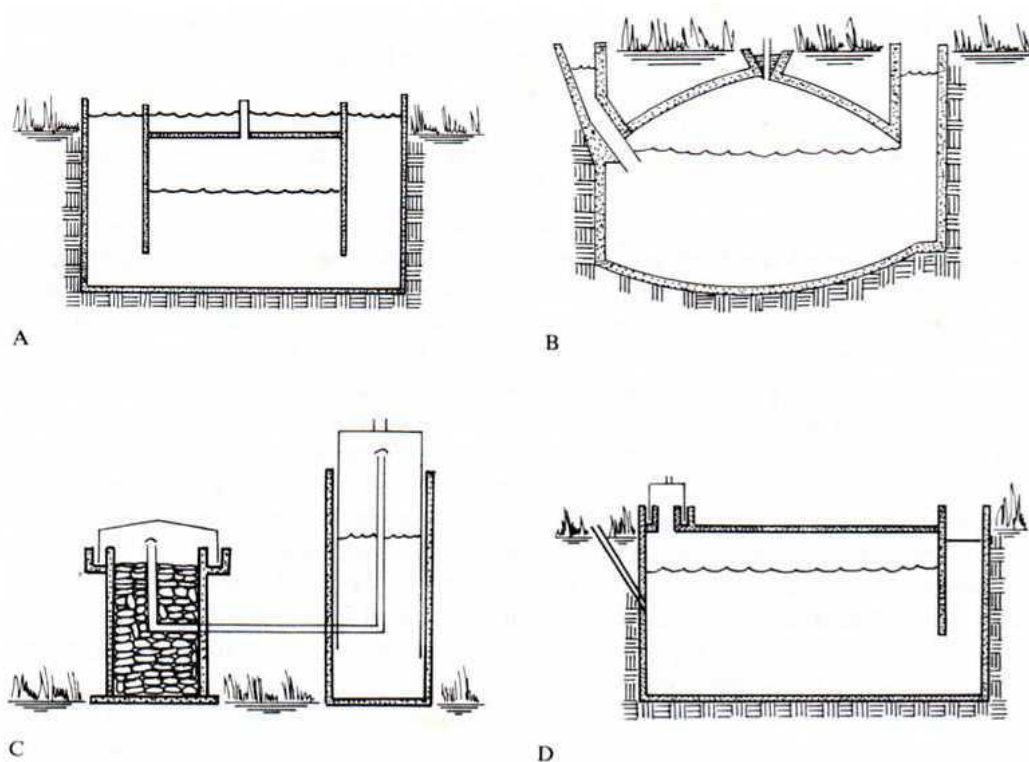
Figura 1: Esquema de tres etapas para la degradación completa de materia orgánica mostrando las rutas metabólicas generales así como los tres grupos metanogénicos principales: (1) Bacterias fermentativas, (2) bacterias productoras de H_2 (como las bacterias reductoras y bacterias acetogénicas) y (3) bacterias metanogénicas.



(McIerney y Bryant, 1981: 21).

Con base en lo anterior, se puede determinar la forma en la cual se opera un biodigestor anaerobio. De manera inicial, se debe tener un sistema de transporte de los sólidos en un medio húmedo, generalmente por tuberías. Las cargas a un biodigestor deben ser controladas desde el punto de recolección de los sólidos, lo cual generalmente se hace por medio de corrientes de agua. En el caso particular de granjas de cerdos, los procesos de lavado son realizados en las mismas galeras de crianza y todo el material es juntado en cajas de recolección, para posteriormente transportarse por medio de una tubería hacia la zona del digestor (Burns, 2004).

Figura 2: Diferentes unidades para producción de biogás en el campo, en Centro América. (A) Horizontal, (B) diseño chino, (C) alto en sólidos (batería), y (D) horizontal modificado (ICAITI)



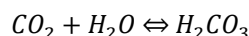
(Calzada *et al*, 1981: 50)

Posteriormente tiende a ubicarse un tanque o caja de captación, donde todo el material es almacenado temporalmente antes de ingresar en el digestor. En plantas grandes, con digestores de tamaños elevados dicho tanque es un medio para asegurar una alimentación continua al digestor, aunque en la mayoría de los casos dichos sistemas son operados de forma semi-continua, ya que se operan con cargas, pero no hay un vaciado completo del sistema después de cada período de digestión. Es necesario tener cuidado de no dejar mucho tiempo el material en dichos tanques de captación, ya que esto hace que el mismo material empiece a acidificarse, lo cual no es conveniente para el proceso de biodigestión.

Así, posteriormente el fluido se ingresa al digestor, generalmente con una tubería de inmersión o sumergida en la fase “líquida” del digestor, con el objeto de evitar presencia de aire o contacto del material entrante con aire, y así asegurar una atmósfera anaerobia para que el proceso metanogénico pueda llevarse a cabo. Los tiempos de retención en estos sistemas tienden a ser muy largos, ya que el proceso de degradación es bastante lento. Así, para un digestor convencional se pueden tener tiempos de residencia que van desde 24 horas hasta un mes, según se desee reducir la carga orgánica en el material tratado (Burns, 2004).

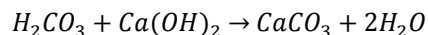
De dicho sistema se tienen dos corrientes de salida, una gaseosa y otra “líquida”. La fase gaseosa corresponde al biogás, mientras que la “líquida” corresponde al agua residual tratada. Se hace connotación diferente del término “líquido”, ya que no es una fase líquida pura sino que es una mezcla de sólidos y agua. Generalmente dicho efluente de agua residual tratada se puede utilizar como agua para fertirriego, ya que sus características de disponibilidad de nutrientes como fósforo y nitrógeno son mejoradas por el proceso de degradación anaerobia. En el caso del biogás, denominado así porque es producido por el metabolismo biológico de bacterias, puede ser utilizado como combustible. De manera general se ha determinado que dicho biogás consiste únicamente en dióxido de carbono y metano, pero también lleva concentraciones menores de otros gases, como sulfuro de hidrógeno (H_2S). En un digestor bien montado, se deben tener por lo menos dos filtros especiales para la purificación de dicho gas. El primero consiste en un “filtro de cal”, que no es más que una lechada de cal por donde se hace pasar el flujo gaseoso. Por reacción con la base, el dióxido de carbono presente en el flujo gaseoso forma carbonato de calcio. Inicialmente se tiene el equilibrio del dióxido de carbono con agua para formar ácido carbónico:

Ecuación No. 1:



y posteriormente dicho ácido reacciona con el hidróxido de calcio para formar carbonato de calcio y agua:

Ecuación No. 2:



Aunque el equilibrio del dióxido de carbono con el agua tiende hacia el dióxido de carbono, debido a la presencia del carbonato de calcio, se disminuye la concentración de ácido carbónico y el equilibrio tiende hacia este y posteriormente a su conversión en carbonato de calcio (Grady *et al.*, 1999:635).

El segundo filtro utilizado es un filtro para el sulfuro de hidrógeno. Generalmente se utiliza un filtro relleno con viruta metálica, ya que el sulfuro de hidrógeno es corrosivo para varios metales formando sulfuros metálicos, y evitando así que siga en la corriente gaseosa.

C. Principales tipos de digestores

Aunque todos los digestores tienen como base el mismo fundamento de operación, se han desarrollado diversos tipos para lograr mejores resultados o resultados específicos para el tipo de carga utilizada. Una clasificación muy aceptada es la que establece los siguientes tipos de digestores:

- Lagunas cubiertas.
- Digestores agitados.

- Digestores de flujo conectado (plug flow).
- Reactores anaeróbicos de secuencias batch (ASBR por sus siglas en inglés).
- Digestores de film fijo sobre soporte.

(Burns, 2004).

Las lagunas cubiertas son sistemas de biodigestión, las cuales se construyen directamente en la tierra. Para ello se excava una región, relativamente amplia, y se aísla de la tierra con algún material impermeable, permitiendo el ingreso de cargas. Además, se coloca alguna cubierta, ya sea en toda el área del digestor o en secciones donde más se tenga producción de biogás (no es recomendado no cubrir toda el área, ya que ello representa un riesgo de contaminación fuerte). Entre sus ventajas se cuenta que sus costos de construcción, mantenimiento y tecnología son bajos, pero se tienen inconvenientes como acumulación de sólidos y un área amplia de construcción (Burns, 2004).

Figura 3: Digestor experimental tipo laguna cubierta en Pennsylvania, Estados Unidos.



Los digestores agitados, como su nombre lo dice, consisten en recipientes o tanques a los cuales se les acopla un agitador mecánico, con el objeto de homogenizar el contenido interno del reactor y así lograr mejores resultados en el proceso de digestión. Generalmente no son de tamaños tan grandes como las lagunas cubiertas, por el factor limitante de la construcción del tanque. Estos digestores pueden ser tipo batch, semi-continuo y continuo, según sea la operatoria de la unidad y la característica principal de los mismos es que la “concentración” interna del digestor es uniforme e igual a la de la salida. Entre sus ventajas están que se tiene mucha experiencia con reactores (en general) de dicho tipo y que es posible

trabajar con cargas muy variadas de sólidos en el afluente. Entre sus desventajas está que no se logra la estabilización y fijación de biomasa, así como sus costos en cuanto a agitación mecánica (Burns, 2004).

Figura 4: Digestor de tanque agitado semicontinuo en China.



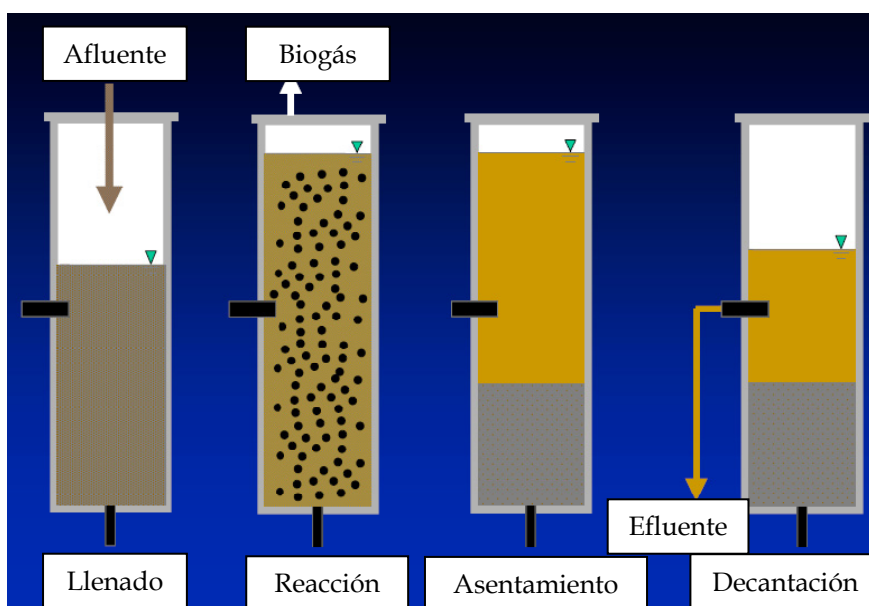
Los digestores de flujo conectado (plug-flow) tienen la peculiaridad de ser reactores, generalmente, largos, construidos por debajo del nivel de suelo, para aprovechar el soporte de la tierra, estructuralmente hablando. En su parte superior se coloca una cubierta de polímero resistente y expansible hasta cierto grado, para la acumulación del biogás. Cada cierto tiempo (generalmente diario) se introduce una cantidad de carga en el digestor. Las adiciones periódicas permiten el movimiento del material a lo largo del digestor para ser recibidas en la salida opuesta del mismo, con tiempos de residencia comunes de 20 a 30 días. No utiliza sistemas de agitación. Este tipo de digestores trabaja muy bien con cargas con alto contenido de sólidos (11 – 14%) (Burns, 2004).

Figura 5: Digestor de flujo conectado (plug-flow) experimental en Pennsylvania



El reactor anaeróbico de secuencia batch (ASBR) es un reactor por lotes el cual sigue una secuencia dada de operación. Así, se empieza por la carga del reactor inicialmente vacío, se deja un tiempo determinado para que ocurra la reacción de digestión y posteriormente se hace la descarga de los materiales, empezando por el biogás en la parte superior. Se deja asentar los sólidos remanentes y la descarga de la fase “líquida” se hace en dos partes: líquido tratado en la parte media y lodos en la parte inferior. Aunque se tiene la ventaja de que puede operar con un rango alto de sólidos en la carga, se tiene el problema de que pueden tenerse altas tasas de acumulación en incrustamiento de sólidos, así como que requiere mucho tiempo de operación para una carga dada (Burns, 2004).

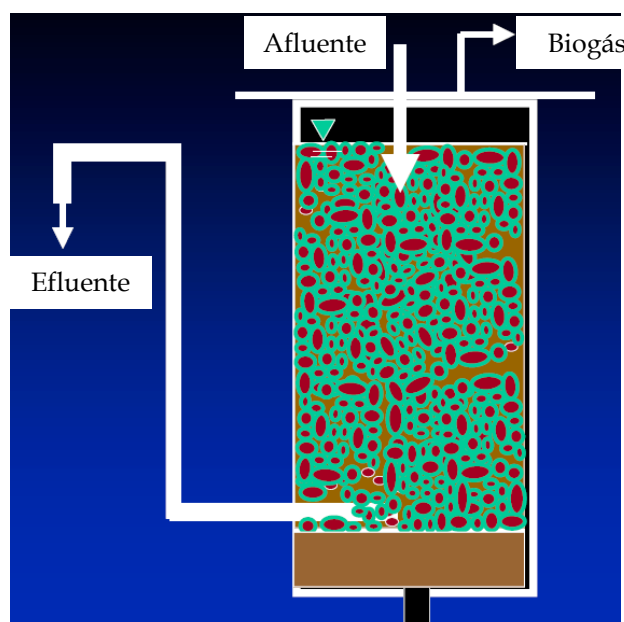
Figura 6: Esquema de operación de un reactor anaeróbico de secuencia batch



(Burns, 2004)

Los digestores de film fijo sobre soporte tienen la ventaja de dar mejores resultados en cuanto a eficiencia de conversión, ya que se logra asegurar el contacto entre el afluente y los microorganismos que llevan a cabo la digestión. El material de soporte, en la mayoría de los casos consiste en empaques porosos, los cuales pueden ser poliméricos o simples como piedra pómez, entre otros. Entre las ventajas que muestra dicho sistema está que los tiempos de retención hidráulica son bajos y se logra una buena inmovilización de la biota microbiana, aumentando así la eficiencia de conversión. Pero muestra problemas con manejar cargas altas de sólidos y es muy susceptible a tener taponamientos u obstrucciones, así como que requiere que se haga un mecanismo de separación de sólidos (Burns, 2004).

Figura 7: Esquema de operación de un reactor de biofilm fijado en soporte



(Burns, 2004)

D. La carga

El material que se carga a un biodigestor está compuesto básicamente por lo siguiente.

- Sustancias sólidas orgánicas.
- Sustancias sólidas inorgánicas
- Agua

El agua es un elemento de suma importancia en este proceso, pues no sólo permite que el material a fermentar tenga mayor fluidez sino que tiene incidencia directa en el funcionamiento de las bacterias. Lo anterior se debe a que al tener mayor fluidez el sistema, las bacterias, tanto fermentativas como metanogénicas, pueden llegar con mayor facilidad al sustrato (la materia orgánica). Se debe establecer un equilibrio en la cantidad de agua en el sistema ya que, si es cierto que a mayor cantidad de agua mayor facilidad de desplazamiento, si se tienen concentraciones de sólidos muy bajas se tendrá un uso inadecuado del recurso hídrico. Se recomienda tener una agitación periódica para aumentar la producción de biogás, pero debe realizarse de manera adecuada, ya que se puede tener el riesgo de inyectar aire dentro del sistema, lo cual no es deseado. Una opción es colocar una tubería de recirculación intermitente desde el efluente hacia el interior de la cámara de digestión, o contar con un sistema de agitación dentro de la cámara de digestión, pero esto representa dificultades técnicas del proceso. Se ha establecido experimentalmente que una concentración de sólidos del 5 al 10% resulta apropiada para un funcionamiento adecuado del digestor (Álvarez *et al*, 2002: 5).

Otro factor importante en la carga es la disponibilidad de nutrientes, lo cual varía respecto al sustrato utilizado. En especial es de relevante importancia la relación carbono/nitrógeno (C/N). Relaciones C/N entre 20:1 y 30:1 son adecuadas para una producción satisfactoria de biogás, según estudios realizados en la Universidad Nacional del Nordeste, en Argentina (Álvarez *et al*, 2002: 5).

E. Los productos

1. El efluente. En el efluente líquido de un proceso de digestión anaerobia se tienen que el nitrógeno contenido en la materia orgánica inicial es transformado en amoníaco disuelto en agua, el cual puede utilizarse para riego de plantas, ya que es un nutriente. Generalmente efluentes con menor cantidad de sólidos son más ricos en nitrógeno y potasio, mientras que fluentes más espesos son ricos en fósforo. Para que las características del efluente sean adecuadas para su uso como fertilizante, se recomienda tener relaciones de nitrógeno: anhídrido fosfórico: óxido potásico de 1:0.5:1 (Álvarez *et al*, 2002: 6)

2. El biogás. El biogás es ligeramente más liviano que el aire y su temperatura de inflamación es de alrededor de 700°C (como referencia se sabe que el punto de inflamación del diesel es de 350°C y el de la gasolina y el propano es cercano a los 500°C). La temperatura de la llama puede alcanzar los 870°C.

En cuanto a su composición, de manera general tiene un contenido aproximado de 60% de metano y 40% de dióxido de carbono, y su ritmo de producción puede variar de 0.5 a 0.75 m³/kg de sólidos volátiles destruidos (Perry, 1997: 96).

Además de los componentes anteriores se muestra presencia menor de otros gases como sulfuro de hidrógeno, H₂S (concentraciones no mayores del 1%), por lo que generalmente no se cuentan dentro del balance de componentes, pero sí es necesario tomarlos en cuenta para sistemas de tratamiento del gas producido.

Por no ser un gas con componentes combustibles en su totalidad, su poder calorífico es bajo en comparación con otros combustibles, pero al aumentar el tiempo de retención es posible aumentar la cantidad de metano producido, con lo cual se aumenta su poder calorífico. Para que el biogás sea inflamable se tiene un límite inferior de un 50% de concentración de metano (aunque el parámetro más importante en cuanto a la inflamabilidad del mismo es su concentración en un ambiente con aire, cuyos límites de inflamabilidad están entre el 5 y 15%). Al arrancar una planta o un digestor, el biogás producido durante los primeros 3 a 5 días no es de tan buena calidad y por lo mismo no es utilizable.

Aunque se tiene que la composición del biogás depende mucho del proceso de digestión y así las proporciones de sus componentes pueden variar, de manera general se tiene que la mayoría del gas es metano y en menor proporción dióxido de carbono (55 – 80% en CH₄ y 20 – 45% CO₂). Aunque hay presencia de otros gases como sulfuro de hidrógeno, amoníaco, nitrógeno y vapor de agua, su concentración no pasa del 1% y en la mayoría de los casos solamente se toma en cuenta al sulfuro de hidrógeno por su característica contaminante y de mal olor (Costa, 2003).

Debido a la variación en la composición del biogás, generalmente es necesario tener en cuenta la misma para poder determinar las características del mismo, especialmente en términos energéticos. En la mayoría de literatura se da referencia para biogás con 60% de metano y 40% de dióxido de carbono. Así, se tiene que la capacidad máxima calorífica para biogás con esas características es de 25.7 MJ/m³ (Perry, 1997: 27-26).

Por la experiencia tenida hasta el momento, la concentración máxima de metano que ha sido posible producir en un digester anaerobio es del 80%, ya que debido al metabolismo bacteriano es imposible eliminar completamente el dióxido de carbono del medio ya que es un aceptor natural del proceso metanogénico. Para el caso particular de excremento de cerdos se tienen concentraciones de metano en biogás entre 65% y 70% (Costa, 2003).

F. Control del proceso de producción de biogás.

Para llevar a cabo de manera adecuada un proceso de producción de biogás por digestión anaerobia es necesario tener en cuenta el control de diversos factores, entre los que se encuentran:

- Temperatura: Se recomienda que se mantenga alrededor de los 35°C para que haya un funcionamiento óptimo del sistema.
- Acidez: Tiene incidencia directa en la cantidad de metano que puede producirse y se recomiendan valores de pH entre 6.6 y 7.6
- Contenido de sólidos: Se recomienda una proporción del 10%, por lo cual los materiales orgánicos altos en humedad son los más recomendados para el efecto.
- Nutrientes: Son esenciales para el crecimiento de las bacterias y su actividad. Entre los nutrientes básicos están carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales (en el caso de los

digestores para tratar excretas como las porcinas, la mayoría de dichos materiales van contenidos en la materia orgánica utilizada).

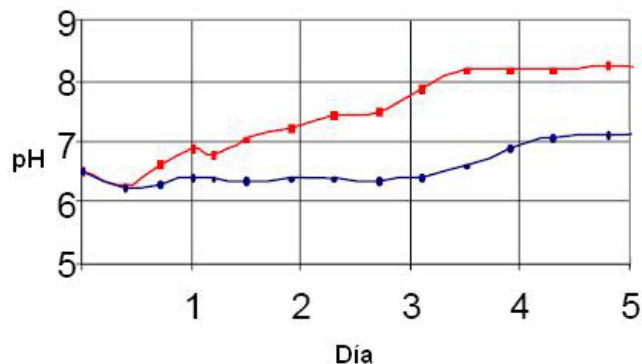
- Tóxicos: Es necesario cuidar que el sistema esté libre de oxígeno, ya que desinhibe el metabolismo anaerobio. Además es necesario evitar concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales, residuos de detergentes, pesticidas y en muchos casos presencia de antibióticos.

(Perry, 1997: 96)

Ahondando más en el tema de la temperatura, se tiene que la misma es crítica para el buen funcionamiento del digestor. No significa que si no se encuentra en las cercanías de 35°C el digestor no funcione, pero se tiene que el rendimiento baja al alejarse de dicho valor en ambas direcciones, ya que si la temperatura es baja se tiene que la actividad de las bacterias metanogénicas disminuye y aumenta el de las bacterias fermentativas, con lo cual se tiene menor producción de biogás y mayor producción de ácidos grasos libres en la fase “líquida”. Por otra parte, al aumentar demasiado la temperatura se corre el riesgo de inhibir las bacterias e inclusive destruirlas. Para lograr tal efecto en diversos sistemas de digestión anaerobia instalados, especialmente en Estados Unidos y algunos países sudamericanos, se han utilizado diversos sistemas de calentamiento y control de temperatura, basados principalmente en la utilización del biogás, al quemarlo, para calentar el interior y mantener una temperatura apropiada. Así, la utilización de serpentines internos para calentar el material digerido o la utilización de intercambiadores externos han sido opciones factibles para lograr tal control (Costa, 2003).

El pH es de vital importancia en el funcionamiento de un biodigestor, especialmente porque las bacterias metanogénicas son susceptibles a pH bajos y decrece su actividad biológica. Por ello, se recomienda que la carga de un digestor se haga en las condiciones más cercanas a la neutralidad, para tener un buen rendimiento. Inclusive hacer cargas ligeramente básicas es recomendado, pero se tiene el inconveniente que en el proceso conviven dos tipos de bacterias: Productoras de ácidos y metanogénicas. Las primeras (fermentativas) hacen que en las primeras etapas de la fermentación se reduzca el pH, pero al iniciar la etapa de producción de gas la actividad bioquímicas de las bacterias metanogénicas hacen que aumente el pH. Así, una descarga con valores de pH mayores de 7 da buena referencia de conversión y producción de metano. En la Figura 8 se muestra el cambio de pH en dos digestores tipo batch, que aunque operados a diferentes condiciones, muestran un comportamiento similar de reducción inicial y aumento posterior. En varios casos, para lograr mejores rendimientos en la producción de biogás se procede a agregar algún álcali en la carga (generalmente cal), para regular el pH (López, 2004: 6).

Figura 8: Cambio de pH en función del tiempo para dos digestores anaerobios tipo batch (López, 2004:6)



En el caso de contenido de sólidos y nutrientes, es necesario tener en cuenta cuál es el sustrato utilizado en el digestor, ya que de ello depende si es necesario agregar algún componente en particular o no. En el caso de las excretas porcinas se tiene una buena relación de nutrientes y no es necesario tomar en cuenta la adición de más nutrientes específicos. Lo que sí es necesario cuidar es el contenido de sólidos, para evitar que sea muy espeso o muy ralo. Se recomiendan valores entre un 6 – 15% de sólidos (Costa, 2003).

Es necesario recalcar que para que la digestión se dé de manera apropiada es necesario que el contenido interno del digestor se encuentre lo más homogéneo posible. Para ello se ha recalcado que la agitación del material dentro del digestor es de suma importancia. En el caso de tanques agitados, diseñados para el efecto, se ha considerado dentro del diseño la agitación como tal, aunque otros sistemas han sido desarrollados en función del tamaño y forma del digestor, variando desde sistemas de recirculación del biogás hacia el interior del digestor con salidas dispersantes para la producción de burbujas o sistemas combinados de bombeo y recirculación de las aguas residuales digeridas (Costa, 2003).

G. Utilización del biogás.

La principal utilización del biogás está dada en quemadores de lámparas y estufas como un medio de combustión normal. También se han hecho ensayos satisfactorios para su utilización con motores de combustión interna, con lo cual es posible generar energía eléctrica. En todos estos sistemas es necesario tomar en cuenta que hay que darle un tratamiento a dicho gas para evitar daños en equipos y tuberías, especialmente por el sulfuro de hidrógeno, el cual es altamente corrosivo. Por ello que se utilicen filtros metálicos (con óxidos de hierro especialmente) para eliminar dicho gas de la corriente (dicha purificación no es tan importante en motores de combustión interna). El licuado del biogás todavía no ha sido muy estudiado, aunque estudios preliminares muestran que no es rentable, por lo cual es necesario tener sistemas de almacenaje y de conducción para utilización *in situ* o en lugares cercanos.

Para tuberías y demás medios de conducción del biogás se recomienda utilizar especialmente polímeros o caucho, debido a su poder corrosivo, o acero inoxidable. El uso de mangueras es adecuado, pero debe considerarse su reemplazo periódico debido a que con su exposición al sol pueden sufrir daños.

Debido a los anteriores cuidados, se han determinado dos formas factibles y adecuadas de utilización del biogás:

- Quemarlo para utilizar la energía calorífica liberada (calentamiento de agua, calefacción de ambientes, etc.).
- Inyectar el biogás a un motor de combustión interna acoplado a un generador eléctrico.

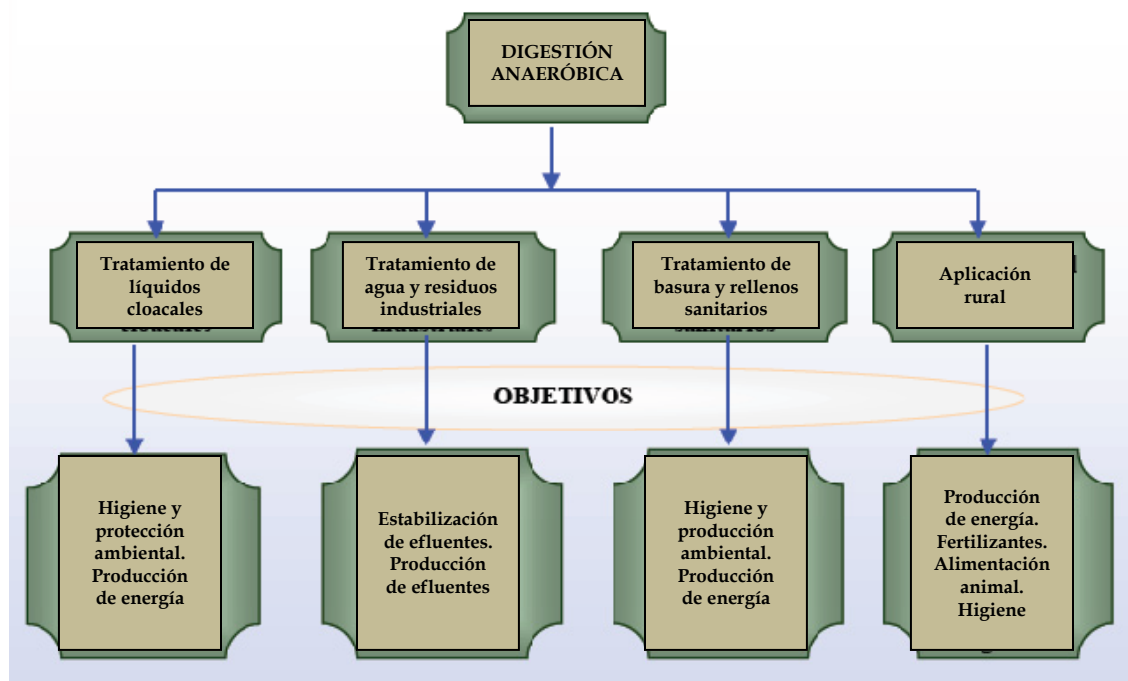
(Álvarez *et al*, 2002: 8).

En cuanto a la opción de quemar el biogás para utilizar la energía calorífica liberada cabe mencionar que es la opción más utilizada en las granjas de crianza de cerdos. Para tales casos se utilizan tanto lámparas quemadoras de biogás como sistemas de calentamiento de agua utilizando dicho gas. En el caso de las lámparas, al quemarse el biogás se dan fenómenos de transferencia por convección y por radiación, por lo cual las mismas se colocan a distancias no muy grandes de los lechones con el fin de mantener un ambiente caliente y adecuado para el crecimiento de los mismos, ya que se ha encontrado experimentalmente que los lechones expuestos a ambientes muy fríos tienden a no crecer tanto. Por ello, el calentamiento de los mismos, los cuales son separados de su madre a los pocos días de nacidos, no sólo tiene como objeto evitar un shock en los mismos sino también posee motivos económicos ya que mejora el engorde y crecimiento de los cerdos. En el caso de mataderos se utilizan calderas o calderines de biogás para calentamiento de agua, la cual se utiliza en el proceso de escaldado de los cerdos (Álvarez *et al*, 2002:8).

H. Sinopsis de la biodigestión anaerobia.

Como se ha observado, la biodigestión anaerobia se ha convertido en un mecanismo adecuado de tratamiento de desechos, no sólo con motivos de protección ambiental sino también como una opción rentable de aprovechamiento de estos desechos o subproductos, especialmente en términos energéticos, ya que representa una opción sustentable de producción de combustible, que si es bien utilizado, representa una oportunidad rentable, no sólo a nivel industrial sino también como desarrollo de comunidades rurales. En la figura 9 se muestra un esquema general de las posibilidades de utilización de la digestión anaerobia.

Figura 9: Principales campos de acción y utilización de la digestión anaerobia



(Costa, 2003)

I. Diagnóstico de un biodigestor.

De manera general, al evaluar el funcionamiento de un biodigestor es necesario enfocarse en dos partes del mismo: El afluente y efluente, por un lado, y el biogás por el otro. Aunque están relacionados por medio de un proceso bioquímico, los mecanismos de análisis son diferentes. Así, en cuanto al afluente y efluente, las pruebas más comúnmente realizadas corresponden a demanda química y demanda biológica de oxígeno, así como a contenido de sólidos suspendidos totales. Tanto en el caso de la demanda química como la bioquímica de oxígeno, se utilizan métodos respirométricos para el efecto y se mide, en el caso de la demanda química, la cantidad de oxígeno requerida para oxidar, valga la redundancia, todo el material inorgánico y orgánicos de la muestra, utilizando para el efecto una solución sulfo-crómica de análisis, mientras que para la demanda bioquímica se mide la cantidad de oxígeno consumido en un período de 5 días por la muestra y es una medida indirecta de la actividad biológica del sistema, ya que mide la respiración microbiana (Calderón, 2001).

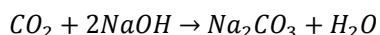
Por su parte, la medición de los sólidos suspendidos totales da el dato de la cantidad de sólidos por unidad de volumen de muestra. Para ello, se utilizan métodos de sedimentación, decantado y filtrado, seguido de un proceso de secado (por evaporación y horneado de muestras), para establecer la masa de sólidos secos en una muestra determinada. Se recomienda no utilizar calcinación (Calderón, 2001).

En cuanto al análisis de la fase gaseosa (biogás), se debe determinar la tasa de producción así como la calidad del mismo. En cuanto a la tasa de producción, se recomienda utilizar sistemas de medición de flujo o sistemas contadores de gas, similares a los utilizados residencialmente en países donde es necesaria la calefacción por combustión de gas natural o gas residencial (Costa, 2003).

Por su parte, para la determinación de la calidad del biogás, es necesario determinar la concentración tanto de metano como de dióxido de carbono. Determinar el metano de manera directa tiende a ser muy complicado y costoso, ya que generalmente se hace por medio de cromatografía de gases, siendo necesario para el efecto contar con un patrón de metano puro y sistemas adecuados de dilución para poder calibrar el cromatógrafo. Por ello, las técnicas de análisis de biogás se centran en la determinación de la concentración de dióxido de carbono. Un método práctico para el mismo es utilizar un medidor digital del porcentaje de CO₂, similar a los utilizados en análisis de combustión. Ya que la mayoría de estos sistemas funcionan para concentraciones bajas de dióxido de carbono, puede tenerse el inconveniente de no poder realizar lecturas adecuadas de dicho valor, por lo cual también se tiene la ruta de análisis químico.

Utilizando el principio del filtro de cal para atrapar el dióxido de carbono, el método más utilizado se basa en atrapar el dióxido de carbono de un volumen conocido de muestra en una solución patrón de hidróxido de sodio. Al reaccionar el hidróxido de sodio, se forma carbonato de sodio, según la siguiente ecuación:

Ecuación No. 3:



Debido a la formación carbonato de sodio, así como a la remanencia de hidróxido de sodio (por no reaccionar en su totalidad), es necesario tomar en cuenta consideraciones especiales. Así, al determinar el remanente de hidróxido de sodio es posible determinar, estequiométricamente, la cantidad de dióxido de carbono en la muestra tomada. Ya que tanto el hidróxido de sodio como el carbonato de sodio son solubles en agua una opción consiste en recurrir al método de Winkler, por medio del cual se determina la alcalinidad total, valorando una muestra con una solución de ácido clorhídrico (utilizando naranja de metilo como indicador) y posteriormente haciendo un tratamiento a otra muestra con una solución de cloruro de bario para precipitar todo el carbonato de sodio en forma de carbonato de bario, filtrarlo posteriormente y valorar el sobrenadante con la misma solución de ácido clorhídrico, utilizando fenolftaleína como indicador. De esa manera es posible determinar la concentración de hidróxido y posteriormente calcular el contenido de dióxido de carbono en la muestra de biogás (Skoog, 2001: 354).

III. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto tiene como objeto determinar la eficiencia de dos sistemas de digestión anaerobia de excretas de cerdo en un medio acuoso, para observar en qué grado los biodigestores cumplen con su trabajo de producción de biogás así como sistemas de tratamiento de desechos, ya que se debe cumplir con normativas que establecen la calidad de los efluentes que son descargados de procesos industriales o pecuarios. Así, esta investigación pretende determinar si los digestores analizados cumplen con la normativa establecida en el Acuerdo Gubernativo 236 – 2006. Además de los requisitos legales en cuanto al descarte de aguas residuales, la inadecuada utilización de digestores así como descarte de sus efluentes puede repercutir en problemas ambientales como lixiviación de todo el material descargado contaminando mantos freáticos cercanos. Debido a ello esta investigación busca analizar si estos inconvenientes se presentan en los digestores estudiados y de ser así poder dar recomendaciones prácticas para evitar futuros daños ambientales.

Por otro lado, con los resultados obtenidos es posible determinar la buena o mala utilización del biogás generado, para poder hacer recomendaciones concernientes a su uso y lograr un mejor aprovechamiento de dicho recurso como fuente energética de proceso.

Por último, como unidad productiva, a través de este análisis se busca caracterizar la operación de los digestores en vías de observar si es adecuada o inadecuada para la producción de biogás, no sólo en cantidad sino en calidad, lo cual es importante ya que de ello depende la utilización eficiente del recurso y evitar desperdicios que puedan ser contaminantes y económicamente perjudiciales.

IV. OBJETIVOS

A. GENERAL

- Realizar la evaluación de la eficiencia de dos digestores anaerobios instalados en dos granjas de crianza de cerdos, cada uno instalado en una de las granjas.

B. ESPECÍFICOS

- Medir la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en la carga y descarga de los digestores.
- Medir el contenido de sólidos en la carga y descarga de los digestores.
- Medir el pH en la carga y descarga de los digestores.
- Determinar el tiempo de retención del material dentro del digestor.
- Medir la producción de biogás en términos de volumen por unidad de tiempo.
- Medir la concentración de metano en el biogás producido.
- Determinar la eficiencia de utilización del biogás producido, en el proceso de calefacción de lechones de crianza.

V. PROBLEMA A RESOLVER

Debido a que en las granjas de cerdos se tienen un flujo de carga orgánica bastante grande, el cual puede representar alto grado de contaminación, con esta investigación se busca determinar si el funcionamiento de los digestores utilizados para el tratamiento de dichos sólidos es adecuado y se logra una disminución relevante en la demanda bioquímica de oxígeno en dicho flujo.

Por no contar con sistemas adecuados de control, es necesario caracterizar la operatoria de ambos digestores y así determinar su adecuada o inadecuada manipulación y operación, en términos de cargas, descargas, calidad de afluente y efluente, así como factores como el pH, temperatura de operación y tiempos de retención hidráulica. Con ello se podrá tener un acercamiento más técnico al funcionamiento de los digestores ya instalados, uno a la altura del kilómetro 94.5 de la carretera Antigua Guatemala – Escuintla (en la frontera entre Sacatepéquez y Escuintla, del lado de Sacatepéquez) y el otro en las inmediaciones de San Luis Pueblo Nuevo (en la frontera entre Sacatepéquez y Chimaltenango, del lado de Chimaltenango).

Además, al hacer el análisis de la eficiencia de los quemadores utilizados para la combustión del biogás, como calefacción para los cerdos de menor tamaño, se podrá determinar si el método utilizado es adecuado o no. Con todos los datos anteriores será posible determinar no sólo el diagnóstico de los digestores, el cual se desconoce en la actualidad, sino también qué tan adecuado es su uso, ambientalmente hablando.

VI. METODOLOGÍA

ETAPA PRELIMINAR

- 1) Se realizaron tres visitas de reconocimiento en ambas granjas (seis en total), para observar las características principales de cada uno de los digestores.
- 2) Se buscó en fuentes bibliográficas y estudios previos información acerca de los fundamentos de la digestión anaerobia, los diversos modelos de digestores existentes y sus principales características técnicas y operativas, así como de la naturaleza y los usos del biogás.

ETAPA EXPERIMENTAL Y DE ANÁLISIS.

ANÁLISIS DE FASE LÍQUIDA.

Determinación de la demanda química y bioquímica de oxígeno y de los sólidos suspendidos totales.

Se tomaron muestras *in situ* tanto de la carga como de la descarga de cada digestor. Dichas muestras fueron tomadas los días 4 de octubre, 9 de octubre y 23 de octubre de 2007, tanto en la Granja La Flor como en la Granja Agua Blanca de la siguiente manera:

- 1) Se revolvió el contenido del tanque de captación para homogenizar el material.
- 2) Se tomó un recipiente plástico para la toma de muestras *in situ*, habiéndose colocado guantes de látex para evitar cualquier contaminación cruzada.
- 3) Se enjuagó el recipiente para toma de muestra tres veces en el tanque de captación.
- 4) Se tomó la muestra en el recipiente, cuidando de no dejar espacio vacío (lograr que el recipiente quede completamente lleno del material muestreado).
- 5) Se tomó la temperatura de la muestra.
- 6) Se cerró adecuadamente el frasco de muestra y se colocó en forma vertical en una hielera buscando mantener la muestra a una temperatura aproximada de 5°C.

- 7) Se repitieron los pasos 1 al 6 para la toma de muestra en el área de descarga, cuidando de reemplazar los guantes de látex para el efecto.
- 8) Toda vez tomadas la muestras, se trasladaron debidamente enfriadas hacia el laboratorio de análisis para la determinación de la demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales.

Nota: El procedimiento anterior se realizó tres veces, para cada uno de los digestores, obteniéndose un total de doce muestras para analizar.

DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL BIOGÁS

- 1) Se prepararon tres soluciones patrón de hidróxido de sodio 0.1 M (2 litros de cada solución), disolviendo hidróxido de sodio grado analítico en agua destilada.
- 2) Se valoraron las tres soluciones utilizando ftalato ácido de potasio, para determinar la concentración exacta.
- 3) *In situ*, se midieron 500 mL de cada una de las soluciones y se les hizo burbujear biogás por 7 segundos a cada una (entre las dos granjas se obtuvieron seis muestras).
- 4) Se midió la velocidad lineal de salida del biogás y el diámetro del ducto de salida.
- 5) Se midió la temperatura ambiente.
- 6) Ya en el laboratorio de análisis, se preparó una solución patrón de ácido clorhídrico 0.5 M (1 litro de solución).
- 7) Se prepararon 500 mL de una solución de cloruro de bario al 10%.
- 8) Se tomó 100 mL de cada solución de muestra (de las tres soluciones para cada granja).
- 9) Posteriormente se tomaron tres alícuotas de 10.00 ± 0.05 mL de cada solución de muestra y se valoró con la solución patrón de ácido clorhídrico utilizando naranja de metilo como indicador (en solución acuosa al 0.01%), para determinar la alcalinidad total.
- 10) Toda vez determinada la alcalinidad total, se tomaron otros 100 mL de cada solución de muestra.
- 11) A cada volumen se le agregó gota a gota la solución de cloruro de bario para precipitar el carbonato de sodio formado durante el burbujeo del biogás en forma de carbonato de bario (la operación se detuvo al no observar más precipitación de sólidos, gastándose 2.5 mL de solución).

- 12) Se dejó asentar todos los sólidos y posteriormente se decantó y filtró cada muestra para separar los sólidos de la matriz líquida, utilizando un quitasato y sistema de filtración al vacío.
- 13) Los sólidos filtrados se lavaron con 50 mL de agua.
- 14) Se dejó en reposo todos los filtrados, para asentar cualquier sólido que haya podido pasar el papel filtro.
- 15) Con cuidado de no remover la muestra, se tomaron tres alícuotas de 10.00 ± 0.05 mL de cada solución de muestra.
- 16) Cada alícuota se valoró con la solución de ácido clorhídrico 0.5 M, utilizando fenolftaleína como indicador, para determinar la concentración remanente de hidróxido de sodio en las muestras.
- 17) Se procedió a realizar el procedimiento de cálculo, utilizando los valores obtenidos de las valoraciones y las mediciones de flujo del biogás de burbujeo, para determinar por diferencia la concentración de metano en el mismo.

DETERMINACIÓN DE LA TASA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.

- 1) *In situ*, se procedió a dejar fluir el biogás por la manguera de salida principal hacia uno de los quemadores por 10 minutos, para estabilizar el flujo de salida del biogás.
- 2) Se desconectó la manguera del sistema de conducción del biogás y con un anemómetro se midió la velocidad de salida del biogás tres veces.
- 3) Se midió el diámetro interno de la tubería de salida.
- 4) Se procedió al procedimiento de cálculo para determinar la velocidad de flujo (producción) del biogás, en ambas granjas.

DETERMINACIÓN DEL pH DEL AFLUENTE Y EL EFLUENTE Y EL Cp DE LOS SÓLIDOS DEL EFLUENTE.

- 1) *In situ*, utilizando las mismas consideraciones y cuidados que en el muestreo para los análisis de laboratorio de DQO, DBO y SST, se tomó una muestra del afluente y el efluente, en un recipiente de vidrio (en cada granja).

- 2) Debidamente cerrado y enfriado (aproximadamente a 5°C) se trasladaron las muestras hacia el laboratorio de análisis.
- 3) Con un medidor de pH digital se midió en triplicado el pH de cada muestra.
- 4) Se determinó el valor promedio de dicho valor para todas las muestras.
- 5) Posteriormente se realizó el método para determinación del Cp de los sólidos del efluente, para lo cual se tomó 100 mL de agua destilada.
- 6) Dicha agua se calentó utilizando una estufa eléctrica durante 120 segundos, midiéndose la temperatura inicial y final del agua.
- 7) De la misma manera, se tomó 100 mL de la muestra de la Granja La Flor, utilizando el mismo frasco de calentamiento, la misma estufa con el mismo grado de calentamiento y el mismo tiempo de calentamiento.
- 8) Se midió la temperatura inicial y final de la muestra.
- 9) Tomando en cuenta los resultados de análisis de sólidos ya realizados para dicha granja, se determinó la cantidad neta de agua en la muestra.
- 10) Se determinó el calor absorbido por el agua destilada y por el agua en la muestra analizada y por diferencia se determinó el calor absorbido por los sólidos, para posteriormente calcular el valor de Cp de los sólidos.

Nota: Con los análisis anteriores fue posible determinar el balance de masa y energía del sistema así como análisis termodinámicos de combustión del gas para diferentes escenarios de purificación, como se muestra en la sección de Apéndice.

ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE LOS QUEMADORES.

- 1) En la Granja La Flor se procedió a realizar el análisis de eficiencia de los quemadores.
- 2) Se midió la velocidad lineal de salida del biogás al tener la válvula de salida completamente abierta y abierta en $\frac{1}{2}$ de su giro.
- 3) Se midió el diámetro de la manguera de salida.
- 4) Con el flujo de $\frac{1}{2}$ de apertura de la válvula se prendió el quemador, dejando 5 minutos para que se estabilizara la temperatura.

- 5) Con un termómetro digital se midió la temperatura de los gases de combustión en la parte inmediata de salida de los gases.
- 6) Utilizando un kit Bacharach de soluciones se midió la concentración de dióxido de carbono en la salida del quemador.
- 7) El procedimiento se realizó tres veces y posteriormente se repitió en triplicado, pero teniendo la válvula de salida completamente abierta.
- 8) Se procedió finalmente al análisis de datos, cuidando de hacer las respectivas correcciones por el dióxido de carbono presente en el biogás inicial.

ETAPA FINAL

- 1) Ya calculados todos los parámetros buscados en el análisis, se procedió a analizar los datos y redactar el informe final.

VII. RESULTADOS

Figura 10: Balance de masa del digestor anaerobio ubicado en la Granja La Flor

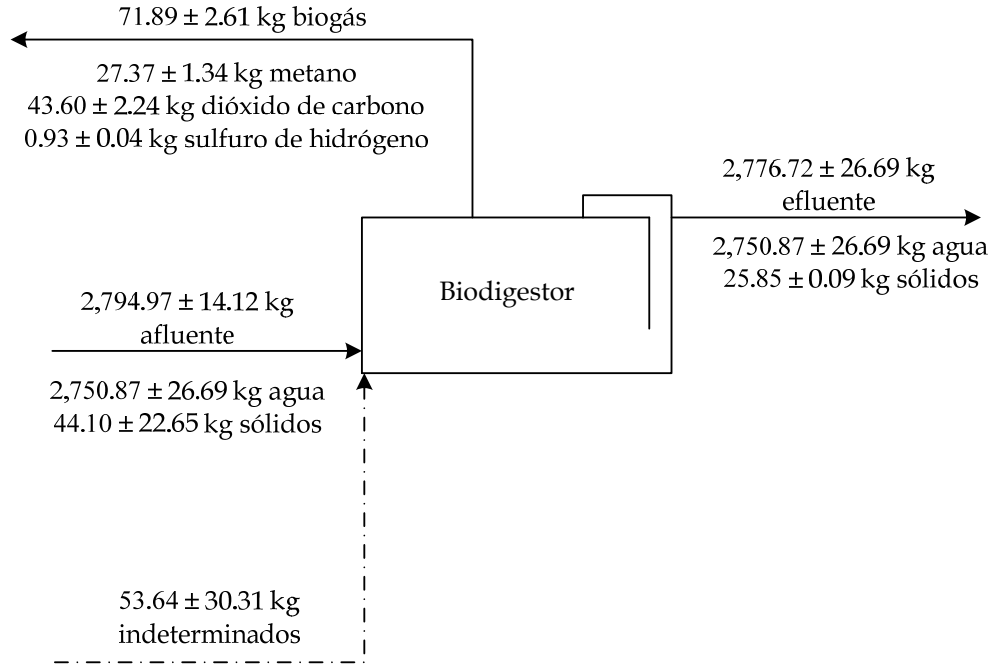
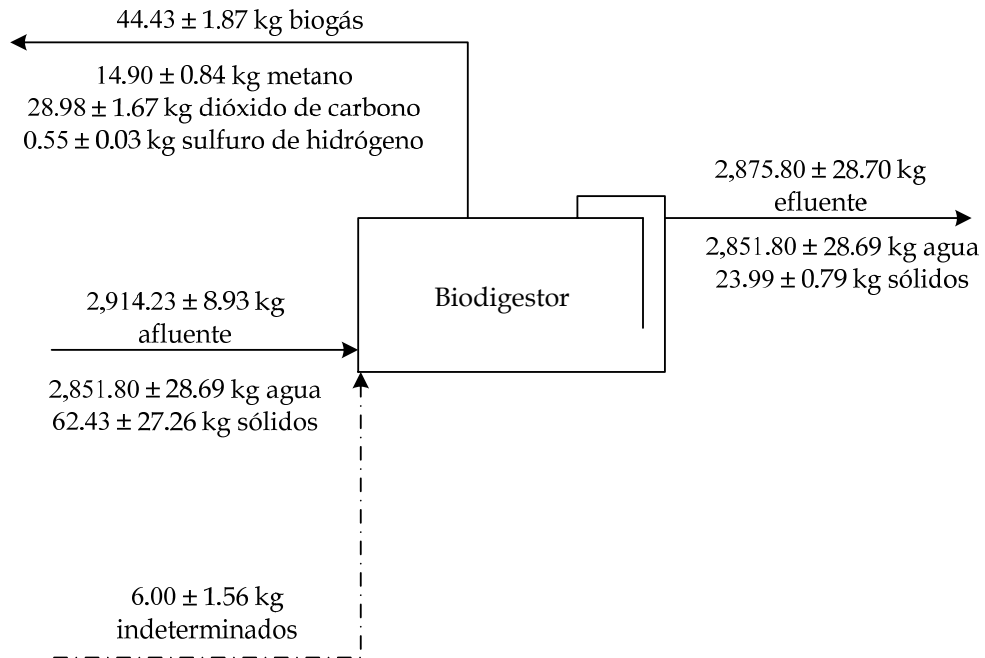


Figura 11: Balance de masa del digestor anaerobio ubicado en la Granja Agua Blanca.



Cuadro 4: Balance de energía para ambos digestores.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Balance general de energía (J)*	0	0
Energía liberada por el proceso de digestión anaeróbica en un período de 24 horas (kJ)	329.23 ± 49.27	244.83 ± 40.47
Calor de reacción calculado (kJ/kg sólidos en la carga)	7.47 ± 3.99 (a 20°C)	3.92 ± 1.83 (a 17°C)

Cuadro 5: Demanda química de oxígeno promedio antes y después del digestor para ambas granjas y efecto reductor.

Parámetro	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Demanda química de oxígeno antes del digestor (mg/L)	19,473.33 ± 11,370.95	22,666.67 ± 3,140.02
Demanda química de oxígeno después del digestor (mg/L)	9,560.00 ± 2,345.72	15,526.67 ± 12,294.30
Reducción en la demanda química de oxígeno (%)	50.91 ± 32.24%	31.50 ± 25.32%

Cuadro 6: Demanda bioquímica de oxígeno promedio antes y después del digestor para ambas granjas y efecto reductor.

Parámetro	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Demanda bioquímica de oxígeno antes del digestor (mg/L)	11,175.00 ± 4,341.59	15,550.00 ± 2,392.17
Demanda bioquímica de oxígeno después del digestor (mg/L)	5,505.00 ± 2,712.67	9,250.00 ± 7,364.27
Reducción en la demanda bioquímica de oxígeno (%)	50.74 ± 31.84%	40.51 ± 32.85%

Cuadro 7: Relación DQO/DBO promedio antes y después del digestor para ambas granjas.

Parámetro	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
DQO/DBO antes de digestor	1.70 ± 0.47	1.48 ± 0.29
DQO/DBO después del digestor	1.87 ± 0.47	1.68 ± 0.07

Cuadro 8: Sólidos suspendidos totales promedio antes y después del digestor para ambas granjas y efecto reductor.

Parámetro	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Sólidos suspendidos totales antes del digestor (mg/L)	15,749.33 ± 8,088.12	21,383.33 ± 9,337.66
Sólidos suspendidos totales después del digestor (mg/L)	9,284.00 ± 527.00	8,320.00 ± 1,504.72
Reducción en los sólidos suspendidos totales (%)	41.05 ± 21.21%	61.09 ± 28.87%

Cuadro 9: pH promedio antes y después del digestor para ambas granjas.

Parámetro	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
pH antes del digestor	6.50 ± 0.05	6.38 ± 0.19
pH después del digestor	7.32 ± 0.03	7.23 ± 0.04

Cuadro 10: Producción de biogás y calidad del mismo para ambas granjas, en un periodo de 24 horas, tomando un máximo contenido de sulfuro de azufre igual al 1%.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Volumen de biogás producido cada 24 horas (m ³)	76.34 ± 3.60	46.60 ± 2.54
Concentración máxima de sulfuro de hidrógeno en el biogás (%mol)	1%	1%
Concentración de metano en el biogás (%mol)	62.63 ± 0.73%	57.94 ± 0.73%
Concentración de dióxido de carbono en el biogás (%mol)	36.37 ± 0.73%	41.06 ± 0.73%
Productividad del digestor (m ³ biogás/(m ³ digestor)·(24 horas)	0.5127 ± 0.0667	0.2926 ± 0.0380
Tiempo de retención (días)	27.53 ± 1.29	39.59 ± 0.88

Cuadro 11: Eficiencia de los quemadores utilizados para la calefacción de lechones, con dos flujos diferentes de biogás y un 5% de exceso de aire.

Flujo de biogás (m³/s)	Eficiencia del quemador (%)
0.0009366 ± 0.0000476	65.84 ± 14.82%
0.0005301 ± 0.0000306	60.75 ± 9.05%

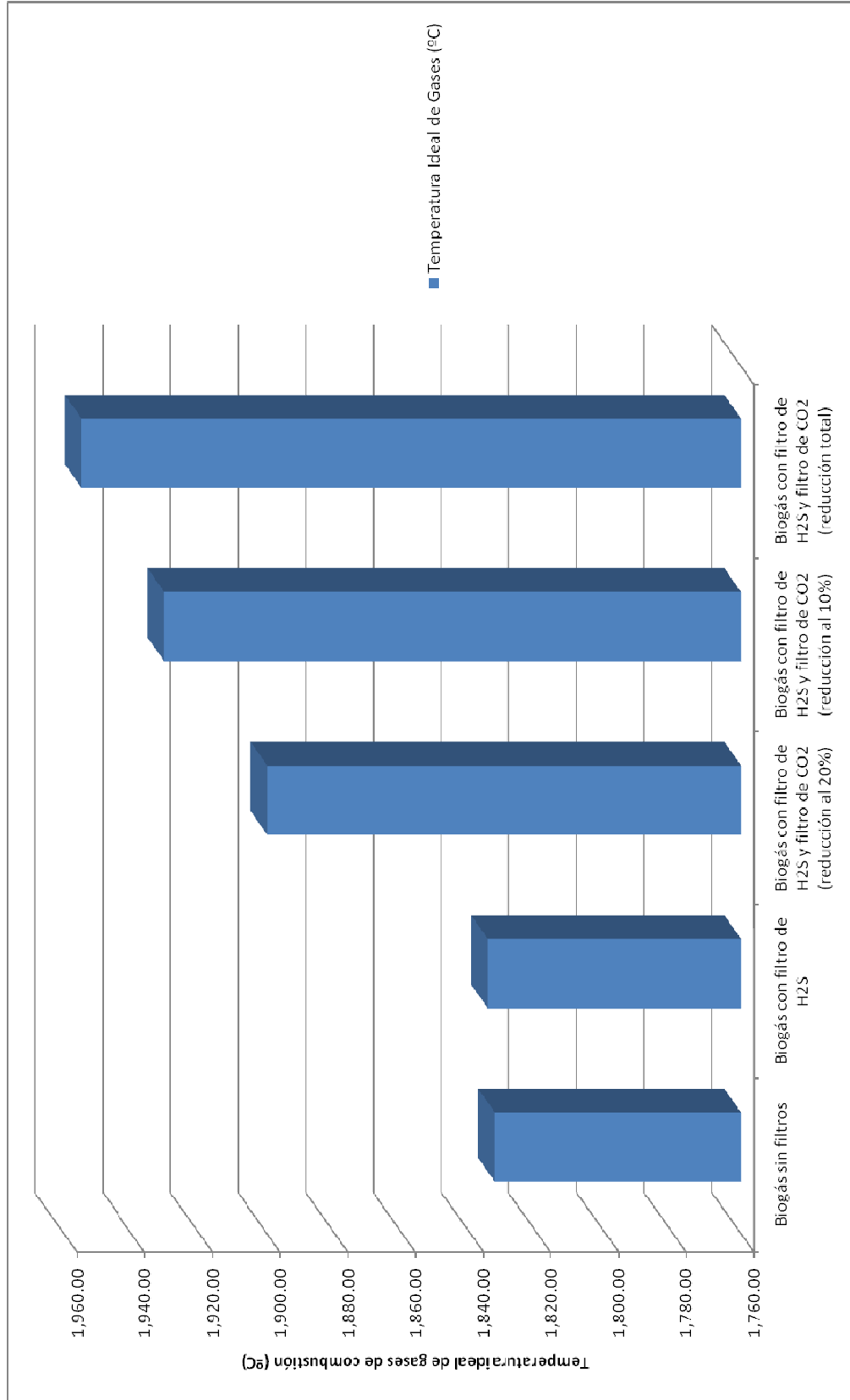


Figura 12: Temperatura ideal de los gases de combustión con diferentes escenarios de filtración para la Granja La Flor

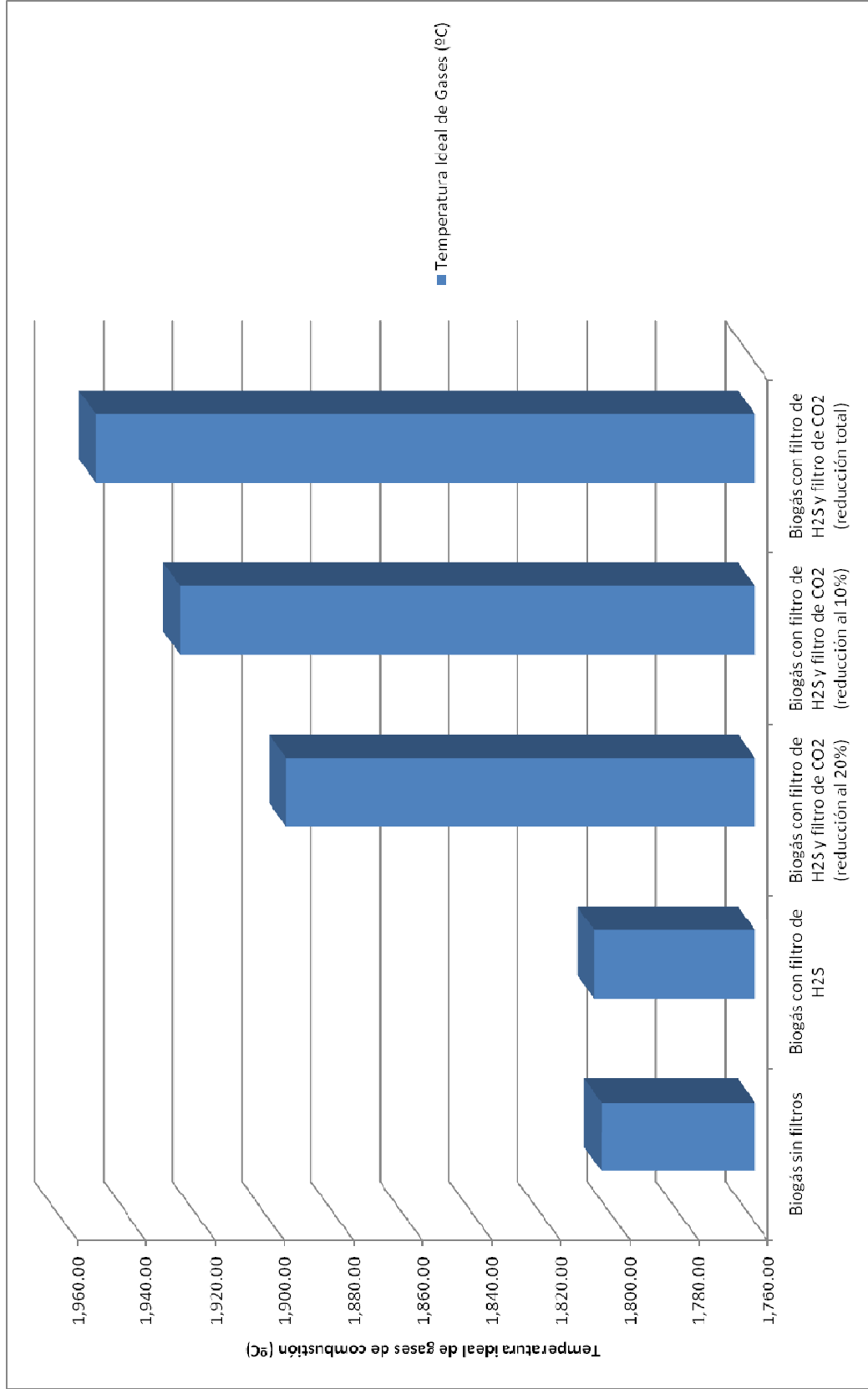


Figura 13: Temperatura ideal de los gases de combustión con diferentes escenarios de filtración para la Granja Agua Blanca

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta investigación fue posible determinar de manera general el funcionamiento de dos digestores anaerobios cargados con una mezcla de agua y excretas de cerdo, principalmente, observándose los resultados de análisis mostrados en la sección de Resultados. Al analizar el balance de masa de los digestores es posible observar que existe una cuota denominada “indeterminados”. Lo anterior fue necesario establecerlo de esa manera ya que no fue posible, debido a motivos de tiempo y recursos, poder medir la cantidad total de componentes en la entrada y la salida de los digestores. Con base en las leyes de conservación de la materia, pues, fue necesario establecer el balance para dicho rubro. Dichos materiales indeterminados pueden tomarse como carga volátil, la cual, debido al procedimiento de obtención de resultados para sólidos totales (en los cuales se basó el balance de masa), pudo haberse perdido en el transcurso del transporte de las muestras desde cada granja hasta el laboratorio externo de análisis. Además, debido a la variación relativamente alta (entre 5% a 52% de error relativo estándar) entre los resultados de análisis de laboratorio, también es posible la no correspondencia exacta de las entradas y las salidas del digestor.

Por otro lado, dado que las muestras de la fase “líquida” y las muestras de la fase gaseosa se tomaron en tiempos diferentes, aunque con procedimientos de carga similares, es posible que debido a ello no haya una correspondencia exacta. Pero de manera general sí fue posible establecer el comportamiento promedio de ambos digestores, ya que para procedimientos similares y diversas muestras tomadas en tiempos diferentes, fue posible obtener un dato promedio de comportamiento de cada digestor. Por último, con relación al balance de masa también es necesario hacer notar que debido a ciertas carencias de ambos digestores en cuanto a homogenización del material interno también se cae en que el efluente de cada digestor pueda variar no sólo en composición sino en línea de origen con la alimentación al digestor, ya que en el caso del efluente sí fue posible tomar la muestra en la salida directa del digestor, pero en caso de la alimentación solamente pudo hacerse en el tanque de captación, lo cual incide en cierto grado de error en las determinaciones.

Dentro de ese contexto es posible analizar los resultados obtenidos, en varios términos. En primer lugar, el balance de masa, aunque da relación de las conversiones durante el proceso, no da un dato tan exacto de relación para la producción de biogás, ya que en la mayoría de casos dicha producción se da en términos volumétricos y no máscicos. Por otra parte, sí da un acercamiento al grado de reducción de ciertos parámetros para la fase líquida.

Por otra parte, el balance de energía sí despliega datos más útiles en términos de análisis directo, ya que los datos del balance de masa es preferible analizarlos en términos individuales que posteriormente se expondrán. Como se observa en el Cuadro 4 (ver página 32), fue posible de manera general determinar no

sólo la energía liberada-absorbida en un período de 24 horas, que es el tiempo de carga y descarga de cada digestor, sino también un valor aproximado del calor de reacción, para la temperatura de entrada de cada digestor. En este punto es necesario hacer notar que se tuvo que asumir que el análisis hecho para los flujos másicos de carga y descarga son representativos para la totalidad del digestor, ya que en las determinaciones de dichos valores únicamente se tomaron en cuenta flujos másicos de entrada y salida y no se tomó la cantidad de sólidos y líquidos ya presentes y remanentes en el digestor. Por otra parte, debido a que no hay caracterizaciones adecuadas en términos termodinámicos de la carga para ambos digestores, no fue posible determinar el calor de reacción a una temperatura fija y fue necesario hacerlo a la temperatura de entrada de cada digestor. De manera general se determinaron valores de caracterización termodinámica (como la capacidad calorífica de los sólidos) únicamente para la salida del digestor, por la mayor facilidad de análisis, pero no fue posible generalizar dicho valor para los sólidos de la carga, debido a que su naturaleza es muy diferente debido al proceso de digestión anaerobia.

Así pues, se determinaron los valores del calor de reacción para ambos digestores, siendo de $7,465.80 \pm 3,993.73$ J/(kg sólidos de carga) para la Granja La Flor y $3,921.75 \pm 1,831.18$ J/(kg sólidos de carga) para la Granja Agua Blanca. En el caso de la primera dicho valor está remitido a una temperatura promedio de entrada al digestor de 20°C y en el caso de la segunda a una temperatura promedio de entrada al digestor de 17°C. Como se mencionó anteriormente, debido a utilizar datos promedio de análisis puede explicarse la variación en los calores de reacción de ambas granjas, aún cuando dicho valor debiera ser constante para ambos casos. Comparado con la generación de calor de otro tipo de reacciones exotérmicas, las cuales alcanzan valores mayores de 1,000 kJ/kg, se tiene que el valor del calor de reacción para ambas granjas es relativamente bajo. Lo anterior puede explicarse por dos situaciones: En primer lugar las reacciones de tipo bioquímico tienden a ser menos exotérmicas que las de tipo netamente químico, ya que en dicho proceso intervienen organismo vivos los cuales muchas veces son muy sensibles a flujos elevados de calor y temperaturas altas. Por otro lado, ya que se trata de una reacción de tipo anaeróbico, se tiene que la producción de energía es mucho menor que para un metabolismo aerobio, por lo cual la liberación de energía es baja. Pero al analizar las cargas y la cantidad de energía liberada cada 24 horas es posible observar que el monto en general es alto, por lo cual se esperaría un mayor aumento de temperatura en el medio de reacción. Como puede observarse en la sección del Apéndice para el cálculo del balance de energía, el aumento de temperatura no fue mayor a 3.5°C. Este fenómeno puede explicarse debido a la naturaleza de las especies presentes en el medio, especialmente el agua, ya que su capacidad calorífica es de las más altas, lo que significa que es necesario administrar una cantidad fuerte de calor para lograr el aumento de una unidad térmica. Así pues, debido a la gran cantidad de agua en el medio, el aumento de temperatura es bajo.

Entrando al análisis de los parámetros de la fase líquida, como complemento al balance de masa del proceso, se pueden observar los resultados para la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

En cuanto al análisis de demanda química de oxígeno se observa que para ambos digestores el comportamiento fue coherente en cuanto a su reducción, pero el valor observado fue relativamente bajo ($50.91 \pm 32.24\%$ de reducción en la Granja La Flor y $31.50 \pm 25.32\%$ de reducción en la Granja Agua Blanca). Para reducciones de demanda química promedio en sistemas de digestión anaerobia del 80%, los resultados promedio son bastante bajos. Además, los valores iniciales de DQO para ambas granjas son sumamente altos en comparación con los materiales utilizados en otros sistemas de digestión, pero lo anterior no tiene mayor impacto debido a la naturaleza de la carga y el destino final de los efluentes, los cuales son utilizados para fertirriego, en el mejor de los casos.

Similar al caso anterior, los resultados de demanda bioquímica de oxígeno fueron por la misma línea en cuanto a reducción ($50.74 \pm 31.84\%$ de reducción para la Granja La Flor y $40.51 \pm 32.85\%$ para la Granja Agua Blanca). Con esos datos es posible observar ya una tendencia inicial en el funcionamiento de los digestores de cada granja en cuanto a unidad de tratamiento de aguas residuales se refiere, observándose mejores resultados para el digestor de la Granja La Flor. En este punto cabe mencionar que, aunque los digestores son ligeramente diferentes en dimensiones, la operatoria y la carga es similar, por lo cual los aspectos que varían la operatoria de los mismos son la temperatura y la presión a la cual se encuentra cada granja.

En este punto cabe hacer referencia a un parámetro de suma importancia para la caracterización de las aguas residuales, y es la relación DQO/DBO. Para la carga en el digestor de la Granja La Flor fue de 1.70 ± 0.47 y en la salida fue de 1.87 ± 0.47 , mientras que para la Granja Agua Blanca, antes del digestor fue de 1.48 ± 0.29 y después del digestor fue de 1.68 ± 0.07 . Este parámetro cobra importancia pues da una referencia de la cantidad de materia orgánica en la carga. Dichos resultados dieron datos relativamente diferentes a los esperados debido a su magnitud, ya que para cargas “orgánicas” como lo pueden ser excretas de animales, se esperaría un valor menor (que no fuera superior a 1.30), ya que da referencia a poco contenido orgánico en la carga. Lo anterior puede explicarse por varias razones. En primer lugar se tiene que en dichas aguas residuales no sólo va agua y excretas sino también orina de los cerdos, la cual aporta componentes inorgánicos (urea, sales, etc.) a la carga. Además, ya que todas las aguas de lavado convergen en el mismo punto, se puede tener residuos de materiales utilizados para limpieza (jabones, fosfatos, etc.) lo cual representa otro rubro de carga inorgánica. Además, se puede observar que el comportamiento posterior al paso por el digestor en ambas granjas es de que dicha relación aumente, lo cual da referencia del carácter eminentemente bioquímico del digestor como reactor, ya que la mayor

incidencia del proceso de digestión anaerobia va dada por la vía biológica, lo cual queda manifestado con relaciones DQO/DBO mayores.

El análisis de sólidos suspendidos totales, aunque no da referencia de la naturaleza del proceso de reacción, es muy útil en términos de sistemas en los cuales no están caracterizados totalmente sus flujos. Este es un caso de ellos, ya que para las cargas y descargas de los digestores no se sabe con exactitud los componentes químicos que lo forman, por lo cual es necesario tomar un parámetro para poder determinar el efecto material de la reacción. Como cabía esperarse, el efecto fue una reducción en la concentración de sólidos después de su paso por el digestor. De igual manera que con los análisis de DQO y DBO, la reducción fue menor a la esperada ($41.05 \pm 21.21\%$ para la Granja La Flor y $61.09 \pm 28.87\%$ para la Granja Agua Blanca). En este punto se tuvo un resultado diferente que para los primeros dos análisis, y el mismo recae en el hecho de que la reducción de sólidos fue mayor en la segunda granja (Agua Blanca) que en la primera. Sólo cabe mencionar uno de los resultados obtenidos para el digestor de la granja Agua Blanca, mostrado en el Apéndice B (ver página 65), para el último análisis realizado, donde se tuvo una concentración de sólidos suspendidos totales en la entrada al digestor de 28,468.00 mg/L y en la salida de 170,322.00 mg/L. Dicho dato no muestra coherencia con el proceso, pero posterior a una investigación de la operatoria de dicho día fue posible establecer que se realizó un procedimiento de recirculación del material interno de digestor hacia el tanque de captación y carga de nuevo material. Esta operatoria no es continua ni común, salvo casos en los que se desea aumentar la presión del biogás producido, pero en términos de sólidos puede explicarse los resultados del laboratorio, ya que al no haber ningún sistema de agitación continua interna en ambos digestores, los sólidos tienden a asentarse y sedimentarse e inclusive a acumularse en la parte inferior de los digestores después de varios días de operatoria. Dicho sedimento, al ser removido por alguna fuerza mecánica, homogeniza el efluente pero con una carga mucho mayor de sólidos que la carga normal de salida, por lo cual el resultado fue que las muestras en la salida tomadas para ese día fueron no representativas.

Teniendo ya los resultados de los tres análisis de la fase líquida, es posible explicarlos en términos de la operación y diseño de ambos digestores. En primer lugar, en cuanto a la degradación de sólidos, el aspecto más relevante está dado por el movimiento interno de material en el digestor. Como se mencionaba en el párrafo anterior, al no haber medio de agitación, los sólidos sedimentan en la sección inferior del digestor, acumulándose, especialmente, en el extremo final del mismo (debido al ángulo de inclinación de los digestores de aproximadamente 2°). Esto no permite una degradación adecuada de dichos sólidos orgánicos, ya que para que el proceso sea más eficiente es necesario tenerlos dispersos en la matriz líquida, para que las bacterias, tanto fermentativas como metanogénicas, puedan degradarlo. Al haber asentamiento de material, es más lento el proceso, debido a la poca movilidad que dichas bacterias puedan tener en el medio. Así pues, la falta de medios de agitación, ya fuese mecánica o de otro tipo tienen consecuencias

directas en el proceso de degradación de sólidos, si se analiza el digestor como una unidad de tratamiento de aguas de desecho.

Concluido ese primer acercamiento al digestor por medio de su fase “líquida”, se procedió a realizar el análisis del biogás como tal. Para ello, se intentó aplicar diferentes metodologías de análisis, buscando inicialmente la practicidad en la medición. Por ello, como primer punto se optó por la determinación de dióxido de carbono en lugar de metano, ya que las determinaciones directas de metano son complicadas y es necesario contar con un patrón sumamente puro de metano para poder hacer dicho análisis, el cual generalmente se hace por cromatografía de gases. Ya determinado que se haría la determinación de dióxido de carbono y la determinación de metano de manera indirecta, se optó, como primer procedimiento, por utilizar un analizador Bacharach de soluciones para la determinación de la concentración de dióxido de carbono en el biogás, pero la concentración del mismo fue mayor que el límite superior de cuantificación del sistema, por lo cual fue necesario tomar la ruta de determinación química.

Ya justificada la elección del método de análisis es necesario hacer notar las limitaciones en el procedimiento relacionado con los resultados. Como se observa en la descripción del procedimiento en la sección de Metodología, es posible inferir que el procedimiento no fue del todo directo por ciertas dificultades experimentales. En primer lugar, fue necesario determinar si la utilización de un anemómetro para la medición del gas saliente del digestor era o no adecuada, para lo cual se hicieron varias pruebas de estabilidad en las mediciones, las cuales consistieron en aceptar la medición si después de 30 segundos mantenían un valor constante, lo cual se logró en los diversos casos de medición. Así pues, se pudo determinar el flujo de gas saliente del digestor para cada prueba, sin ningún problema de emisiones intermitentes. Posteriormente se tuvo que por no poseer un sistema adecuado de dispersión del gas en el líquido de muestra (soluciones patrón de hidróxido de sodio), no se optó por utilizar algún recipiente totalmente abierto, sino frascos de 1 litro con boquillas estrechas, del tamaño adecuado para permitir únicamente la entrada de la manguera del gas y al momento de hacer las mediciones en el tiempo adecuado, sacar inmediatamente la manguera y tapar el frasco para evitar el escape del gas, agitando cada frasco durante 2 minutos posterior a cerrarlos, para lograr el contacto adecuado entre el gas y la solución de hidróxido de sodio.

Los anteriores aspectos se detallaron para hacer notar que el método fue indirecto pero que se tomaron todas las medidas adecuadas para lograr un muestreo correcto. Ya tomadas las muestras se tuvo un segundo inconveniente, por lo cual fue necesario recurrir al Método de Winkler para la determinación adecuada de la concentración de dióxido de carbono en las muestras, ya que al reaccionar el CO_2 del biogás con el hidróxido de sodio se formó carbonato de sodio. Al respecto cabe mencionar que el hidróxido de sodio remanente así como el carbonato de sodio formado son ambos solubles en agua y poseen características básicas (alcalinas), por lo cual una determinación directa con ácido no daría resultados

totalmente válidos. Por ello, fue necesario hacer una operación de verificación del contenido básico, por medio de un análisis de alcalinidad total, así como uno más específico para la determinación del hidróxido de sodio remanente y así poder determinar estequiométricamente la cantidad de NaOH reaccionado en relación con el dióxido de carbono reaccionado igualmente. En el caso de la determinación del hidróxido de sodio remanente, se hizo reaccionar cada muestra con cloruro de bario para provocar la precipitación del carbonato de sodio en forma de carbonato de bario, para poder filtrarlo posteriormente.

Como se observa en el Apéndice D, Cuadro 38 (ver página 95), la alcalinidad total de las muestras no varió con la relación a la concentración promedio de las soluciones patrón de hidróxido de sodio iniciales (ver Apéndice D, Cuadro 31, página 91), lo cual da referencia de que la reacción entre el hidróxido de sodio y el dióxido de carbono se llevó tal cual si ninguna reacción secundaria o alterna que pudiera haber consumido hidróxido de sodio para otro fin. En cuanto a la determinación del hidróxido de sodio remanente se puede considerar como la verdadera prueba para la determinación de la concentración del dióxido de carbono en el biogás (como se detalla a lo largo del Apéndice D). De esa manera se pudo determinar un valor promedio de concentración de dióxido de carbono en el biogás, siendo de $36.37 \pm 0.73\%$ para la granja La Flor y de $41.06 \pm 0.73\%$ para la Granja Agua Blanca (es necesario tomar en cuenta que dicho valor ya posee una corrección tomando un máximo de sulfuro de hidrógeno del 1%, según registro promedio en diversos procesos de digestión anaerobia), y de esa manera, como promedio, se determinó la concentración de metano en el biogás, siendo de $62.63 \pm 0.73\%$ para la Granja La Flor y de $57.94 \pm 0.73\%$ para la Granja Agua Blanca.

Cabe hacer un análisis en este punto de los resultados de la calidad del biogás, ya que es posible interpretarlos en términos de las condiciones ambientales y de operación. Así como se mencionó anteriormente el inconveniente de no poseer sistemas de agitación causa rendimientos menores en el proceso de degradación de sólidos y remediación bioquímica; en este punto es todavía más crítica la temperatura dentro del digestor. Para la operación en la Granja La Flor, se tiene que los materiales ingresan a 20°C aproximadamente, y la temperatura interna del reactor es de 23°C , mientras que en la Granja Agua Blanca las cargas de hacen a 17°C y la temperatura interna del digestor es de 20.5°C . Según Gunnerson y Stuckey (1986), la temperatura óptima de funcionamiento de un digestor anaerobio es entre 35°C a 55°C , por lo cual la temperatura de operación de ambos digestores está por debajo de los valores óptimos de operación, lo cual puede explicar los resultados obtenidos. Según los estudios de Sosa (2000), para digestores que utilizan excretas porcinas la calidad del gas producido va desde 65% a 75%, con lo cual puede concluirse que la calidad del biogás producido en ambas granjas está por debajo del límite inferior de producción de metano. Retomando el tema de la temperatura, este factor es crítico para el desempeño del digestor y la actividad de las bacterias metanogénicas especialmente. Si se operara el sistema con temperaturas mayores podrían tenerse rendimientos mucho mayores en términos de volumen de metano por volumen de biogás, con lo cual aumentaría el potencial energético del biogás. En muchos casos se

recomiendan las temperaturas cercanas a 35°C, ya que aumentar la temperatura del contenido interno del digestor hasta 55°C es relativamente costoso. Así, la utilización de sistemas de intercambio de calor externos pueden representar una alternativa adecuada para lograr una mejor producción de biogás en cuanto a calidad se refiere (mayor contenido de metano).

En cuanto a la producción de biogás en términos volumétricos, aunque existe cierta relación con la calidad del mismo, el mayor impacto viene dado por la homogeneidad del sistema, lo cual recae de nuevo en el tema de la agitación. Para la Granja La Flor se determinó una producción de $76.34 \pm 3.60 \text{ m}^3$ por día, mientras que en la Granja Agua Blanca fue de $46.60 \pm 2.54 \text{ m}^3$. Aunque este valor es importante en términos absolutos, la determinación de un valor de rendimiento o productividad es más adecuado, obteniéndose un valor de $0.5127 \pm 0.0667 \text{ m}^3\text{día}^{-1}\text{m}^{-3}$ de digestor para la Granja La Flor y de $0.2926 \pm 0.0380 \text{ m}^3\text{día}^{-1}\text{m}^{-3}$ de digestor para la Granja Agua Blanca. Tomando en cuenta investigaciones anteriores como las de Lapp y Robertson (1989) se pudo determinar que el rendimiento de los digestores es sumamente bajo, ya que para materiales a digerir como los utilizados dichos valores son cercanos y superiores a 1. De esta manera se confirma que la falta de mecanismos de agitación tiene una incidencia importante en el grado en el cual se desarrolla la digestión anaerobia.

Otro factor muy importante en el desempeño y funcionamiento de un digestor anaerobio es el pH del sistema. Como se observa en la Figura 8 (ver página 19), el pH varía durante el proceso de digestión anaerobia. Aunque el caso mostrado es para un reactor batch, da una buena idea de lo que ocurre a lo largo del proceso de digestión anaerobia y en términos generales es que el efluente sale con un pH ligeramente mayor al de entrada. Es importante el control del mismo, ya que las bacterias metanogénicas son muy sensibles a pH menores de 6, por lo cual es necesario controlar que la alimentación a los digestores sea a pH entre 6 y 7 para tener mejores resultados, lo cual se cumple sin ningún problema como se muestra en el Cuadro 9 (ver página 33). Y de manera coherente con el funcionamiento de un digestor, la descarga se da a un valor mayor a la entrada, aunque no llega a valores mayores de 8 ya que debido a que el sistema se opera de manera semicontinua, al momento de realizar cada carga dicho valor se regula y estabiliza a pH ligeramente menores.

Con los resultados anteriores es posible hacer ahora un análisis comparativo de ambos digestores. Aunque en algún parámetro haya sido diferente, de manera general se observaron mejores resultados para el digestor de la Granja La Flor que para el de la Granja Agua Blanca. Como se mencionó, las únicas diferencias significativas en cuanto a la operación de los digestores son la presión y la temperatura. Ya que en términos generales la presión no tiene mayor incidencia en la operatoria de los sistemas, la temperatura se convierte en el parámetro de operación crítico para ambos digestores y se pone de manifiesto que tiene una incidencia bastante fuerte en los resultados de cada uno, ya que para cambios relativamente pequeños (diferencia de 3°C entre la carga de un digestor y el otro) la producción de biogás, así como la reducción de

ciertos parámetros de tipo bioquímico (DBO y DQO) fue mayor en la Granja La Flor que en la Granja Agua Blanca. Se hace mucho hincapié en este aspecto ya que resalta la necesidad de tomar medidas para el control de la temperatura, no sólo porque las condiciones ambientales no son favorables sino porque tiene un impacto sumamente fuerte en los digestores. Aunque las temperaturas ambiente sean un poco mayores a las de la carga (26 – 30°C promedio en La Flor y de 18 – 23°C promedio en Agua Blanca), debido a que tanto el tanque de captación como el tanque de descarga están descubiertos al ambiente, por procesos de transferencia de masa, tanto la carga como la descarga tienden a enfriarse (por evaporación de agua), lo cual representa pérdidas de calor significativas en el reactor, lo cual conlleva temperaturas de operación más bajas, lo cual es perjudicial para el manejo del sistema, a pesar de tener una cubierta parafínica en el interior del digestor y estar parcialmente enterrado, lo cual reduce las pérdidas caloríficas. Lo anterior se vuelve todavía más importante debido al hecho que no sólo los resultados de producción, calidad y tratamiento fueron mejores en la Granja La Flor, sino que el tiempo de retención del material dentro del digestor fue menor también para dicha granja, lo cual denota deficiencias en la operatoria del digestor de la Granja Agua Blanca.

Es necesario tomar en cuenta que para que el sistema pueda funcionar adecuadamente deben controlarse muchas variables en el mismo. Se tuvo la constante que para ambos casos hay poco control y manejo sobre los digestores, el cual se reduce a cargar el mismo cada día, ya que la descarga se da por rebalse. En este aspecto es necesario analizar las condiciones de cada digestor. Como se observa en el Apéndice J, las condiciones de ambos no son precisamente las de sistemas tecnificados de digestión y se limitan a ser una caja séptica con tomas de salida del biogás. En el caso del digestor de la Granja La Flor, se observaron varias deficiencias en cuanto a la construcción del mismo. En primer lugar, el sistema de conducción tanto del material de carga hacia el tanque de captación como del biogás es adecuado en términos del material (PVC), ya que representa un costo bajo y un manejo efectivo de los materiales, pero su instalación dista mucho de ser no sólo adecuada sino segura, ya que no posee sistemas adecuados de soportería (como puede observarse en la Figura 19, página 169). No posee un sistema adecuado de válvulas, lo cual hace que las cargas sean descontroladas y bastante difíciles de realizar, ya que tanto desde la admisión desde los corrales hacia el tanque de captación así como desde el tanque de captación hacia el digestor, no se cuenta con sistemas adecuados de paso de las aguas residuales.

Además, la carencia de instrumentos de medición tanto de presión como de temperatura hacen que el sistema sea no sólo poco controlable sino también poco registrable (en términos de llevar documentada la operatoria del mismo). En el caso del tanque del efluente, muestra varias deficiencias no sólo en términos técnicos sino en términos ambientales. Como primer punto, fue posible determinar que todavía existe producción de gases, los cuales se manifiesta a través de un burbujeo constante en dicha área. Tomando en cuenta que uno de los principales gases productos del proceso de digestión es el metano, lo anterior representa un problema ambiental serio, ya que el metano no sólo es contaminante sino también su poder

como gas de invernadero es varias veces mayor que el del mismo dióxido de carbono. Además fue posible detectar la salida de amoníaco en dicha área, procedente especialmente de las primeras etapas fermentativas, lo cual fue posible determinar por el característico olor. Frente a ello se tiene el problema de que, al estar totalmente abierto dicho tanque, el escape de dichos gases es inminente, lo cual es un inconveniente.

Por otra parte, no cuenta con un sistema adecuado de rebalse y conducción del efluente, el cual simplemente se desborda por la parte superior y cae en el terreno aledaño, lo cual no sólo sobrecarga el suelo de dicha área de materia digerida sino también representa pérdidas de un material que pueda ser utilizado adecuadamente para fertirriego. En este aspecto, no es necesario contar con algún sistema tan sofisticado, pero sí adecuado de conducción, ya que la simple descarga de dicho material en el terreno sin poseer vegetación que pueda aprovechar los nutrientes remanentes en dicho efluente es un inconveniente en términos de lixiviación de dicho material a mantos freáticos inferiores, especialmente si ellos representa acumulación y sobresaturación en un solo punto o sector. Aunque el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 que regula la descarga y reuso de aguas residuales y disposición de lodos no determina ningún inconveniente en cuanto a parámetros como el DQO y el DBO para aguas residuales utilizadas en fertirriego (según su artículo 35), lo anterior no significa que la disposición de dichos efluentes sea libre y descuidada en cualquier terreno.

Enfocando la atención en las vías de conducción del biogás, es adecuado contar con tres puntos de descarga para que la misma sea más uniforme y no haya extracción abrupta del biogás, lo cual pueda en un momento dado causar un vacío indeseable en la parte inferior, pero sí cabe mencionar que de igual manera, el sistema de conducción de dicho biogás hacia los corrales en los cuales se utiliza es poco adecuado y poco seguro, ya que está expuesto a cualquier tipo de fractura. Ya que el sistema no cuenta con una válvula principal de descarga del digestor, lo anterior puede representar un riesgo de fuga masiva de biogás al ambiente en caso de fractura o perforación de la tubería.

Al analizar las condiciones del digestor de la Granja Agua Blanca, se puede mencionar que en términos generales tiene mejores condiciones técnicas que el de la Granja La Flor, ya que sí cuenta con un sistema adecuado de válvulas para la operatoria del mismo. Así pues, desde el tanque de captación hacia el digestor se cuenta con una válvula principal de admisión, lo cual da buenos resultados de carga hacia el mismo. De igual manera que en el caso de la Granja La Flor, tanto el tanque de captación como el tanque de descarga del efluente están abiertos a la intemperie, lo cual representa pérdidas caloríficas y de materiales, como vuelve a serlo el caso de los gases de digestión salientes del tanque de efluente. En términos de instalación muestra mayores complicaciones de movilización que el digestor de la Granja La Flor, lo cual es un inconveniente en el manejo del sistema. A pesar de poseer una instalación no permanente de una bomba sumergible para retornar material hacia el tanque de captación, su utilización es

esporádica y no controlada sobre bases técnicas (generalmente se activa cuando es necesario aumentar la presión interna del digestor). Posee el inconveniente de mezclar un material parcialmente digerido con la carga original, con lo cual se pierde el control en términos de alimentación del material al digestor.

A diferencia del digestor de la Granja La Flor, este sí cuenta con un sistema de descarga adecuado en términos de rebalse del digestor (como se observa en las Figuras 32 a 34, en la página 175), aunque el sistema de conducción hacia los campos de riego dan la impresión de buscar mayor aireación del material para terminar de tratarlo, debido a sus sistema curvado, con lo cual se logra un mayor recorrido del material antes de llegar a los campos de riego e inclusive en varios puntos se tiene acumulación de sólidos.

Por su parte, en cuanto a la conducción del biogás, en primera instancia tienen una mejor disposición de salida que en la Granja La Flor ya que sí posee válvulas inmediatamente a la salida del digestor, con lo cual puede ser controlada de manera adecuada cualquier fuga posterior a dichas válvulas, pero siempre manifiesta el problema de tener una instalación deficiente de la tubería de conducción hacia los corrales donde se requiere, que para este caso son los corrales de dos granjas diferentes. El mayor problema se observa en la conducción de biogás hacia la granja de reproducción de Pastores, ya que la tubería va desde el digestor hacia la misma pasando por terrenos quebrados y barrancos, sin ninguna protección ni sistema adecuado de soporte.

En términos generales, con otros elementos del sistema ambas granjas mostraron iguales condiciones. En primer lugar, se utiliza una trampa de agua, consistente en una disposición de tubería en forma de U que permite que el agua quede en la parte inferior, teniendo una válvula de descarte de dicha agua (cabe mencionar que la cantidad de agua arrastrada por el biogás es sumamente baja). En cuanto al sistema de filtros de sulfuro de hidrógeno, también mostraron condiciones similares, y conexiones adecuadas.

Por otra parte, los sistemas de escape son, aunque accesibles, inadecuados. En primer lugar, no son sistemas automáticos de escape lo cual representa un problema en cuando a una sobrecarga de presión en los digestores, que aunque no es común para estos sistemas por no manejarse altas presiones, tampoco es lo más adecuado. Además, se encuentran a ras del suelo, por lo cual el escape de los gases se da a la altura del operario que maneja el sistema, lo cual puede ser peligroso en caso el operario inhale una cantidad significativa de metano. Para tener un parámetro de observación de la salida del biogás, se procede a colocar la salida del gas sumergida en agua (determinación de salida de biogás al observarse burbujeo), por lo cual dichas salidas no sólo se utilizan como escape sino también de producción del mismo, pero a pesar de ello no es una forma segura de manejo de dicho control.

En cuanto a control se refiere, carece, como ya se había mencionado, de medidores de temperatura y de presión. Las determinaciones de presión interna se hacen a través de una manguera con agua (a manera

de manómetro diferencial de tubo en U), lo cual no da una lectura continua ni práctica en términos de presión. Además, carece de medidores de flujo, ya sea de tipo contador o medidores instantáneos, con lo cual se tienen el impedimento de la determinación de producción y utilización de gas (por lo cual en la presente investigación hubo que utilizar sistemas indirectos de determinación de flujos de biogás). Y en términos generales, no se tienen controles de las condiciones de alimentación y descarga (especialmente en términos de volumen de carga, concentración de sólidos y pH), lo cual representa mucha variabilidad en la operación de ambos digestores. Además cabe mencionar que, aunque se cuenta con válvulas para la purga de lodos en la parte final del digestor su utilización es esporádica, por lo cual sí se tiende a tener acumulación de material sólido sedimentado en las partes finales del digestor.

Por último, en cuanto a las consideraciones técnicas del digestor se tiene que no se cuenta con filtros para dióxido de carbono, y aunque en alguna ocasión de tuvieron, actualmente no se utilizan. Los filtros más utilizados consisten en tanques cilíndricos con una lechada de cal en su interior y a través de la cual se hace burbujear el biogás, para hacer reaccionar el dióxido de carbono con la base (carbonato de calcio). Posteriormente se dará un panorama comparativo de la utilización de dichos filtros, pero de manera general se tiene que dicho biogás, al contener mayor cantidad de dióxido de carbono posee menor fuerza energética, así como una carga fuerte de liberación de gases de invernadero.

La parte final del análisis de los digestores se centra en qué tan bien es manejado y utilizado el biogás producido. Como se mencionó, para ambos digestores se cuenta con una trampa de agua y un filtro de sulfuro de hidrógeno únicamente. Como primer punto, se determinó la eficiencia de los quemadores de biogás, prueba realizada en la Granja La Flor con un quemado ubicado en la salida del digestor, por lo cual las pruebas corresponden al biogás tal y cual sale del digestor. Las pruebas se hicieron a dos diferentes flujos del gas, como se observa en el Cuadro 11 (página 34) y pudo determinarse que la eficiencia fue relativamente mayor para el flujo más alto de biogás ($65.84 \pm 14.82\%$ para la válvula de admisión totalmente abierta y de $60.75 \pm 9.05\%$ para la válvula de admisión abierta a $\frac{1}{2}$ de su giro completo). Para el análisis de combustión se utilizó un sistema Bacharach de soluciones, para determinar la concentración de dióxido de carbono en los gases de salida. Se asumió un 5% de exceso de aire, ya que el sistema no cuenta con algún ventilador para poder controlarlo. Se tomó un 5%, ya que para gases la cantidad de aire en exceso es menor que otros combustibles y radica entre un 5 y un 10%, además que se tuvo como medida de holgura al valor estequiométrico, considerándose para el efecto una combustión completa (por no contar con sistemas para determinación de monóxido de carbono).

Para completar el análisis se midió la temperatura de salida de los gases de combustión y con ello, utilizando la correlación de Siegert, se determinó la eficiencia de combustión. De acuerdo a lo anterior se determinó que los quemadores funcionan mejor con un mayor flujo de biogás, en términos de eficiencia,

aunque el rango se mantuvo aproximadamente entre 60 y 65%, que para un proceso de combustión es generalmente bajo (se esperan eficiencias mayores al 80%). Debido a que los quemadores no son tan controlados y se basan en radiación más que en convección para la transmisión de calor, se pudo explicar por dicha razón las pérdidas grandes de energía. Aunque en los corrales se toman medidas para lograr una calefacción adecuada, acercando los quemadores lo más posible a los lechones (ver Figura 40, página 178), de igual manera no es un sistema tan adecuado de calefacción.

Un segundo análisis realizado a la utilización del biogás como medio de calefacción por combustión directa consistió en determinar la manera en la cual afecta que el biogás utilizado tenga una mayor o menor calidad. De esa manera, se tomaron cinco escenarios comparativos: (1) Combustión del biogás tal y cual sale del digestor, (2) combustión del biogás haciéndolo pasar por un filtro de sulfuro de hidrógeno, (3) combustión del biogás haciéndolo pasar tanto por el filtro de sulfuro de hidrógeno como por un filtro de dióxido de carbono, con una reducción hasta una concentración del 20% de CO₂ en el biogás, (4) combustión del biogás haciéndolo pasar tanto por el filtro de sulfuro de hidrógeno como por un filtro de dióxido de carbono, con una reducción hasta una concentración del 10% de CO₂ en el biogás, y (5) combustión del biogás haciéndolo pasar tanto por el filtro de sulfuro de hidrógeno como por un filtro de dióxido de carbono, con una eliminación total de dióxido de carbono. Para que el análisis comparativo fuese adecuado, se tomó como base mantener el mismo flujo de metano en todos los casos y hacer las reducciones del caso conforme se pasara por los filtros, para observar el efecto directo de cada filtro en los resultados de combustión. Por no poseer todos los sistemas *in situ*, dicho acercamiento tuvo que realizarse de manera teórica, considerando como parámetro de comparación la temperatura ideal de los gases de combustión en el supuesto de que toda la energía liberada en la reacción de combustión se utilizase para calentar los gases hasta una temperatura final de salida. En este caso, se tomaron las condiciones de concentración de cada una de las especies presentes en el biogás para cada granja, por lo cual se hizo un análisis comparativo para cada uno de los digestores.

Como puede observarse en la Figura 12 (ver página 35), se tiene el análisis gráfico para la Granja La Flor, para los cinco escenarios anteriormente descritos. En primer lugar, puede observarse que la temperatura de los gases de salida no aumenta en mayor medida por el hecho de tener un filtro de sulfuro de hidrógeno, pero su efecto principal es de tipo ambiental, ya que el sulfuro de hidrógeno no sólo causa problemas al estar presente como tal en el aire, ya que causa un mal olor, sino también causa inconvenientes al momento de ser quemado, ya que uno de sus productos es el dióxido de azufre, relacionado con problemas de lluvia ácida. Por otro lado, los principales efectos positivos hacia los resultados de combustión se observan al remover el dióxido de carbono del biogás. Como puede verse, al remover el contenido total de dióxido de carbono del efluente se logró un aumento de más de 100°C en la temperatura ideal de los gases, a pesar de que el dióxido de carbono no contribuye en la reacción, ya que no es combustible. Pero su efecto adverso en el proceso radica en el hecho de que su capacidad calorífica es

alta y por lo mismo absorbe una gran cantidad de calor, lo cual no es beneficioso para el proceso. Algunos autores debaten el hecho de adicionar un sistema de eliminación de dióxido de carbono, pero puede observarse en el análisis gráfico de las Figuras 12 (página 35) y 13 (página 36) que sí tiene un efecto positivo el removerlo. Aunque la temperatura ideal de los gases de combustión sea únicamente un parámetro comparativo, da muestra de que la utilización de sistemas de purificación del gas permite tener mejores rendimientos energéticos.

Al observar la Figura 13 (página 36), también es posible ver el mismo comportamiento, independientemente de la diferente calidad del biogás producido en la Granja Agua Blanca, lo cual ratifica la necesidad de instalar sistemas de purificación del gas, para que no sólo se utilice una menor cantidad del mismo sino para también tener menores efectos adversos, ambientalmente hablando (como la liberación de dióxido de azufre al ambiente o la liberación de una carga mayor de dióxido de carbono).

En términos generales, se pudo observar que el funcionamiento de ambos digestores, independientemente de sus ubicaciones y condiciones ambientales, es aceptable en términos de una operación rudimentaria y poco tecnificada, pero en miras al aprovechamiento óptimo del recurso utilizado (excretas de cerdo) es posible realizar mejoras en el sistema, tanto de diseño como en sistemas de control (ver la sección de Recomendaciones). Así mismo, en términos ambientales, se logra un proceso de tratamiento de aguas residuales, pero las carencias de sistemas de calentamiento y agitación no permiten tener resultados de acuerdo a las operaciones normales de un sistema de digestión anaerobia. De manera general, es necesario poner atención a la manipulación tanto del afluente (ingreso de agua residual al digestor) como del efluente, para evitar desperdicios (lo cual incide en una producción más limpia) y efectos adversos al terreno y los mantos freáticos inferiores. Aunque no pudo determinarse el efecto de modificar ciertos valores en la alimentación a los digestores, sí fue posible observar que las cargas, aunque variables en el contenido de sólidos, se mantuvieron en un rango aceptable (sólidos totales equivalentes entre 5 – 7%, cuando lo recomendable son valores cercanos al 10%).

IX. CONCLUSIONES

- 1) La energía liberada por la reacción y absorbida por los reactivos en un período de 24 horas en el digestor de la Granja La Flor es de $329,227.98 \pm 49,268.68$ J, determinándose un calor de reacción a 20°C de $7,465.80 \pm 3,993.73$ J/(kg de sólidos en la carga).
- 2) La energía liberada por la reacción y absorbida por los reactivos en un período de 24 horas en el digestor de la Granja Agua Blanca es de $244,827.20 \pm 40,470.89$ J, determinándose un calor de reacción a 20°C de $3,921.75 \pm 1,831.18$ J/(kg de sólidos en la carga).
- 3) La demanda química de oxígeno antes del digestor en la Granja La Flor fue de $19,473.33 \pm 11,370.95$ mg/L y después del digestor de $9,560.00 \pm 2,345.72$ mg/L, con una reducción del $50.91 \pm 32.24\%$, la cual denotó un valor por debajo de la reducción normal para sistemas de digestión anaerobia (entre el 80 – 90%).
- 4) La demanda química de oxígeno antes del digestor en la Granja Agua Blanca fue de $22,666.67 \pm 3,140.02$ mg/L y de $15,526.67 \pm 12,294.30$ mg/L después del digestor, con una reducción del $31.50 \pm 25.32\%$ la cual denotó un valor por debajo de la reducción normal para sistemas de digestión anaerobia (entre 80 – 90%).
- 5) La demanda bioquímica de oxígeno antes del digestor en la Granja La Flor fue de $11,175.00 \pm 4,341.59$ mg/L y de $5,505.00 \pm 2,712.67$ mg/L después del digestor, con una reducción del $50.74 \pm 31.84\%$, la cual denotó un valor por debajo de la reducción normal para sistemas de digestión anaerobia (90%).
- 6) La demanda bioquímica de oxígeno antes del digestor en la Granja Agua Blanca fue de $15,550.00 \pm 2,392.17$ mg/L y de $9,250.00 \pm 7,364.27$ mg/L después del digestor, con una reducción del $40.51 \pm 32.85\%$, la cual denotó un valor por debajo de la reducción normal para sistemas de digestión anaerobia (90%).
- 7) La relación DQO/DBO en la Granja La Flor antes del digestor fue de 1.70 ± 0.47 y de 1.87 ± 0.47 después del digestor, dando referencia no sólo a una cantidad mayor de materia inorgánica de la esperada (se buscaban valores entre 1 y 1.30 como parámetro normal), sino también de la naturaleza eminentemente biológica del proceso, ya que después de digestión anaerobia aumentó la relación DQO/DBO.
- 8) La relación DQO/DBO en la Granja Agua Blanca antes del digestor fue de 1.48 ± 0.29 y de 1.68 ± 0.07 después del digestor, dando referencia no sólo a una cantidad mayor de materia inorgánica de

la esperada (se buscaban valores entre 1 y 1.30 como parámetro normal), sino también de la naturaleza eminentemente biológica del proceso, ya que después de digestión anaerobia aumentó la relación DQO/DBO.

- 9) La concentración de sólidos suspendidos totales antes del digestor en la Granja La Flor fue de $15,749.33 \pm 8,088.12$ mg/L y después del digestor de $9,284.00 \pm 527.00$ mg/L, con una reducción del $41.05 \pm 21.21\%$, la cual estuvo por debajo de lo esperado para un sistema de digestión anaerobia (cercana al 80%).
- 10) La concentración de sólidos suspendidos totales antes del digestor en la Granja Agua Blanca fue de $21,383.33 \pm 9,337.66$ mg/L y después del digestor de $8,320.00 \pm 1,504.72$ mg/L, con una reducción del $61.09 \pm 28.87\%$, la cual estuvo por debajo de lo esperado para un sistema de digestión anaerobia (cercana al 80%).
- 11) El pH de la carga antes del digestor fue de 6.50 ± 0.05 y de 7.32 ± 0.03 para después del digestor, para la Granja La Flor, con lo cual se corroboró que la alimentación se hace de forma adecuada (pH entre 6 y 7) y que el proceso de digestión anaerobia, de manera global, produce un aumento en el pH.
- 12) El pH de la carga antes del digestor fue de 6.38 ± 0.19 y de 7.23 ± 0.04 para después del digestor, para la Granja Agua Blanca, con lo cual se corroboró que la alimentación se hace de forma adecuada (pH entre 6 y 7) y que el proceso de digestión anaerobia, de manera global, produce un aumento en el pH.
- 13) El digestor de la Granja La Flor produce 76.34 ± 3.60 m³ de biogás al día, con una concentración de $62.63 \pm 0.73\%$ de metano, $36.37 \pm 0.73\%$ de dióxido de carbono y 1% de sulfuro de hidrógeno, con un rendimiento de 0.5127 ± 0.0667 m³día⁻¹m³ de digestor, siendo la calidad del biogás (concentración de metano en el mismo) baja para la materia prima utilizada (debiera estar entre 65 a 70%) y la productividad igualmente baja, buscándose valores cercanos y mayores de 1 m³día⁻¹m³ de digestor.
- 14) El digestor de la Granja Agua Blanca produce 46.60 ± 2.54 m³ de biogás al día, con una concentración de $57.94 \pm 0.73\%$ de metano, $41.06 \pm 0.73\%$ de dióxido de carbono y 1% de sulfuro de hidrógeno, con un rendimiento de 0.2926 ± 0.0380 m³día⁻¹m³ de digestor, siendo la calidad del biogás (concentración de metano en el mismo) baja para la materia prima utilizada (debiera estar entre 65 a 70%) y la productividad igualmente baja, buscándose valores cercanos y mayores de 1 m³día⁻¹m³ de digestor.
- 15) La eficiencia de los quemadores de biogás fue de $65.84 \pm 14.82\%$ para un flujo de 0.0009366 ± 0.0000476 m³/s (válvula totalmente abierta) y de $60.75 \pm 9.05\%$ para un flujo de $0.0005301 \pm$

0.0000306 m³/s (válvula abierta a ½ de su giro total), con lo cual se corroboró la ineficiencia de utilizar sistemas de calefacción por radiación, ya que para quemadores la eficiencia común debe ser mayor al 80%.

- 16) La remoción de sulfuro de hidrógeno no aumenta significativamente la temperatura ideal de gases de combustión, pero sí representa beneficios a nivel ambiental ya se evita la liberación de dióxido de azufre en los gases de combustión
- 17) La remoción de dióxido de carbono sí da un aumento en la temperatura ideal de gases de combustión, por lo cual se denota el beneficio de utilizar filtro de dióxido de carbono para tener un gas con mejores características energéticas de combustión.
- 18) El digestor anaerobio de la Granja La Flor mostró un mejor rendimiento en producción de biogás (cantidad y calidad) y reducción de parámetros en el agua residual (DQO, DBO y SST) que el digestor de la Granja Agua Blanca, demostrándose así mejores resultados para operación de los digestores a mayor temperatura.
- 19) A pesar de mostrar mejores resultados el digestor de la Granja La Flor, en general ambos digestores operan por debajo de la temperatura óptima (cercana a 35°C), con lo cual se explican los rendimientos bajos y la calidad del biogás por debajo de los límites inferiores investigados para producción de gas a partir de excretas de cerdo.
- 20) La carencia de sistemas de agitación causa que la remoción de parámetros en el agua residual (DQO, DBO y SST) sea menor al esperado para un sistema de digestión anaerobia.

X. RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda en ambos digestores contar con sistemas adecuados de control de temperatura y presión, como lo podrían ser termómetros (de carátula de vástago largo) y manómetros (preferiblemente tipo Bourdon, por lo delicado de tener otro sistema más frágil en la ubicación de los digestores). Los costos de adquisición e instalación de un sistema básico de medición de temperatura y presión como el propuesto oscilan entre Q 3,500.00 y Q 4,000.00, por digestor.
- 2) En cuanto a la ubicación de los digestores se recomienda mejorar el trabajo de obra civil para que sea más accesible y por lo mismo más fácilmente operable, ya que por encontrarse ambos digestores en lugares periféricos de las granjas se ha descuidado su acceso para facilitar la operación y de igual manera rutas seguras por cualquier inconveniente. Para el caso de la Granja La Flor los costos de adecuación de obra civil tendrían un costo aproximado de Q 10,000.00 mientras que en el caso de la Granja Agua Blanca los costos oscilarían entre Q 20,000.00 y Q 25,000.00 debido a las características y cercanía de cada instalación.
- 3) Se recomienda hacer análisis periódicos de las cargas al digestor (principalmente sólidos suspendidos totales, SST) para llevar un control adecuado de la naturaleza de las cargas al digestor para estandarizar el procedimiento y no tener variaciones considerables en la producción de biogás, con un costo mensual aproximado de Q 400.00 por digestor (realizando mediciones quincenales en laboratorios externos).
- 4) Para el digestor de la Granja La Flor, se recomienda instalar sistemas de válvulas adecuados tanto para la admisión del agua residual (afluente) desde los corrales hacia el tanque de captación, como desde el tanque de captación hacia el digestor, no sólo para controlar mejor la carga sino también como medida de seguridad para los operarios que desempeñen dicha labor. El costo de adquisición e instalación de dichas válvulas sería de aproximadamente Q 3,000.00.
- 5) De igual manera, para el digestor de la Granja La Flor se recomienda instalar un sistema adecuado de rebalse (con tubería para establecer un nivel), una pileta de descarga y un sistema de conducción del efluente hacia los campos aledaños de fertirriego o para poder envasar y vender posteriormente, con el objeto de no contaminar el terreno inmediato aledaño a la descarga y también aprovechar económicamente el recurso que se tiene, con un costo aproximado de Q 33,000.00.
- 6) Se recomienda dar mantenimiento y regularizar las operaciones de purga de lodos en ambos digestores, para evitar acumulación en el digestor, que posteriormente pueda perturbar el efluente del digestor (sobrecargándolo de sólidos y aumentando otros parámetros como el DQO y DBO), tomando en cuenta que los sistemas de purga del digestor sí existen.

- 7) De igual manera, para ambos digestores instalar un sistema de recolección y conducción de los gases todavía producidos y liberados al ambiente en el tanque de descarga (efluente), ya sea para reincorporación al sistema de conducción principal del biogás (aunque la presencia de amoníaco puede ser perjudicial en este sentido) o para conectarlo directamente con un quemador constante, ya que es preferible quemar dicho material que liberarlo tal cual al ambiente. Dicho sistema puede consistir en una campana fija que cubra todo el tanque de descarga, con una tubería de salida en la parte superior para adaptarla ya sea al sistema de conducción de biogás o a un quemador. La instalación de un sistema similar tendría un costo aproximado de Q 5,000.00, por digestor.
- 8) Con el objeto de mejorar y optimizar la utilización del biogás, se recomienda la instalación de filtros de dióxido de carbono, los cuales pueden consistir en recipientes cilíndricos equipados con ductos de entrada y salida, tanto para la lechada de cal utilizada en la reacción como para el gas. Además, tomar en cuenta que dichos sistemas deben contar con dispositivos adecuados de dispersión del gas. Para ello se puede adaptar la entrada del gas (la cual debe estar por debajo del nivel de la lechada de cal) con tuberías perforadas con agujeros pequeños, para propiciar la dispersión del gas en forma de burbujas y que la eliminación del dióxido de carbono sea más adecuada. Para lo anterior, se recomienda hacer un estudio y análisis económico para el diseño e instalación de dicho filtro. La instalación del sistema de filtración tendría un costo aproximado entre Q 1,000.00 y Q 1,500.00 con un costo mensual aproximado de Q 50.00 en adquisición de cal, por digestor.
- 9) Tanto para una futura instalación de filtros de dióxido de carbono como para los ya existentes filtros de sulfuro de hidrógeno se recomienda realizar periódicamente inspecciones del estado de los mismos así como renovación del material interno (lechada de cal o viruta metálica, respectivamente), para asegurar su buen funcionamiento.
- 10) De manera general, y ligado a las mejoras en cuanto a obra civil, se recomienda reforzar y proteger todo el sistema de tuberías, tanto las que llevan el agua a tratar hacia el digestor como las tuberías de efluente y de transporte de gas, ya que se encuentran poco protegidas y no soportadas, lo cual representa un riesgo alto algún tipo de fractura de los sistemas y posteriores accidentes. En el caso de la Granja La Flor dichos costos serían aproximadamente de Q 2,000.00. En el caso de la Granja Agua Blanca, los costos serían aproximadamente de Q 3,000.00 sin tomar en cuenta el área de conducción hasta la Granja de Pastores por no tener datos acerca del terreno (barranco).
- 11) Para el digestor de la Granja Agua Blanca, se recomienda modificar la galera de cubierta del sistema, ya que imposibilita la cómoda y propia movilización en dicha área, ya que es necesario agacharse para poder manipular la salida del biogás así como el material de tanque de descarga.

- 12) Para ambos digestores es necesario contar con sistemas de calentamiento del material interno de ambos digestores para poder tener mejores resultados, ya que como se observó, ambos trabajan por debajo de las temperaturas óptimas de producción de biogás. Así pues, se recomienda realizar un estudio técnico y económico para el diseño e instalación de un sistema de intercambio de calor, el cual puede ser externo y consistente en un intercambiador de tubos concéntricos (los más utilizados), utilizándose agua caliente como medio de calefacción o inclusive gases de combustión de cierta fracción del biogás, para no tener mayores gastos en fuentes de energía para dicho calentamiento (cuyo costo oscilaría entre Q 15,000.00 y Q 25,000.00, según las características del sistema diseñado). Con ello no sólo se mejora la calidad y cantidad de biogás producido, sino también se logra aprovechar parte de él para lograr el cometido.

- 13) De igual manera, en ambos digestores es necesario contar con sistemas de agitación, para lograr una mejor homogenización en el interior del digestor y así lograr mayores grados de conversión y reducción de parámetros como SST, DBO y DQO y consecuentemente mejorar las condiciones de producción del biogás. Entre las formas que se pueden utilizar para implementar dicha agitación pueden contarse la instalación de un agitador mecánico, aunque por las proporciones del digestor no sería tan adecuado. Otra forma podría ser la instalación de un compresor, que recircule el biogás producido hacia el digestor, inyectándolo en su parte inferior, con sistemas adecuados de dispersión del gas (similar al propuesto para los filtros de dióxido de carbono), y así lograr agitación con el mismo material producido. Y la tercera opción y que podría ser la más integral (todo depende de la realización y los resultados de un estudio de diseño e instalación de cada sistema) sería la instalación del mismo sistema de intercambio de calor interno, ya que por medio de una bomba se toma material del digestor y se hace pasar por el intercambiador, logrando así el aumento de su temperatura y se reinyecta posteriormente en el mismo interior del digestor, logrando así dos propósitos: calentamiento y agitación. En términos generales la instalación de algún sistema como los propuestos tendría un costo que podría oscilar entre Q 10,000.00 a Q 30,000.00, según sus las características del mismo (se recomienda hacer un análisis económico detallado de cada opción). En este punto cabe resaltar que la utilización de una bomba sumergible en el digestor de la Granja Agua Blanca, aunque puede dar dichos resultados tienen el inconveniente de mezclar la carga almacenada en el tanque de captación con material parcialmente digerido, lo cual puede traer descontrol en las cargas y resultados de producción del digestor.

- 14) Debido a limitaciones presupuestales en la realización del presente estudio se recomienda también realizar un análisis microbiológico para determinar el estado de la biota dentro de cada digestor con el objeto de poder caracterizar mejor el contenido del mismo y tomar medidas de acuerdo a las características metabólicas de dichas bacterias.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) ACP, Cornare y Corantioquía. 1997. *Manejo de elementos de la producción porcina que pueden causar efectos ambientales. Convenio de concertación de una producción más limpia en el sector porcícola y ambiental del Departamento de Antioquía*. ACP. Colombia.
- 2) Álvarez, J., Caneta, L., Moyano, C. 2002. *Biomasa y Biogás*. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina.
- 3) Burns, R. T. 2004. *Animal Waste Anaerobic Digestion Basics*. Departamento de Ingeniería Agrícola y en Biosistemas. Universidad de Iowa. Estados Unidos.
- 4) Calderón, F., Pavlova, M. 2007. *Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno, DBO5, Método Respirométrico*. Dr. Calderón Laboratorios Ltda. Bogotá, Colombia.
- 5) Calzada, J. F., Porres, E., De León, R., Rolz, C. 1981. *Biogas Research Projects in Central America. Fuel Gas Production from Biogas, Vol I*. CRC Press. Estados Unidos.
- 6) Costa, S., Devadder, M. 2007. *Biogás, Seminario de Bioingeniería*. OIKOS, ALARA. Argentina.
- 7) Grady, C. P. L., Daigger, G. T., Lim, H. C. 1999. *Biological Wastewater Treatment: Theory and Applications*. 2a edición. Marcel Dekker Inc. Estados Unidos.
- 8) ICAITI. 1988. *Aprovechamiento Energético del Biogás, Informe Técnico Final*. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial. Guatemala.
- 9) Lapp, H., M., Robertson, E. E. 1981. *Biogas Production from Animal Manure. Fuel Gas Production from Biogas, Vol I*. CRC Press. Estados Unidos.
- 10) Levenspiel, O. 2006. *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. 3ª edición. Limusa Wiley. México.
- 11) López, G. 2004. *Digestión anaerobia en residuos sólidos orgánicos urbanos: Estimación del tiempo de retención dependiendo de la concentración de sólidos volátiles totales y de la presencia o no de un inóculo*. Universidad de Los Andes. Colombia.

- 12) McInerney, M., Bryant, M. 1981. *Review of Methane Fermentation Fundamentals. Fuel Gas Production from Biogas, Vol I.* CRC Press. Estados Unidos.
- 13) Nelson, C., Lamb, J. 2002. *Haubenschild Farms Anaerobic Digesters.* The Minnesota Project. Estados Unidos.
- 14) Perry, R., Green, D. 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook.* 7a edición. McGraw Hill. Estados Unidos.
- 15) Polprasert, C. 1989. *Organic Waste Recycling, Asian Institute of Technology.* Jonh Wiley & Sons. Inglaterra.
- 16) Serrano, J. C., Carranza, Y. A. 2005. *Análisis Teórico de la Combustión en Quemadores de Gas Natural.* Universidad de Pamplona. Colombia.
- 17) Sosa, R. 2002. *Tratamiento y uso de recursos producidos con excretas porcinas.* Instituto de Investigaciones Porcinas. Punta Brava, La Habana, Cuba.

Páginas de Internet.

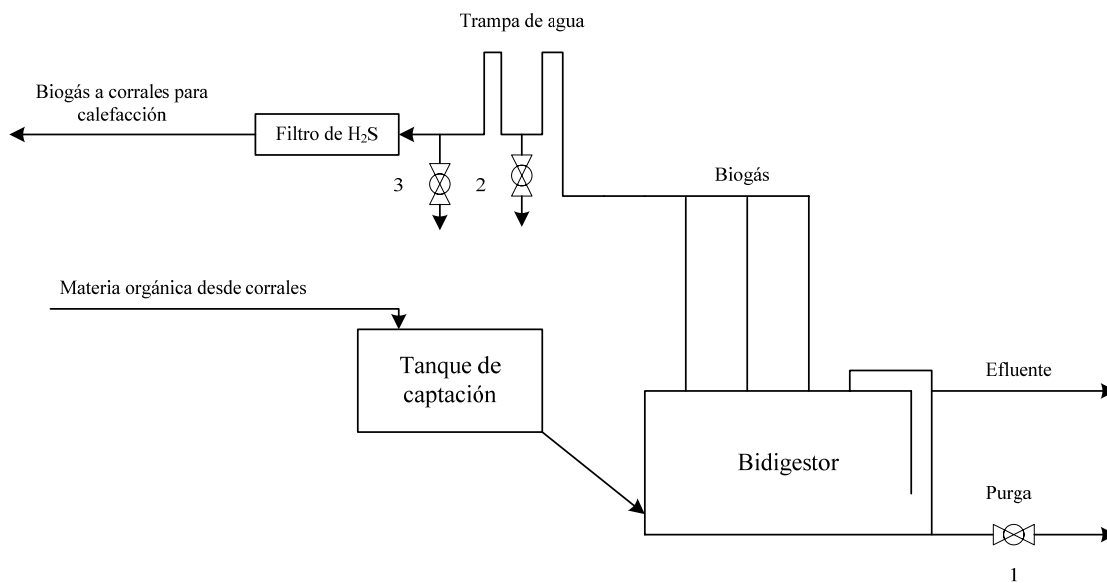
- 1) Chará, Julian. 2000. *El potencial de las excretas porcinas para uso múltiple y los sistemas de descontaminación productiva.* Colombia. <http://www.cipav.org.co/cipav/conf/chara1.htm>.
- 2) Wells, W. J. 2007. *Design, Construction & Start up of a Covered Anaerobic Digester Treating Manure from a Sow Farm.* Estados Unidos. <http://www.epa.gov/agstar/pdf/conference04/wells.pdf>.

APÉNDICE

A. Diagrama de los digestores.

1. Diagrama general del sistema de digestión anaeróbica en la Granja La Flor.

Figura 14: Sistema de digestión anaerobia de la Granja La Flor.



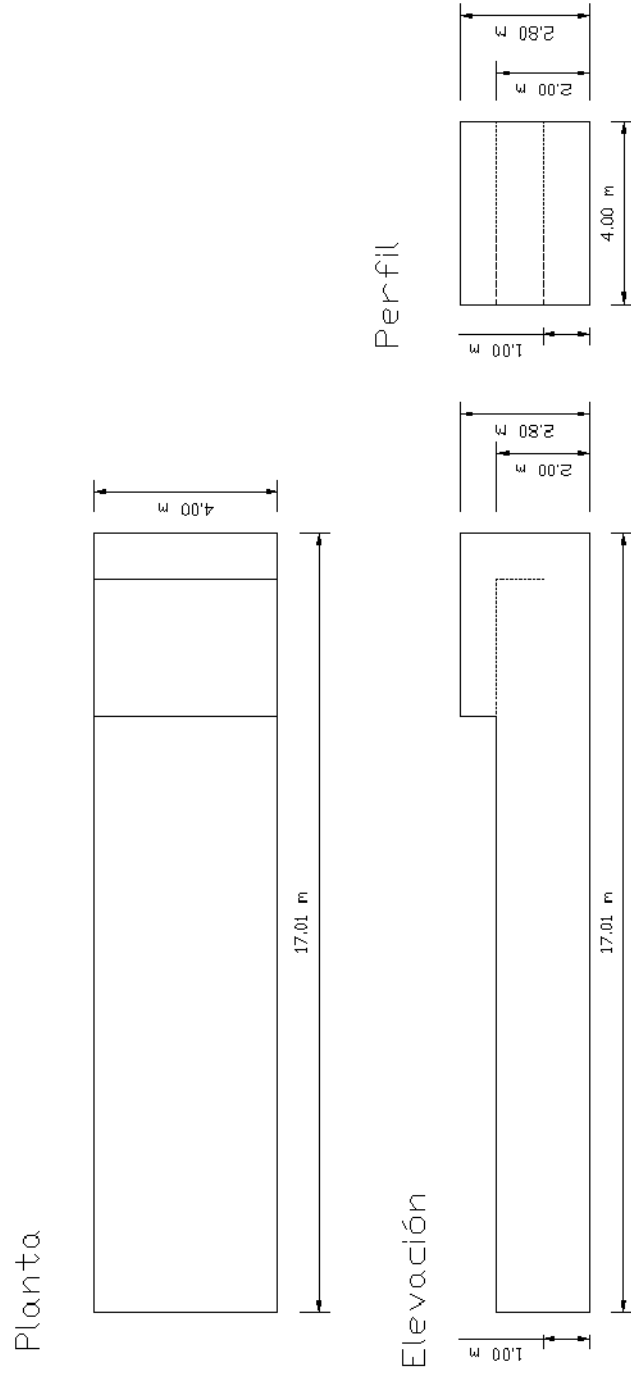
Cuadro 12: Especificaciones del sistema de digestión anaerobia de la Granja La Flor

Equipo	Especificación
Tanque de captación	<ul style="list-style-type: none"> - Material de construcción: Block de concreto. - Área superficial: 28.00 m². - Frecuencia de carga: 1 vez por semana.
Biodigestor	<ul style="list-style-type: none"> - Material de construcción: Block de concreto. - Aislamiento: Interno, base de parafina. - Volumen neto de reacción: 128.085 m³. - Volumen total del digestor: 148.885 m³. - Frecuencia de carga: Diaria.
Trampa de agua	<ul style="list-style-type: none"> - Material: PVC. - Diámetro nominal: ¾ de pulgada. - Característica: En forma de U. - Altura: 1.50 m - Ancho: .050 m.
Filtro de H ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> - Material: Tubo de PVC - Diámetro nominal: 5 pulgadas. - Relleno: Viruta metálica. - Altura: 2.0 m

Cuadro 13: Especificaciones de válvulas en el sistema de digestión de la Granja La Flor

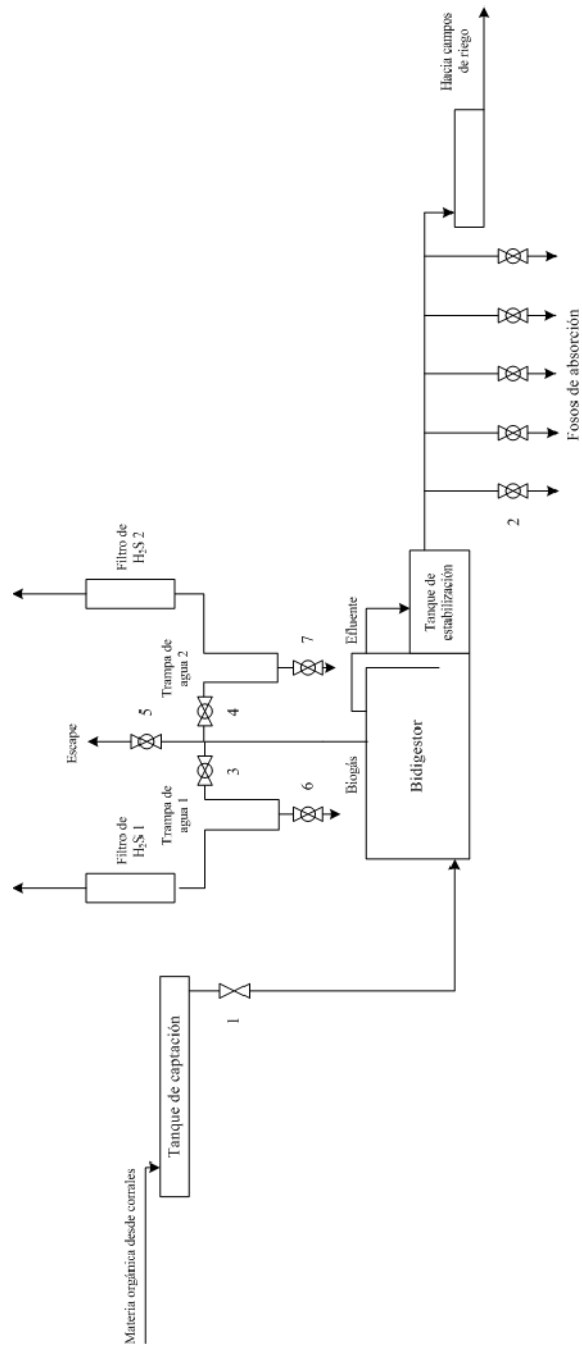
Válvula	Especificaciones
Válvula 1	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Purga de sólidos en la parte final del digestor. - Tamaño: 5 pulgadas. - Tipo: De bola.
Válvula 2	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Purga de agua acarreada en el biogás. - Tamaño: ¾ de pulgada. - Tipo: De bola.
Válvula 3	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Admisión de gas en el cuarto de monitoreo. - Tamaño: ¾ de pulgada. - Tipo: De bola.

Figura 15: *Vistas de planta, elevación y perfil para el digestor anaerobio de la Granja La Flor*



2. Diagrama general del sistema de digestión anaeróbica en la Granja Agua Blanca.

Figura 16: Sistema de digestión de la Granja Agua Blanca



Cuadro 14: Especificaciones del sistema de digestión anaerobia de la Granja Agua Blanca

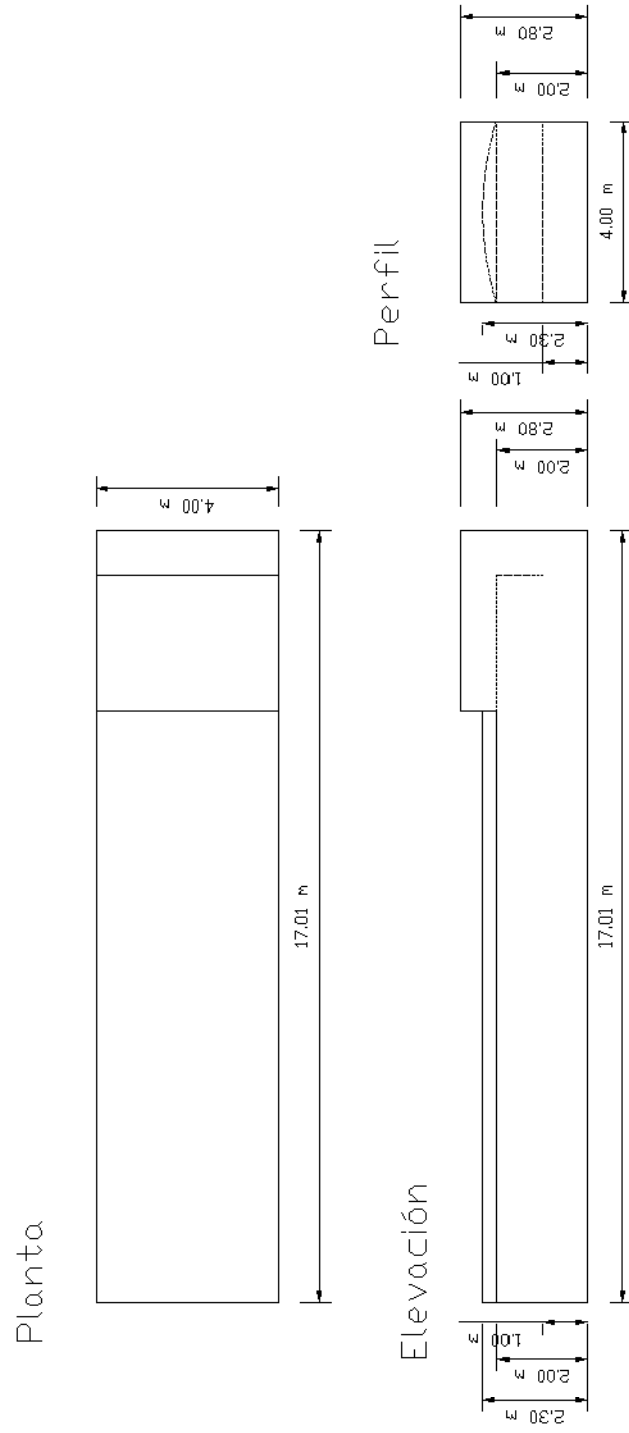
Equipo	Especificación
Tanque de captación	<ul style="list-style-type: none"> - Material de construcción: Block de concreto. - Área superficial: 16.42 m². - Frecuencia de carga: 2 vez por semana.
Biodigestor	<ul style="list-style-type: none"> - Material de construcción: Block de concreto. - Aislamiento: Interno, base de parafina. - Volumen neto de reacción: 138.493 m³. - Volumen total del digestor: 159.293 m³. - Frecuencia de carga: Diaria.
Trampa de agua 1	<ul style="list-style-type: none"> - Material: PVC. - Diámetro nominal: ¾ de pulgada. - Característica: En forma de U. - Altura: 1.50 m - Ancho: .050 m.
Trampa de agua 2	<ul style="list-style-type: none"> - Material: PVC. - Diámetro nominal: ¾ de pulgada. - Característica: En forma de U. - Altura: 1.50 m - Ancho: .050 m.
Filtro de H ₂ S 1	<ul style="list-style-type: none"> - Material: Hierro negro - Diámetro nominal: 5 pulgadas. - Relleno: Viruta metálica. - Largo: 1.20 m
Filtro de H ₂ S 2	<ul style="list-style-type: none"> - Material: Tubo de PVC - Diámetro nominal: 5 pulgadas. - Relleno: Viruta metálica. - Altura: 2.0 m
Sistema de conducción del efluente	<ul style="list-style-type: none"> - Características: Tanque de estabilización, sistema de tubería con fosos de absorción para descarga de efluente, segunda pileta de estabilización y canales superficiales de conducción. - Conducción entre piletas: Tubo PVC de 5 pulgadas de diámetro nominal.

Cuadro 15: Especificaciones de válvulas en el sistema de digestión de la Granja Agua Blanca

Válvula	Especificaciones
Válvula 1	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Alimentación desde el tanque de captación al digestor - Tamaño: 7 pulgadas. - Tipo: De compuerta.
Válvulas 2*	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Purga del efluente entre el tanque de estabilización y la segunda pileta de estabilización. - Tamaño: 3 de pulgada. - Tipo: De bola.
Válvula 3	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Admisión de gas hacia el filtro de sulfuro de hidrógeno de la Granja Agua Blanca. - Tamaño: ¾ de pulgada. - Tipo: De bola.
Válvula 4	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Admisión de gas hacia el filtro de sulfuro de hidrógeno de la Granja de reproducción de Pastores. - Tamaño: ¾ de pulgada. - Tipo: De bola.
Válvula 5	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Válvula de seguridad para descarga de gas al aumentar demasiado la presión interna. - Tamaño: ¾ de pulgada. - Tipo: De bola.
Válvula 6	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Purga de agua arrastrada por el biogás rumbo hacia los corrales de la Granja Agua Blanca. - Tamaño: ¾ de pulgada. - Tipo: De bola.
Válvula 7	<ul style="list-style-type: none"> - Uso: Purga de agua arrastrada por el biogás rumbo hacia los corrales de la Granja de reproducción de Pastores. - Tamaño: ¾ de pulgada. - Tipo: De bola.


*Las 5 válvulas identificadas en el área 2 tienen las mismas especificaciones.

Figura 17: Vistas de planta, elevación y perfil para el digestor anaerobio de la Granja Agua Blanca



B. Informes de resultados de calidad de afluentes y efluentes.

1. Informes de análisis Granja La Flor.



ECOQUIMSA
LABORATORIO ECOLÓGICO Y QUÍMICO

29 Calle 14-33, Zona 5
Tel.: (502) 2362-2801
TELEFAX: (502) 2332-2589
E-mail: ecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS

Datos del cliente:
 Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
 Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
 Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

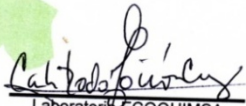
Lugar de muestreo: Granja de cerdos La Flor	Muestra simple o compuesta: Simple
Referencia cliente: Antes de digestor	Responsable del muestreo: Cliente
Fecha de monitoreo: 4 de octubre del 2007	Hora de monitoreo: 11:00
Tipo de muestra: Agua residual tipo especial	Temperatura de almacenaje: 5°C
Lote: 2515	Recipiente utilizado: Plástico
Código: GJ6519	

Datos de laboratorio:
 Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 4 de octubre del 2007
 Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 14:00
 Fecha de informe: 11 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	16,060
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	12,600
Relación DQO/DBO	---	---	1.3
Sólidos en suspensión totales	mg/l	10	18,520

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
 Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.



Laboratorio ECOQUIMSA
 Lic. CARLOS RODOLFO GIRON CORZO
 QUÍMICO FARMACEUTICO
 COLEGIADO No. 2265

Lic. CARLOS RODOLFO GIRON CORZO
 QUÍMICO FARMACEUTICO
 COLEGIADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo:	Granja de cerdos La Flor	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Después de digestor	Responsable del muestreo:	Cliente
Fecha de monitoreo:	4 de octubre del 2007	Hora de monitoreo:	11:05
Tipo de muestra:	Agua residual tipo especial	Temperatura de almacenaje:	5°C
Lote:	2515	Recipiente utilizado:	Plástico
Código:	GJ6520		

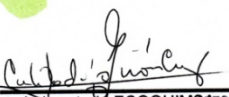
Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 4 de octubre del 2007
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 14:00
Fecha de informe: 11 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	11,680
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	8,600
Relación DQO/DBO	---	---	1.4
Sólidos en suspensión totales	mg/l	10	9,402

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


L. C. O. S. A. ECOQUIMSA
QUIMICO FARMACEUTICO
COLECTADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE ANÁLISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo: Granja de Cerdos La Flor Muestra simple o compuesta: Simple
Referencia cliente: Antes de digestor Hora de muestreo: 10:43
Fecha de monitoreo: 8 de octubre del 2007 Responsable del muestreo: Cliente
Tipo de muestra: Agua residual de tipo especial Temperatura de almacenaje: 5°C
Código: GJ6537 Recipiente utilizado: Plástico
Lote: 2526

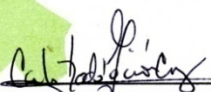
Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 9 de octubre del 2007
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 13:50
Fecha de informe: 16 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	32,160
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	14,625
Relación DQO/DBO	---	---	2.2
Sólidos totales	mg/l	10	22,088

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


Laboratorio ECOQUIMSA
Lic. CARLOS RODOLFO GIRON CORZO
QUÍMICO FARMACÉUTICO
COLEGIADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE ANÁLISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo:	Granja de Cerdos La Flor	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Después de digestor	Hora de muestreo:	10:47
Fecha de monitoreo:	8 de octubre del 2007	Responsable del muestreo:	Cliente
Tipo de muestra:	Agua residual de tipo especial	Temperatura de almacenaje:	5°C
Código:	GJ6538	Recipiente utilizado:	Plástico
Lote:	2526		


Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 9 de octubre del 2007
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 13:50
Fecha de informe: 16 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	9,960
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	4,375
Relación DQO/DBO	---	---	2,3
Sólidos totales	mg/l	10	9,742

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


Laboratorio ECOQUIMSA
Lic. CARLOS RODOLFO GIMÉNEZ
QUÍMICO FARMACÉUTICO
COLEGIADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE ANÁLISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo:	Granja de Cerdos La Flor	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Antes de digestor	Hora de muestreo:	11:00
Fecha de monitoreo:	23 de octubre del 2007	Responsable del muestreo:	Cliente
Tipo de muestra:	Agua residual de tipo especial	Temperatura de almacenaje:	5°C
Código:	GJ6628	Recipiente utilizado:	Plástico
Lote:	2562		

Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 23 de octubre del 2007
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 14:45
Fecha de informe: 30 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	10,200
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	6,300
Relación DQO/DBO	---	---	1.6
Sólidos totales	mg/l	10	6,640

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


Laboratorio ECOQUIMSA

Lic. CARLOS RODOLFO GIRON CORZO
QUÍMICO FARMACEÚTICO
COLEGIADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE ANÁLISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo:	Granja de Cerdos La Flor	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Después de digestor	Hora de muestreo:	12:10
Fecha de monitoreo:	23 de octubre del 2007	Responsable del muestreo:	Cliente
Tipo de muestra:	Agua residual de tipo especial	Temperatura de almacenaje:	5°C
Código:	GJ6629	Recipiente utilizado:	Plástico
Lote:	2562		

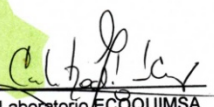
Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 23 de octubre del 2007
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 14:45
Fecha de informe: 30 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	7,040
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	3,540
Relación DQO/DBO	---	---	2,0
Sólidos totales	mg/l	10	8,708

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


Laboratorio ECOQUIMSA

Lic. CARLOS RODOLFO GIRON CORZO
QUÍMICO FARMACEUTICO
COLEGIADO No. 2265

2. Informes de análisis Granja Agua Blanca.



29 Calle 14-33, Zona 5
Tel.: (502) 2362-2801
TELEFAX: (502) 2332-2589
E-mail: ecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS**Datos del cliente:**

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo: Granja de Cerdos Agua Blanca
Referencia cliente: Antes de digestor
Fecha de monitoreo: 4 de octubre del 2007
Tipo de muestra: Agua residual tipo especial
Lote: 2516
Código: GJ6521

Muestra simple o compuesta: Simple
Responsable del muestreo: Cliente
Hora de monitoreo: 12:30
Temperatura de almacenaje: 5°C
Recipiente utilizado: Plástico

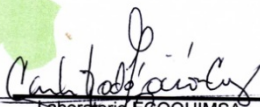
Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 4 de octubre del 2007
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 14:00
Fecha de informe: 11 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	19,200
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	14,400
Relación DQO/DBO	---	---	1,3
Sólidos en suspensión totales	mg/l	10	10,802

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


Laboratorio ECOQUIMSA

Lic. CARLOS RODOLFO GIRON CORZO
QUIMICO FARMACEUTICO
COLEGIADO No. 2265
Lic. CARLOS RODOLFO GIRON CORZO
QUIMICO FARMACEUTICO
COLEGIADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
 Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
 E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
 ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
 Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
 Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo:	Granja de Cerdos Agua Blanca	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Después de digestor	Responsable del muestreo:	Cliente
Fecha de monitoreo:	4 de octubre del 2007	Hora de monitoreo:	12:40
Tipo de muestra:	Agua residual tipo especial	Temperatura de almacenaje:	5°C
Lote:	2516	Recipiente utilizado:	Plástico
Código:	GJ6522		

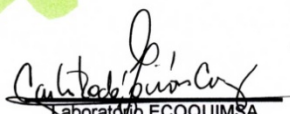
Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 4 de octubre del 2007
 Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 14:00
 Fecha de informe: 11 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	6,760
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	4,200
Relación DQO/DBO	---	---	1.6
Sólidos en suspensión totales	mg/l	10	7,256

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
 Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


 Laboratorio ECOQUIMSA
 Lic. CARLOS RODOLFO GIRON CORZO
 QUÍMICO FARMACEÚTICO
 COLEGIADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
 Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
 E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
 ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE ANÁLISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
 Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
 Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo:	Granja de Cerdos Agua Blanca	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Antes de digestor	Hora de muestreo:	12:00
Fecha de monitoreo:	9 de octubre del 2007	Responsable del muestreo:	Cliente
Tipo de muestra:	Agua residual de tipo especial	Temperatura de almacenaje:	5°C
Código:	GJ6539	Recipiente utilizado:	Plástico
Lote:	2527		

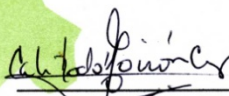
Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 9 de octubre del 2007
 Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 13:50
 Fecha de informe: 16 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	25,320
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	13,950
Relación DQO/DBO	---	---	1.8
Sólidos totales	mg/l	10	24,880

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
 Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


 Laboratorio ECOQUIMSA
 Lic. CARLOS ROLDOLFO GIRÓN CORZO
 QUIMICO FARMACEUTICO
 COLEGIADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
 Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
 E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
 ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE ANÁLISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
 Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
 Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo:	Granja de Cerdos Agua Blanca	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Después de digestor	Hora de muestreo:	12:06
Fecha de monitoreo:	9 de octubre del 2007	Responsable del muestreo:	Cliente
Tipo de muestra:	Agua residual de tipo especial	Temperatura de almacenaje:	5°C
Código:	GJ6540	Recipiente utilizado:	Plástico
Lote:	2527		

Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 9 de octubre del 2007
 Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 13:50
 Fecha de informe: 16 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	10,240
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	5,850
Relación DQO/DBO	---	---	1.8
Sólidos totales	mg/l	10	9,384

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
 Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


 Laboratorio ECOQUIMSA
 Lic. CARLOS RODOLFO GIRON CORZO
 QUIMICO FARMACEUTICO
 COLEGIADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE ANÁLISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo:	Granja de Cerdos Agua Blanca	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Antes de digestor	Hora de muestreo:	13:10
Fecha de monitoreo:	23 de octubre del 2007	Responsable del muestreo:	Cliente
Tipo de muestra:	Agua residual de tipo especial	Temperatura de almacenaje:	5°C
Código:	GJ6630	Recipiente utilizado:	Plástico
Lote:	2563		

Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 23 de octubre del 2007
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 14:45
Fecha de informe: 30 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	23,480
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	18,300
Relación DQO/DBO	---	---	1.3
Sólidos totales	mg/l	10	28,468

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.


Laboratorio ECOQUIMSA

Lic. CARLOS RODOLFO GIRÓN CORTI
QUÍMICO FARMACÉUTICO
COLEGIADO No. 2265



20 Avenida 6-52, Zona 11 Colonia Mirador I
Tels.: 2473-6627 / 2472-8254 / 5628-5472 al 5
E-mail: ecoquimsa@yahoo.es
ventasecoquimsa@yahoo.es

INFORME DE ANÁLISIS

Datos del cliente:

Cliente: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Responsable: Oscar Enrique Sáenz Wirtz
Dirección: Ciudad

Datos de la muestra:

Lugar de muestreo:	Granja de Cerdos Agua Blanca	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Después de digestor	Hora de muestreo:	13:15
Fecha de monitoreo:	23 de octubre del 2007	Responsable del muestreo:	Ciente
Tipo de muestra:	Agua residual de tipo especial	Temperatura de almacenaje:	5°C
Código:	GJ6631	Recipiente utilizado:	Plástico
Lote:	2563		

Datos de laboratorio:

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 23 de octubre del 2007
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 14:45
Fecha de informe: 30 de octubre del 2007

Análisis	Dimensional*	Límite de detección	Resultados
Demanda química de oxígeno	mg/l - O ₂	10	29,580
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l - O ₂	10	17,700
Relación DQO/DBO	---	---	1.7
Sólidos totales	mg/l	10	170,322

* mg/l = ppm

Nota: Los presentes resultados son validos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998.

Laboratorio ECOQUIMSA

Lic. CARLOS RONOLFO GIRON CORZO
QUIMICO FARMACEUTICO
COLEGIADO No. 2285

C. Caracterización de afluentes y efluentes.

1. Datos originales.

Cuadro 16: Demanda química de oxígeno para ambas granjas de crianza de cerdos, según resultados de análisis de laboratorio para tres diferentes muestras.

Fecha de Muestreo	Granja La Flor		Granja Agua Blanca	
	DQO antes del digestor (mg/L)	DQO después del digestor (mg/L)	DQO antes del digestor (mg/L)	DQO después del digestor (mg/L)
4 de octubre de 2007	16,060.00	11,680.00	19,200.00	6,760.00
9 de octubre de 2007	32,160.00	9,960.00	25,320.00	10,240.00
23 de octubre de 2007	10,200.00	7,040.00	23,480.00	29,580.00

Cuadro 17: Demanda biológica de oxígeno para ambas granjas de crianza de cerdos, según resultados de análisis de laboratorio para tres diferentes muestras.

Fecha de Muestreo	Granja La Flor		Granja Agua Blanca	
	DBO antes del digestor (mg/L)	DBO después del digestor (mg/L)	DBO antes del digestor (mg/L)	DBO después del digestor (mg/L)
4 de octubre de 2007	12,600.00	8,600.00	14,400.00	4,200.00
9 de octubre de 2007	14,625.00	4,375.00	13,950.00	5,850.00
23 de octubre de 2007	6,300.00	3,540.00	18,300.00	17,700.00

Cuadro 18: Sólidos suspendidos totales para ambas granjas de crianza de cerdos, según resultados de análisis de laboratorio para tres diferentes muestras.

Fecha de Muestreo	Granja La Flor		Granja Agua Blanca	
	SST antes del digestor (mg/L)	SST después del digestor (mg/L)	SST antes del digestor (mg/L)	SST después del digestor (mg/L)
4 de octubre de 2007	18,520.00	9,402.00	10,802.00	7,256.00
9 de octubre de 2007	22,088.00	9,742.00	24,880.00	9,384.00
23 de octubre de 2007	6,640.00	8,708.00	28,468.00	170,322.00

Cuadro 19: Sólidos suspendidos totales para ambas granjas de crianza de cerdos, según resultados de análisis de laboratorio para tres diferentes muestras.

Fecha de Muestreo	Granja La Flor		Granja Agua Blanca	
	pH antes del digestor (mg/L)	pH después del digestor (mg/L)	pH antes del digestor (mg/L)	pH después del digestor (mg/L)
4 de octubre de 2007	6.50 ± 0.01	7.30 ± 0.01	6.60 ± 0.01	7.20 ± 0.01
9 de octubre de 2007	6.45 ± 0.01	7.35 ± 0.01	6.30 ± 0.01	7.25 ± 0.01
23 de octubre de 2007	6.55 ± 0.01	7.30 ± 0.01	6.25 ± 0.01	7.15 ± 0.01

2. **Cálculos.** Los siguientes cálculos muestran el procedimiento utilizado para determinar las características promedio del afluente y efluente de cada digestor. Debido a que los cálculos son iguales para todos los casos, únicamente se muestra la determinación de la demanda química de oxígeno promedio, demanda biológica de oxígeno promedio y sólidos suspendidos totales promedio para la Granja La Flor, para las muestras correspondientes al afluente (muestra antes del digestor).

- 1) Determinación de la demanda química de oxígeno promedio, muestras antes del digestor de la Granja La Flor.

$$DQO_{prom} = \frac{(16,060.00 + 32,160.00 + 10,200.00)mg/L}{3} = 19,473.73 \pm 11,370.95 mg/L$$

- 2) Determinación de la demanda biológica de oxígeno promedio, muestras antes del digestor de la Granja La Flor.

$$DBO_{prom} = \frac{(12,600.00 + 14,625.00 + 6,300.00)mg/L}{3} = 11,175.00 \pm 4,341.59 mg/L$$

- 3) Determinación de la concentración de sólidos suspendidos totales, muestras antes del digestor de la Granja La Flor.

$$SST_{prom} = \frac{(18,520.00 + 22,088.00 + 6,640.00)mg/L}{3} = 15,749.33 \pm 8,088.12 mg/L$$

- 4) Determinación del pH, muestras antes del digestor de la Granja La Flor.

$$pH_{prom} = \frac{(6.50 + 6.45 + 6.55)}{3} = 6.50 \pm 0.05$$

En los siguientes cálculos se tomó como referencias los valores promedio antes y después del digestor de la Granja La Flor, para determinar la reducción en los valores de demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno y sólidos suspendidos totales.

- 5) Determinación de la reducción porcentual de la demanda química de oxígeno, en la Granja La Flor.

$$Red_{DQO} = 100\% - \left(\frac{9,560.00 \pm 2,345.72 mg/L}{19,473.33 \pm 11,370.95 mg/L} \right) \times 100 = 50.91 \pm 32.24\%$$

- 6) Determinación de la reducción porcentual de la demanda biológica de oxígeno, en la Granja La Flor.

$$Red_{DBO} = 100\% - \left(\frac{5,505.00 \pm 2,712.67 \text{ mg/L}}{11,175.00 \pm 4,341.59 \text{ mg/L}} \right) \times 100 = 50.74 \pm 31.84\%$$

- 7) Determinación de la reducción porcentual de la concentración de sólidos suspendidos totales, en la Granja La Flor.

$$Red_{SST} = 100\% - \left(\frac{9,284.00 \pm 527.00 \text{ mg/L}}{15,749.33 \pm 8,088.12 \text{ mg/L}} \right) \times 100 = 41.05 \pm 21.21\%$$

D. Determinación de calidad de biogás.

1. Datos originales.

Cuadro 20: Masa de hidróxido de sodio (99% de pureza) para la preparación de 2.0000 ± 0.0005 L de solución.

Solución	Masa de NaOH (g)
Solución 1	8.2203 ± 0.0001
Solución 2	8.2625 ± 0.0001
Solución 3	8.2574 ± 0.0001

Cuadro 21: Masa de fialato ácido de potasio (99.9% de pureza) para la valoración de las soluciones estándares de hidróxido de sodio, realizada en triplicado.

Muestra	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Muestra 1	0.1014 ± 0.0001 g	0.1201 ± 0.0001 g	0.1035 ± 0.0001 g
Muestra 2	0.1019 ± 0.0001 g	0.1080 ± 0.0001 g	0.1031 ± 0.0001 g
Muestra 3	0.1053 ± 0.0001 g	0.1340 ± 0.0001 g	0.1208 ± 0.0001 g

Cuadro 22: Volumen inicial y final de solución patrón de hidróxido de sodio consumida para la valoración con fialato ácido de potasio.

Muestra	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)
Muestra 1	0.00 ± 0.05	4.60 ± 0.05	0.00 ± 0.05	5.50 ± 0.05	0.00 ± 0.05	4.60 ± 0.05
Muestra 2	4.60 ± 0.05	9.30 ± 0.05	5.50 ± 0.05	10.50 ± 0.05	4.60 ± 0.05	9.20 ± 0.05
Muestra 3	9.30 ± 0.05	14.15 ± 0.05	10.50 ± 0.05	16.70 ± 0.05	9.20 ± 0.05	14.80 ± 0.05

Cuadro 23: Masa de carbonato de sodio (99.9% de pureza) para la valoración de solución patrón de ácido clorhídrico, preparada con 41.40 ± 0.05 mL de ácido clorhídrico (37.1% de pureza) aforados hasta 1000.00 ± 0.30 mL

Muestra	Masa de Carbonato de Sodio (g)
Muestra 1	0.2684 ± 0.0001
Muestra 2	0.2711 ± 0.0001
Muestra 3	0.2663 ± 0.0001

Cuadro 24: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico para su valoración con estándar de carbonato de sodio.

Muestra	Volumen inicial (mL)	Volumen final (mL)
Muestra 1	0.00 ± 0.05	9.65 ± 0.05
Muestra 2	9.65 ± 0.05	19.50 ± 0.05
Muestra 3	19.50 ± 0.05	29.20 ± 0.05

Cuadro 25: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico 0.5 M consumida para la determinación de alcalinidad total en alícuotas de 10.00 ± 0.05 mL de muestras tomadas en la Granja La Flor.

Muestra	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)
Muestra 1	0.00 ± 0.05	2.00 ± 0.05	6.20 ± 0.05	8.30 ± 0.05	12.50 ± 0.05	14.65 ± 0.05
Muestra 2	2.00 ± 0.05	4.10 ± 0.05	8.30 ± 0.05	10.40 ± 0.05	14.65 ± 0.05	16.85 ± 0.05
Muestra 3	4.10 ± 0.05	6.20 ± 0.05	10.40 ± 0.05	12.50 ± 0.05	16.85 ± 0.05	18.90 ± 0.05

Cuadro 26: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico 0.5 M consumida para la determinación de alcalinidad total en alícuotas de 10.00 ± 0.05 mL de muestras tomadas en la Granja Agua Blanca.

Muestra	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)
Muestra 1	0.00 ± 0.05	2.00 ± 0.05	6.20 ± 0.05	8.30 ± 0.05	12.50 ± 0.05	14.60 ± 0.05
Muestra 2	2.00 ± 0.05	4.10 ± 0.05	8.30 ± 0.05	10.40 ± 0.05	14.60 ± 0.05	16.70 ± 0.05
Muestra 3	4.10 ± 0.05	6.20 ± 0.05	10.40 ± 0.05	12.50 ± 0.05	16.70 ± 0.05	18.85 ± 0.05

Cuadro 27: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico 0.5 M consumida para la determinación de alcalinidad total de alícuotas de 10.00 ± 0.05 mL de muestras tomadas en la Granja La Flor.

Muestra	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)
Muestra 1	0.00 ± 0.05	0.70 ± 0.05	2.15 ± 0.05	2.90 ± 0.05	4.40 ± 0.05	5.15 ± 0.05
Muestra 2	0.70 ± 0.05	1.40 ± 0.05	2.90 ± 0.05	3.70 ± 0.05	5.15 ± 0.05	5.95 ± 0.05
Muestra 3	1.40 ± 0.05	2.15 ± 0.05	3.70 ± 0.05	4.40 ± 0.05	5.95 ± 0.05	6.65 ± 0.05

Cuadro 28: Volumen inicial y final de solución patrón de ácido clorhídrico 0.5 M consumida para la determinación de alcalinidad total de alicuotas de 10.00 ± 0.05 mL de muestras tomadas en la Granja Agua Blanca.

Muestra	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Volumen inicial (mL)	Volumen Final (mL)
Muestra 1	6.65 ± 0.05	7.40 ± 0.05	9.00 ± 0.05	9.80 ± 0.05	11.40 ± 0.05	12.25 ± 0.05
Muestra 2	7.40 ± 0.05	8.20 ± 0.05	9.80 ± 0.05	10.60 ± 0.05	12.25 ± 0.05	13.10 ± 0.05
Muestra 3	8.20 ± 0.05	9.00 ± 0.05	10.60 ± 0.05	11.40 ± 0.05	13.10 ± 0.05	13.95 ± 0.05

Cuadro 29: Condiciones ambientales y datos experimentales en la operación de burbujeo de biogás en las soluciones de hidróxido de sodio, así como mediciones de velocidad lineal de salida de biogás en ambas granjas.

Característica	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Tiempo de burbujeo (s)	7.00 ± 0.01	7.00 ± 0.01
Diámetro de la tubería de medición (m)	0.0150 ± 0.0005	0.0120 ± 0.0005
Velocidad de flujo (pies/min)	210.0 ± 2.5	280.0 ± 2.5
Temperatura ambiente (°C)	26.0 ± 0.1	17.9 ± 0.1
Presión atmosférica (Pa)	87,997.1	83,997.2

2. Cálculos.

- 1) Determinación del consumo de solución de hidróxido de sodio patrón, para la valoración de la Solución 1, Muestra 1, con ftalato ácido de potasio.

$$\text{Consumo} = (4.60 \pm 0.05 - 0.00 \pm 0.05)\text{mL} = 4.60 \pm 0.07 \text{ mL}$$

- 2) Determinación de los moles de ftalato ácido de potasio en la masa para la valoración de la Muestra 1 de la Solución 1.

$$\text{Moles de Ftaltato} = 0.1014 \pm 0.0001g \text{ reactivo} \left(\frac{99.9 g \text{ Ftalato}}{100g \text{ reactivo}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol Ftalato}}{204.224g \text{ Ftalato}} \right)$$

$$\text{Moles de Ftalato} = 0.0004960 \pm 0.0000005 \text{ mol Ftalato}$$

- 3) Determinación de la concentración de hidróxido de sodio para la Muestra 1 de la Solución 1.

$$c = \frac{0.0004960 \pm 0.0000005 \text{ mol Ftalato} \left(\frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol Ftalato}} \right)}{4.60 \pm 0.07 \text{ mL} \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \right)} = 0.108 \pm 0.002 \text{ M}$$

Nota: Dado que el procedimiento de cálculo para la valoración de todas las muestras de cada solución estándar de hidróxido de sodio es el mismo, únicamente se dan los cálculos anteriormente expuestos y para cada solución se promediaron los valores de concentraciones de sus muestras.

- 4) Determinación del consumo de solución patrón de ácido clorhídrico para la valoración de la misma con carbonato de sodio, para la Muestra 1.

$$\text{Consumo} = (9.65 \pm 0.05 - 0.00 \pm 0.05) \text{ mL} = 9.65 \pm 0.07 \text{ mL}$$

- 5) Determinación de los moles de carbonato de sodio presentes en la masa utilizada para la valoración de la Muestra 1 de la solución patrón de ácido clorhídrico.

$$\text{Moles de Na}_2\text{CO}_3 = 0.2684 \pm 0.0001g \text{ reactivo} \left(\frac{99.9g \text{ Na}_2\text{CO}_3}{100g \text{ reactivo}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3}{105.989g \text{ Na}_2\text{CO}_3} \right)$$

$$\text{Moles de Na}_2\text{CO}_3 = 0.002530 \pm 0.000049 \text{ mol}$$

- 6) Determinación de la concentración de ácido clorhídrico en la Muestra 1 valorada.

$$c = \frac{0.002530 \pm 0.000049 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3 \left(\frac{2 \text{ mol HCl}}{1 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3} \right)}{9.65 \pm 0.07 \text{ mL} \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \right)} = 0.524 \pm 0.011 \text{ M}$$

Nota: Dado que el procedimiento de cálculo para la valoración de todas las muestras de cada solución estándar de ácido clorhídrico es el mismo, únicamente se dan los cálculos anteriormente expuestos y finalmente se promedian su valores para dar la concentración de la solución patrón.

- 7) Determinación del consumo de solución patrón de ácido clorhídrico $0.520 \pm 0.004 \text{ M}$ para la determinación de alcalinidad total de la Muestra 1 de la Solución 1 correspondiente a la Granja La Flor.

$$\text{Consumo} = (2.00 \pm 0.05 - 0.00 \pm 0.05) \text{ mL} = 2.00 \pm 0.07 \text{ mL}$$

- 8) Determinación de la cantidad de moles totales alcalinos para la determinación de alcalinidad total de la Muestra 1 de la Solución 1 correspondiente a la Granja La Flor, para una alícuota de $10.00 \pm 0.05 \text{ mL}$ de muestra.

$$\text{Moles Alcalinos Totales} = 2.00 \pm 0.07 \text{ mL sol HCl} \left(\frac{0.520 \pm 0.004 \text{ mol HCl}}{1000 \text{ mL sol HCl}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol Base}}{1 \text{ mol HCl}} \right)$$

$$\text{Moles Alcalinos Totales} = 0.00104 \pm 0.00004 \text{ mol Base}$$

- 9) Determinación de la alcalinidad total de la Muestra 1 de la Solución 1 correspondiente a la Granja La Flor.

$$AT = \frac{0.00104 \pm 0.00004 \text{ mol Base}}{10.00 \pm 0.05 \text{ mL} \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \right)} = 0.104 \pm 0.004 \text{ M}$$

Nota: Dado que el procedimiento de cálculo de la alcalinidad total para todas las muestras analizadas es el mismo, únicamente se da el ejemplo mostrado anteriormente. Finalmente se promediaron los valores de alcalinidad total para las muestras tomadas de cada solución, para dar un valor final.

- 10) Determinación del consumo de solución patrón de ácido clorhídrico 0.520 ± 0.004 M para la determinación de la concentración de hidróxido de sodio de la Muestra 1 de la Solución 1 correspondiente a la Granja La Flor.

$$\text{Consumo} = (0.70 \pm 0.05 - 0.00 \pm 0.05)\text{mL} = 0.70 \pm 0.07\text{mL}$$

- 11) Determinación de la cantidad de moles de hidróxido de sodio en la Muestra 1 de la Solución 1 correspondiente a la Granja La Flor, para una alícuota de 10.00 ± 0.05 mL de muestra.

$$\text{Moles NaOH} = 0.70 \pm 0.07\text{mL sol HCl} \left(\frac{0.520 \pm 0.004 \text{ mol HCl}}{1000\text{mL sol HCl}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol HCl}} \right)$$

$$\text{Moles NaOH} = 0.00036 \pm 0.00004 \text{ mol NaOH}$$

- 12) Determinación de la concentración de hidróxido de sodio en la Muestra 1 de la Solución 1 correspondiente a la Granja La Flor.

$$c = \frac{0.00036 \pm 0.00004 \text{ mol NaOH}}{10.00 \pm 0.05\text{mL} \left(\frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \right)} = 0.036 \pm 0.004\text{M}$$

Nota: Dado que el procedimiento de cálculo de la concentración de hidróxido de sodio para todas las muestras analizadas es el mismo, únicamente se da el ejemplo mostrado anteriormente. Finalmente se promediaron los valores de concentración de hidróxido de sodio para las muestras tomadas de cada solución, para dar un valor final.

- 13) Determinación de la concentración de hidróxido de sodio en la Solución 1, correspondiente a la Granja La Flor, corrigiendo la concentración determinada por titulación debido a los volúmenes de adición de solución de cloruro de bario (2.50 ± 0.05 mL) y de agua de lavado del proceso de filtrado (50.00 ± 0.05 mL), para una muestra inicial de 100.00 ± 0.05 mL.

$$c_{\text{corregida}} = 0.037 \pm 0.002M \left(\frac{152.50 \pm 0.05\text{mL}}{100.00 \pm 0.05\text{mL}} \right) = 0.0569 \pm 0.0023M$$

- 14) Determinación de la reducción en la concentración de la Solución 1, correspondiente a la Granja La Flor, después del proceso de burbujeo de un volumen conocido de biogás.

$$\text{Reducción}_{\text{conc}} = (0.107 \pm 0.001 - 0.0569 \pm 0.0023)M = 0.069 \pm 0.002M$$

- 15) Determinación de lo moles de dióxido de carbono reaccionados después del burbujeo de biogás, para una volumen de solución de 500.0 ± 0.5 mL, para la Solución 1, correspondiente a la Granja La Flor.

$$\text{Moles de } CO_2 \text{ Reaccionados} = 500.0 \pm 0.5\text{mL} \left(\frac{0.069 \pm 0.002\text{mol NaOH}}{1000\text{mL}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol } CO_2}{2 \text{ mol NaOH}} \right)$$

$$\text{Moles de } CO_2 \text{ Reaccionados} = 0.0174 \pm 0.0004 \text{ mol}$$

- 16) Determinación de la velocidad lineal de salida del biogás en la granja La Flor, en unidades del sistema internacional.

$$v = 210.0 \pm \frac{2.5\text{pie}}{\text{min} \left(\frac{1\text{m}}{3.281\text{pie}} \right) \left(\frac{1\text{min}}{60\text{s}} \right)} = 1.067 \pm 0.013\text{m/s}$$

- 17) Determinación del flujo volumétrico de biogás en el proceso de burbujeo de la granja La Flor.

$$\dot{V} = \frac{1}{4} \pi \phi^2 v$$

Donde ϕ es el diámetro de la manguera de salida de biogás y v es la velocidad lineal de flujo de biogás.

$$\dot{V} = \frac{1}{4}\pi(0.0150 \pm 0.0005m)^2 \left(1.067 \pm 0.013 \frac{m}{s}\right) = 0.0001885 \pm 0.0000092 m^3/s$$

18) Determinación del flujo molar de biogás en el proceso de burbujeo de la granja La Flor.

$$\dot{n} = \frac{P\dot{V}}{RT}$$

Donde \dot{n} es el flujo molar de gas, P es la presión, \dot{V} es el flujo volumétrico del gas, T es la temperatura absoluta del gas y R es la constante de los gases (8.314 J/K·mol)

$$\dot{n} = \frac{(87,997.1Pa)(0.0001885 \pm 0.0000092 \frac{m^3}{s})}{\left(\frac{8.314J}{K \cdot mol}\right) (26.0 \pm 0.1 + 273.15)} = 0.006670 \pm 0.000325 mol/s$$

19) Determinación de los moles de biogás burbujeados en la Solución 1 de la granja La Flor.

$$n = \left(0.006670 \pm 0.000325 \frac{mol}{s}\right) (7.00 \pm 0.01 s) = 0.04649 \pm 0.00228 mol$$

20) Determinación de la concentración de dióxido de carbono para la Solución 1 en la Granja La Flor.

$$\%CO_2 = \frac{0.0174 \pm 0.0004 mol CO_2}{0.04649 \pm 0.00228 mol totales} \times 100 = 37.17 \pm 2.05\%$$

21) Determinación de la concentración de metano para la Solución 1 en la Granja La Flor.

$$\%CH_4 = 100\% - \%CO_2 = 100\% - 37.17 \pm 2.05\% = 62.83 \pm 2.05\%$$

Nota: El cálculo del porcentaje de metano y dióxido de carbono para cada una de las soluciones patrón de hidróxido de sodio en cada una de las granjas sigue el mismo procedimiento, por lo cual solamente se dejan

los ejemplos mostrados anteriormente. Para el resultado final, se promedió el valor de las 3 soluciones patrón para cada granja.

Aunque la cuantía de otros gases producidos en el proceso de biodigestión es prácticamente despreciable, se tomó la cantidad máxima de sulfuro de hidrógeno que se pudiera producir, debido a su importancia en términos ambientales. Por ello se toma en cuenta un 1% de H₂S y se corrigen los valores promedio de metano y dióxido de carbono para cada granja, de la siguiente manera:

22) Corrección del porcentaje de metano en el biogás para la Granja La Flor.

$$\%CH_{4,corr} = \frac{63.26 \pm 0.73\%}{63.26 \pm 0.73\% + 36.74 \pm 0.73\% + 1\%} \times 100 = 62.63 \pm 0.73\%$$

23) Corrección del porcentaje de dióxido de carbono en el biogás para la Granja La Flor.

$$\%CO_{2,corr} = 100\% - 62.63 \pm 0.73\% - 1\% = 36.37 \pm 0.73\%$$

3. Datos calculados intermedios.

Cuadro 30: Moles de ftalato ácido de potasio y volumen de solución patrón de hidróxido de sodio utilizados para la valoración de las mismas.

Solución/Muestra	Moles de ftalato ácido de potasio (mol)	Volumen de solución patrón de hidróxido de sodio consumido (mL)
Solución 1		
Muestra 1	0.0004960 ± 0.0000005	4.60 ± 0.07
Muestra 2	0.0004985 ± 0.0000005	4.70 ± 0.07
Muestra 3	0.0005151 ± 0.0000005	4.85 ± 0.07
Solución 2		
Muestra 1	0.0005875 ± 0.0000005	5.50 ± 0.07
Muestra 2	0.0005283 ± 0.0000005	5.00 ± 0.07
Muestra 3	0.0006555 ± 0.0000005	6.20 ± 0.07
Solución 3		
Muestra 1	0.0005063 ± 0.0000005	4.60 ± 0.07
Muestra 2	0.0005043 ± 0.0000005	4.60 ± 0.07
Muestra 3	0.0005909 ± 0.0000005	5.60 ± 0.07

Cuadro 31: Concentración de las soluciones estándar de hidróxido de sodio preparadas para el análisis del biogás.

Solución/Muestra	Concentración de hidróxido de sodio de cada muestra analizada (M)	Concentración promedio de hidróxido de sodio para cada solución (M)
Solución 1		0.107 ± 0.001
Muestra 1	0.108 ± 0.002	
Muestra 2	0.106 ± 0.002	
Muestra 3	0.106 ± 0.002	
Solución 2		0.106 ± 0.001
Muestra 1	0.107 ± 0.001	
Muestra 2	0.106 ± 0.001	
Muestra 3	0.106 ± 0.001	
Solución 3		0.108 ± 0.003
Muestra 1	0.110 ± 0.002	
Muestra 2	0.110 ± 0.002	
Muestra 3	0.106 ± 0.001	

Cuadro 32: Concentración de soluciones auxiliares para el análisis de biogás.

Solución auxiliar	Concentración
Indicador de naranja de metilo	0.1030 ± 0.0001% (p/v)
Solución de cloruro de bario	10.000 ± 0.004% (p/v)

Cuadro 33: Moles de carbonato de sodio y su equivalente reaccionado de ácido clorhídrico y volumen de solución patrón de ácido clorhídrico utilizados para la valoración de las mismas.

Muestra	Moles de carbonato de sodio (mol)	Moles de ácido clorhídrico reaccionados (mol)	Volumen de solución patrón de ácido clorhídrico consumido (mL)
Muestra 1	0.002530 ± 0.000049	0.00506 ± 0.00010	9.65 ± 0.07
Muestra 2	0.002555 ± 0.000049	0.00511 ± 0.00010	9.85 ± 0.07
Muestra 3	0.002510 ± 0.000049	0.00502 ± 0.00010	9.70 ± 0.07

Cuadro 34: Concentración de cada muestra de solución patrón de ácido clorhídrico analizada y concentración promedio de la solución global de ácido clorhídrico.

Muestra	Concentración de ácido clorhídrico (M)	Concentración promedio de ácido clorhídrico en la solución (M)
Muestra 1	0.524 ± 0.011	0.520 ± 0.004
Muestra 2	0.519 ± 0.011	
Muestra 3	0.518 ± 0.011	

Cuadro 35: Consumo de solución patrón de ácido clorhídrico 0.520 ± 0.004 M, para la determinación de la alcalinidad total de las muestras analizadas, para ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Volumen consumido de solución de ácido clorhídrico (mL)	Volumen consumido de solución de ácido clorhídrico (mL)
Solución 1		
Muestra 1	2.00 ± 0.07	2.00 ± 0.07
Muestra 2	2.10 ± 0.07	2.10 ± 0.07
Muestra 3	2.10 ± 0.07	2.10 ± 0.07
Solución 2		
Muestra 1	2.10 ± 0.07	2.10 ± 0.07
Muestra 2	2.10 ± 0.07	2.10 ± 0.07
Muestra 3	2.10 ± 0.07	2.10 ± 0.07
Solución 3		
Muestra 1	2.15 ± 0.07	2.10 ± 0.07
Muestra 2	2.20 ± 0.07	2.10 ± 0.07
Muestra 3	2.05 ± 0.07	2.15 ± 0.07

Cuadro 36: Moles alcalinos (base) totales en las muestras analizadas para ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Moles totales alcalinos (mol)	Moles totales alcalinos (mol)
Solución 1		
Muestra 1	0.00104 ± 0.00004	0.00104 ± 0.00004
Muestra 2	0.00109 ± 0.00004	0.00109 ± 0.00004
Muestra 3	0.00109 ± 0.00004	0.00109 ± 0.00004
Solución 2		
Muestra 1	0.00109 ± 0.00004	0.00109 ± 0.00004
Muestra 2	0.00109 ± 0.00004	0.00109 ± 0.00004
Muestra 3	0.00109 ± 0.00004	0.00109 ± 0.00004
Solución 3		
Muestra 1	0.00112 ± 0.00004	0.00109 ± 0.00004
Muestra 2	0.00114 ± 0.00004	0.00109 ± 0.00004
Muestra 3	0.00107 ± 0.00004	0.00112 ± 0.00004

Cuadro 37: Alcalinidad total en las muestras analizadas para ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Alcalinidad total (M)	Alcalinidad total (M)
Solución 1		
Muestra 1	0.104 ± 0.004	0.104 ± 0.004
Muestra 2	0.109 ± 0.004	0.109 ± 0.004
Muestra 3	0.109 ± 0.004	0.109 ± 0.004
Solución 2		
Muestra 1	0.109 ± 0.004	0.109 ± 0.004
Muestra 2	0.109 ± 0.004	0.109 ± 0.004
Muestra 3	0.109 ± 0.004	0.109 ± 0.004
Solución 3		
Muestra 1	0.112 ± 0.004	0.109 ± 0.004
Muestra 2	0.114 ± 0.004	0.109 ± 0.004
Muestra 3	0.107 ± 0.004	0.112 ± 0.004

Cuadro 38: Alcalinidad total promedio para cada solución de muestra, en ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Alcalinidad total promedio (M)	Alcalinidad total promedio (M)
Solución 1	0.108 ± 0.003	0.108 ± 0.003
Solución 2	0.109 ± 0.007	0.108 ± 0.003
Solución 3	0.111 ± 0.004	0.110 ± 0.002

Cuadro 39: Consumo de solución patrón de ácido clorhídrico 0.520 ± 0.004 M, para la determinación de la concentración de hidróxido de sodio de las muestras analizadas, para ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Volumen consumido de solución de ácido clorhídrico (mL)	Volumen consumido de solución de ácido clorhídrico (mL)
Solución 1		
Muestra 1	0.70 ± 0.07	0.75 ± 0.07
Muestra 2	0.70 ± 0.07	0.80 ± 0.07
Muestra 3	0.75 ± 0.07	0.80 ± 0.07
Solución 2		
Muestra 1	0.75 ± 0.07	0.80 ± 0.07
Muestra 2	0.80 ± 0.07	0.80 ± 0.07
Muestra 3	0.70 ± 0.07	0.80 ± 0.07
Solución 3		
Muestra 1	0.75 ± 0.07	0.85 ± 0.07
Muestra 2	0.80 ± 0.07	0.85 ± 0.07
Muestra 3	0.70 ± 0.07	0.85 ± 0.07

Cuadro 40: Moles de hidróxido de sodio en las muestras analizadas para ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Moles de hidróxido de sodio (mol)	Moles de hidróxido de sodio (mol)
Solución 1		
Muestra 1	0.00036 ± 0.00004	0.00039 ± 0.00004
Muestra 2	0.00036 ± 0.00004	0.00042 ± 0.00004
Muestra 3	0.00039 ± 0.00004	0.00042 ± 0.00004
Solución 2		
Muestra 1	0.00039 ± 0.00004	0.00042 ± 0.00004
Muestra 2	0.00042 ± 0.00004	0.00042 ± 0.00004
Muestra 3	0.00036 ± 0.00004	0.00042 ± 0.00004
Solución 3		
Muestra 1	0.00039 ± 0.00004	0.00044 ± 0.00004
Muestra 2	0.00042 ± 0.00004	0.00044 ± 0.00004
Muestra 3	0.00036 ± 0.00004	0.00044 ± 0.00004

Cuadro 41: Concentración de hidróxido de sodio en las muestras analizadas para ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Concentración de hidróxido de sodio (M)	Concentración de hidróxido de sodio (M)
Solución 1		
Muestra 1	0.036 ± 0.004	0.039 ± 0.004
Muestra 2	0.036 ± 0.004	0.042 ± 0.004
Muestra 3	0.039 ± 0.004	0.042 ± 0.004
Solución 2		
Muestra 1	0.039 ± 0.004	0.042 ± 0.004
Muestra 2	0.042 ± 0.004	0.042 ± 0.004
Muestra 3	0.036 ± 0.004	0.042 ± 0.004
Solución 3		
Muestra 1	0.039 ± 0.004	0.044 ± 0.004
Muestra 2	0.042 ± 0.004	0.044 ± 0.004
Muestra 3	0.036 ± 0.004	0.044 ± 0.004

Cuadro 42: Concentración promedio de hidróxido de sodio para cada solución de muestra, en ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Concentración promedio de hidróxido de sodio (M)	Concentración promedio de hidróxido de sodio (M)
Solución 1	0.037 ± 0.002	0.041 ± 0.002
Solución 2	0.039 ± 0.006	0.042 ± 0.006
Solución 3	0.039 ± 0.003	0.044 ± 0.006

Cuadro 43: Concentración de hidróxido de sodio remanente en las muestras tomadas en ambas granjas, corregidas por las diluciones del tratamiento por el método de Winkler

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Concentración promedio de hidróxido de sodio corregida (M)	Concentración promedio de hidróxido de sodio corregida (M)
Solución 1	0.0569 ± 0.0023	0.0621 ± 0.0023
Solución 2	0.0595 ± 0.0098	0.0635 ± 0.0098
Solución 3	0.0595 ± 0.0040	0.0674 ± 0.0098

Cuadro 44: Reducción en la concentración de hidróxido de sodio de las soluciones de muestra, después del burbujeo de biogás, en ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Reducción en la concentración promedio de hidróxido de sodio (M NaOH)	Reducción en la concentración promedio de hidróxido de sodio (M NaOH)
Solución 1	0.069 ± 0.002	0.066 ± 0.002
Solución 2	0.067 ± 0.006	0.064 ± 0.006
Solución 3	0.069 ± 0.004	0.064 ± 0.007

Cuadro 45: Moles de hidróxido de sodio reaccionados después del burbujeo de biogás en las soluciones de muestra.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Moles de hidróxido de sodio reaccionados (mol)	Moles de hidróxido de sodio reaccionados (mol)
Solución 1	0.069 ± 0.002	0.066 ± 0.002
Solución 2	0.067 ± 0.006	0.064 ± 0.006
Solución 3	0.069 ± 0.004	0.064 ± 0.007

Cuadro 46: Moles de dióxido de carbono reaccionados después del burbujeo de biogás en las soluciones de muestra.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Moles de dióxido de carbono reaccionados (mol)	Moles de dióxido de carbono reaccionados (mol)
Solución 1	0.0174 ± 0.0004	0.0165 ± 0.0004
Solución 2	0.0168 ± 0.0016	0.0161 ± 0.0016
Solución 3	0.0173 ± 0.0009	0.0160 ± 0.0017

Cuadro 47: Características de flujo de biogás para ambas granjas, en las pruebas de burbujeo del mismo en soluciones de muestra de hidróxido de sodio.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Velocidad lineal de flujo de biogás (m/s)	1.067 ± 0.013	1.422 ± 0.013
Flujo volumétrico de biogás (m ³ /s)	0.0001885 ± 0.0000092	0.0001609 ± 0.0000096
Flujo molar de biogás (mol/s)	0.006670 ± 0.000325	0.005584 ± 0.000334
Moles de biogás burbujeados (mol)	0.04669 ± 0.00228	0.03909 ± 0.00234

Cuadro 48: Concentración de dióxido de carbono en el biogás, para cada solución de muestra analizada.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Concentración de dióxido de carbono en biogás (%mol)	Concentración de dióxido de carbono en biogás (%mol)
Solución 1	37.17 ± 2.05	42.18 ± 2.77
Solución 2	35.90 ± 3.86	41.22 ± 4.80
Solución 3	37.16 ± 2.65	41.05 ± 5.04

Cuadro 49: Concentración de metano en el biogás, para cada solución de muestra analizada, considerando únicamente biogás formado por metano y dióxido de carbono.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
	Concentración de metano en biogás (%mol)	Concentración de metano en biogás (%mol)
Solución 1	62.83 ± 2.05	57.82 ± 2.77
Solución 2	64.10 ± 3.86	58.78 ± 4.80
Solución 3	62.84 ± 2.65	58.95 ± 5.04

Cuadro 50: Concentración promedio de dióxido de carbono y metano en el biogás, considerando biogás conformado únicamente por dichos dos componentes, para ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Concentración promedio de dióxido de carbono en biogás (% mol)	36.74 ± 0.73	41.48 ± 0.61
Concentración promedio de metano en biogás (% mol)	63.26 ± 0.73	58.52 ± 0.61

E. Cálculos para realizar el balance de masa de cada digestor.

1. Datos originales.

Cuadro 51: Datos de medición de carga en los digestores de ambas granjas

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Área superficial neta del tanque de captación (m ²)	28.00 ± 0.02	16.42 ± 0.02
Disminución del nivel del tanque de captación por carga (m)	0.1000 ± 0.0005	0.1778 ± 0.0005
Sólidos totales en la entrada (mg/L)	15,749.33 ± 8,088.12	21,383.33 ± 9,337.66
Sólidos totales en la salida (mg/L)	9,284.00 ± 527.00	8,320.00 ± 1,504.72

Cuadro 52: Velocidades de flujo lineal medidas para la producción de biogás, en ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Velocidad lineal de salida del biogás (m/s)	5.00 ± 0.01	4.06 ± 0.01
Diámetro de salida del ducto (m)	0.0150 ± 0.0005	0.0130 ± 0.0005

Cuadro 53: Datos para la determinación de la presión interna del digestor.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Velocidad lineal de salida del biogás (m/s)	5.00 ± 0.01	4.06 ± 0.01
Diámetro de salida del ducto (m)	0.0150 ± 0.0005	0.0130 ± 0.0005

2. **Cálculos.** A continuación se muestran los cálculos para la determinación del balance de masa para el digestor anaerobio de la Granja La Flor. Ya que el procedimiento es igual para la Granja Agua Blanca, solamente se presenta el primer ejemplo.

- 1) Determinación del volumen de carga de materiales al digestor anaerobio de la Granja La Flor.

$$V = A \times h$$

Donde V es el volumen de carga, A es el área superficial del tanque de captación y h es la disminución en el nivel del tanque después de realizada la carga.

$$V = (28.00 \pm 0.02 \text{ m}^2)(0.1000 \pm 0.0005 \text{ m}) = 2.80 \pm 0.01 \text{ m}^3$$

- 2) Determinación de la cantidad de sólidos totales en la carga, en términos de masa, para el digestor anaerobio de la Granja La Flor.

$$m_{sólidos} = 2.80 \pm 0.01 \text{ m}^3 \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) \left(\frac{15,749.33 \pm 8,088.12 \text{ mg sólidos}}{1 \text{ L}} \right) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right)$$

$$m_{sólidos} = 44.10 \pm 22.65 \text{ kg}$$

- 3) Determinación de la masa total de la carga promedio, para el digestor anaeróbico de la Granja La Flor (tomando una densidad aparente igual a la del agua a 20°C, con un valor de 998.204 kg/m³).

$$m_{carga} = 2.80 \pm 0.01 \text{ m}^3 \left(\frac{998.204 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} \right) = 2,794.97 \pm 14.12 \text{ kg}$$

- 4) Determinación de la masa de agua en la carga promedio, para el digestor anaerobio de la Granja La Flor.

$$m_{agua} = m_{carga} - m_{sólidos} = 2,794.97 \pm 14.12 \text{ kg} - 44.10 \pm 22.65 \text{ kg} = 2,750.87 \pm 26.69 \text{ kg}$$

- 5) Determinación del porcentaje másico de sólidos en la salida del digestor de la Granja La Flor.

$$\% \left(\frac{p}{p} \right) = 9.284.00 \pm 527.00 \frac{\text{mg sólidos}}{\text{L muestra}} \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{997.296 \text{ kg}} \right) \times 100$$

$$\% \left(\frac{p}{p} \right) = 0.9309 \pm 0.0528\%$$

- 6) Determinación del porcentaje másico de sólidos (ausentes de soluto) en la salida del digestor en la Granja La Flor.

$$\% \left(\frac{p}{p} \right)_{\text{sin soluto}} = \frac{x}{1 - x}$$

Donde x es el porcentaje másico de sólidos incluyendo tanto al solvente como el soluto.

$$\% \left(\frac{p}{p} \right)_{\text{sin soluto}} = \frac{0.9309 \pm 0.0528\%}{1 - 0.9309 \pm 0.0528\%} = 0.9397 \pm 0.0533\%$$

- 7) Determinación de la masa de sólidos en la salida del digestor anaeróbico en la Granja La Flor.

$$m_{\text{sólidos}} = 2,750.87 \pm 26.69 \text{ kg agua} \left(\frac{0.9397 \pm 0.0533 \text{ kg sólidos}}{100 \text{ kg agua}} \right) = 25.85 \pm 0.09 \text{ kg sólidos}$$

- 8) Determinación de la masa de descarga (efluente) del digestor anaerobio en la Granja La Flor.

$$m_{\text{efluente}} = 2,750.87 \pm 26.69 \text{ kg agua} + 25.85 \pm 0.09 \text{ kg} = 2,776.72 \pm 26.69 \text{ kg}$$

- 9) Determinación de la conversión (en términos máxicos) de sólidos después de su paso por el digestor anaerobio de la Granja La Flor.

$$X_A = \frac{m_o - m}{m_o}$$

Donde X_A es la conversión máxica porcentual de sólidos, m_o es la masa de sólidos en la entrada y m es la masa de sólidos en la salida.

$$X_A = \frac{(44.10 \pm 22.65 - 25.85 \pm 0.09) \text{ kg}}{44.10 \pm 22.65 \text{ kg}} = 0.4138 \pm 0.2125$$

- 10) Determinación del flujo de producción de biogás para la Granja La Flor.

$$\dot{V} = \frac{1}{4} \pi \phi^2 v$$

Donde ϕ es el diámetro de la manguera de salida de biogás y v es la velocidad lineal de flujo de biogás.

$$\dot{V} = \frac{1}{4}\pi(0.0150 \pm 0.0005m)^2 \left(5.00 \pm 0.01 \frac{m}{s}\right) = 0.000884 \pm 0.000042 m^3/s$$

11) Determinación de la producción de biogás por día, para la granja La Flor.

$$1 \text{ día} \left(\frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}}\right) \left(\frac{3,600 \text{ s}}{1 \text{ hora}}\right) \left(\frac{0.000884 \pm 0.000042 m^3}{1 s}\right) = 76.34 \pm 3.60 m^3$$

12) Determinación de los moles de metano producidos en 24 horas en el digestor anaerobio de la Granja La Flor.

$$n_{CO_2} = \frac{\%CH_4 \times P \times \dot{V}}{RT}$$

Donde n son los moles formados, %CH₄ es la concentración porcentual de metano, P es la presión a la cual se encuentran el gas, V es el volumen de biogás producido, R es la constante de los gases ideales (8,314 J/K·mol) y T es la temperatura absoluta a la cual se encuentran los gases.

$$n_{CH_4} = \frac{(0.6263 \pm 0.0073)(87,997.1Pa)(76.34 \pm 3.60 m^3)}{\left(8.314 \frac{J}{K \cdot mol}\right) (23.5 \pm 0.1 + 273.15)} = 1,705.91 \pm 83.23mol$$

13) Determinación de los moles de dióxido de carbono producidos en 24 horas en el digestor anaerobio de la Granja La Flor.

$$n_{CO_2} = \frac{\%CO_2 \times P \times \dot{V}}{RT}$$

Donde n son los moles formados, %CO₂ es la concentración porcentual de dióxido de carbono, P es la presión a la cual se encuentran el gas, V es el volumen de biogás producido, R es la constante de los gases ideales (8,314 J/K·mol) y T es la temperatura absoluta a la cual se encuentran los gases.

$$n_{CO_2} = \frac{(0.3637 \pm 0.0073)(87,997.1Pa)(76.34 \pm 3.60 m^3)}{\left(8.314 \frac{J}{K \cdot mol}\right) (23.5 \pm 0.1 + 273.15)} = 990.62 \pm 50.97mol$$

- 14) Determinación de los moles de hidrógeno producidos en 24 horas en el digestor anaerobio de la Granja La Flor.

$$n_{H_2S} = \frac{\%H_2S \times P \times \dot{V}}{RT}$$

Donde n son los moles formados, %H₂S es la concentración porcentual de sulfuro de hidrógeno, P es la presión a la cual se encuentran el gas, V es el volumen de biogás producido, R es la constante de los gases ideales (8,314 J/K·mol) y T es la temperatura absoluta a la cual se encuentran los gases.

$$n_{H_2} = \frac{(0.0100)(87,997.1Pa)(76.34 \pm 3.60 m^3)}{\left(8.314 \frac{J}{K \cdot mol}\right)(23.5 \pm 0.1 + 273.15)} = 27.24 \pm 1.29 mol$$

- 15) Determinación de la masa de metano producida por día en el digestor de la Granja La Flor.

$$m_{CH_4} = 1,705.91 \pm 83.23 mol CH_4 \left(\frac{16.0426 g}{1 mol CH_4}\right) \left(\frac{1 kg}{1000 g}\right) = 27.37 \pm 1.34 kg$$

- 16) Determinación de la masa de dióxido de carbono producida por día en el digestor de la granja La Flor.

$$m_{CO_2} = 990.62 \pm 50.97 mol CO_2 \left(\frac{44.009 g}{1 mol CO_2}\right) \left(\frac{1 kg}{1000 g}\right) = 43.60 \pm 2.24 kg$$

- 17) Determinación de la masa de sulfuro de hidrógeno producida por día en el digestor de la granja La Flor.

$$m_{H_2S} = 27.24 \pm 1.29 mol H_2S \left(\frac{34.0818 g}{1 mol H_2S}\right) \left(\frac{1 kg}{1000 g}\right) = 0.93 \pm 0.04 kg$$

- 18) Determinación de la presión absoluta interna del digestor de la granja La Flor.

$$P = P_{atm} + \rho gh$$

Donde P es la presión total interna del reactor, Patm es la presión barométrica del lugar, ρ es la densidad del agua (998 kg/m^3), g es la constante de aceleración por la gravedad (9.81 m/s^2) y h es el cambio de altura en la columna de agua de un medidor de presión diferencial.

$$P = 87,997.1 \text{ Pa} + \left(998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.570 \pm 0.005\text{m}) = 93,577.62 \pm 917.43 \text{ Pa}$$

- 19) Determinación del volumen ocupado por la fase líquida para el volumen efectivo de reacción, para el digestor anaerobio de la Granja La Flor.

$$V = V_{\text{reacción efectiva}} - V_{\text{gases, corregidos}}$$

$$V = 128.085 \text{ m}^3 - 76.34 \pm 3.60 \text{ m}^3 \left(\frac{87,991.1 \text{ Pa}}{93,577.62 \pm 917.43 \text{ Pa}} \right) = 56.30 \pm 3.60 \text{ m}^3$$

- 20) Determinación del volumen ocupado por la fase líquida para el volumen total del reactor, para el digestor anaerobio de la Granja La Flor.

$$V = V_{\text{total}} - V_{\text{gases, corregidos}}$$

$$V = 148.885 \text{ m}^3 - 76.34 \pm 3.60 \text{ m}^3 \left(\frac{87,991.1 \text{ Pa}}{93,577.62 \pm 917.43 \text{ Pa}} \right) = 77.10 \pm 3.60 \text{ m}^3$$

- 21) Determinación del tiempo de retención del digestor, tomando como base el volumen efectivo de reacción, para el digestor de la Granja La Flor.

$$t = \frac{V_{\text{efectivo reacción}}}{V_{\text{carga diaria}}}$$

$$t = \frac{56.30 \pm 3.60 \text{ m}^3}{2.80 \pm 0.01 \text{ m}^3/\text{día}} = 20.11 \pm 1.29 \text{ días}$$

- 22) Determinación del tiempo de retención del digestor, tomando como base el volumen total del digestor, para el digestor de la Granja La Flor.

$$t = \frac{V_{total}}{V_{carga\ diaria}}$$

$$t = \frac{77.10 \pm 3.60\ m^3}{2.80 \pm 0.01\ m^3/día} = 27.53 \pm 1.29\ días$$

- 23) Cálculo de la productividad del digestor, para la Granja La Flor, en términos de volumen de biogás producido por volumen del digestor por 24 horas.

$$Productividad = \frac{V_{biogás\ producido\ cada\ 24\ horas}}{V_{reactor,\ total}}$$

$$Productividad = \frac{76.34 \pm 3.60\ \frac{m^3}{24\ horas}}{148.885\ m^3} = 0.5127 \pm 0.0667$$

3. Datos calculados intermedios.

Cuadro 54: Volúmenes de carga de ambos digestores anaerobios.

Granja La Flor	Granja Agua Blanca
2.80 ± 0.01 m ³ /día	2.92 ± 0.01 m ³ /día

Cuadro 55: Porcentajes máscicos de sólidos en la corriente efluente para ambos digestores

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Porcentaje máscico de sólidos (kg sólidos/kg efluente)	0.9309 ± 0.0528%	0.8343 ± 0.1509%
Porcentaje máscico de sólidos libre de soluto (kg sólidos/kg agua)	0.9397 ± 0.0533%	0.8413 ± 0.1521%

Cuadro 56: Flujo volumétrico de producción de biogás para ambos digestores anaerobios y flujos molares de cada componente.

Flujo	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Flujo volumétrico de biogás (m ³ /s)	0.000884 ± 0.000042	0.000539 ± 0.000029
Flujo molar de metano (mol/día)	1,705.91 ± 83.23	928.96 ± 52.15
Flujo molar de dióxido de carbono (mol/día)	990.62 ± 50.97	658.43 ± 37.87
Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/día)	27.24 ± 1.29	16.03 ± 0.88

F. Cálculos para realizar el balance de energía de cada digestor.

1. Datos originales.

Cuadro 57: Temperaturas de entrada y salida de las especies del biodigestor, para ambas granjas

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Temperatura de entrada de la carga (°C)	20.0 ± 0.1	23.0 ± 0.1
Temperatura de salida de los productos, tanto gaseosos como líquidos (°C)	17.0 ± 0.1	20.5 ± 0.1

Cuadro 58: Parámetros para el cálculo de Cp/R para cada una de las especies que salen del digestor.

Especie	A	B (K ⁻¹)	C (K ⁻²)	D (K ²)
Agua	8.712	0.001250	-0.000000180	0
Metano	1.702	0.009081	-0.000002164	0
Dióxido de Carbono	5.457	0.001045	0	-115700
Sulfuro de Hidrógeno	3.931	0.001490	0	-23200

2. **Cálculos.** A continuación se presenta la secuencia de cálculos para la determinación del calor de reacción de cada digestor, para lo cual se toma como ejemplo del digestor anaerobio de la Granja La Flor.

- 1) Determinación moles del agua de entrada y salida del digestor de la Granja La Flor, para un período de 24 horas.

$$n_{agua} = (2,750.87 \pm 26.69 \text{ kg}) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{18.0148 \text{ g}} \right) = 152.74 \pm 1.48 \text{ mol}$$

Nota: La determinación de los moles de los gases producidos fue expuesta en el Apéndice E.

- 2) Determinación del parámetro A para el cálculo de Cp/R global de los productos, tomando en cuenta el flujo molar de cada componente y su respectivo parámetro A.

$$A_{global} = \sum n_i A_i$$

Donde n_i representa los moles de cada uno de las especies salientes del digestor y A_i representa el primer coeficiente para la determinación del Cp/R de cada una de las especies salientes del digestor.

$$A_{global} = (152.74 \pm 1.48 \text{ mol agua})(8.712) + (1,705.91 \pm 83.23 \text{ mol } CH_4)(1.702) \\ + (990.62 \pm 50.97 \text{ mol } CO_2)(5.457) + (27.24 \pm 1.29 \text{ mol } H_2S)(3.931)$$

$$A_{global} = 9,747.04 \pm 697.54$$

- 3) Determinación del parámetro B para el cálculo de Cp/R global de los productos, tomando en cuenta el flujo molar de cada componente y su respectivo parámetro B.

$$B_{global} = \sum n_i B_i$$

Donde n_i representa los moles de cada uno de las especies salientes del digestor y B_i representa el segundo coeficiente para la determinación del Cp/R de cada una de las especies salientes del digestor.

$$B_{global} = (152.74 \pm 1.48 \text{ mol agua})(0.001250) + (1,705.91 \pm 83.23 \text{ mol } CH_4)(0.009081) \\ + (990.62 \pm 50.97 \text{ mol } CO_2)(0.001045) + (27.24 \pm 1.29 \text{ mol } H_2S)(0.001490)$$

$$B_{global} = 16.76 \pm 1.20$$

- 4) Determinación del parámetro C para el cálculo de Cp/R global de los productos, tomando en cuenta el flujo molar de cada componente y su respectivo parámetro C.

$$C_{global} = \sum n_i C_i$$

Donde n_i representa los moles de cada uno de las especies salientes del digestor y C_i representa el segundo coeficiente para la determinación del Cp/R de cada una de las especies salientes del digestor.

$$C_{global} = (152.74 \pm 1.48 \text{ mol agua})(-0.000000180) \\ + (1,705.91 \pm 83.23 \text{ mol } CH_4)(-0.000002164) + (990.62 \pm 50.97 \text{ mol } CO_2)(0) \\ + (27.24 \pm 1.29 \text{ mol } H_2S)(0)$$

$$C_{global} = -0.003719 \pm 0.000266$$

- 5) Determinación del parámetro D para el cálculo de Cp/R global de los productos, tomando en cuenta el flujo molar de cada componente y su respectivo parámetro D.

$$D_{global} = \sum n_i D_i$$

Donde n_i representa los moles de cada uno de las especies salientes del digestor y D_i representa el segundo coeficiente para la determinación del Cp/R de cada una de las especies salientes del digestor.

$$D_{global} = (152.74 \pm 1.48 \text{ mol agua})(0) + (1,705.91 \pm 83.23 \text{ mol } CH_4)(0) \\ + (990.62 \pm 50.97 \text{ mol } CO_2)(-115,700) + (27.24 \pm 1.29 \text{ mol } H_2S)(-23,3200)$$

$$D_{global} = -115,246,895.07 \pm 8,247,608.83$$

- 6) Determinación de la relación de temperaturas (final e inicial) para la operación del digestor de la Granja La Flor.

$$\tau = \frac{T}{T_o}$$

Donde τ es la relación de temperaturas, T es la temperatura absoluta final (productos) y T_o es la temperatura absoluta inicial (carga).

$$\tau = \frac{(23.0 \pm 0.1 + 273.15)K}{(20.0 \pm 0.1 + 273.15)K} = 1.0034 \pm 0.0066$$

- 7) Determinación del valor de Cp/R para las especies salientes del digestor de la Granja La Flor, para el rango de temperaturas de operación.

$$\frac{Cp}{R} = A + \frac{B}{2} T_o(\tau + 1) + \frac{C}{3} T_o^2(\tau^2 + \tau + 1) + \frac{D}{\tau T_o^2}$$

Donde A, B, C y D son las constantes globales determinadas anteriormente, τ es la relación de temperaturas y T_0 es la temperatura de los reactivos.

$$\begin{aligned} \frac{Cp}{R} = & (9,747.04 \pm 697.54) + \frac{(16.76 \pm 1.20)}{2} (20.0 \pm 0.1 + 273.15)(1.0034 \pm 0.0066 + 1) \\ & + \frac{(-0.003719 \pm 0.000266)}{3} (20.1 \pm 0.1 + 273.15)^2 ((1.0034 \pm 0.0066)^2 + (1.0034 \\ & \pm 0.0066 + 1) + \frac{(-115,246,895.07 \pm 8,247,608.83)}{(1.0034 \pm 0.0066)(20.0 \pm 0.1 + 273.15)^2} \end{aligned}$$

$$\frac{Cp}{R} = 13,098.97 \pm 1,874.85 \text{ mol}$$

Nota: El término Cp/R es adimensional, pero por haber tomado en cuenta la cantidad de moles en los parámetros A, B, C y D, el valor calculado anteriormente posee unidades de mol.

- 8) Determinación de calor absorbido por los productos (con excepción de la fracción de sólidos), para el cambio de temperatura observado en el digestor de la Granja La Flor

$$Q_1 = R \left(\frac{Cp}{R} \right) \Delta T$$

Donde Q_1 es el calor absorbido, R es la constante de los gases ideales (8.314 J/K·mol) y ΔT es el cambio de temperatura entre la salida y la entrada al digestor.

$$\begin{aligned} Q_1 = & 8.314 \frac{J}{K \cdot mol} (13,098.97 \pm 1,874.85 \text{ mol})(23.0 \pm 0.1 - 20.0 \pm 0.1)K \\ = & 326,714.57 \pm 49,233.45 \text{ J} \end{aligned}$$

- 9) Determinación del calor absorbido por los sólidos contenidos en el efluente, tomando en cuenta un valor promedio de Cp para los mismos, para el digestor de la Granja La Flor.

$$Q_2 = mCp\Delta T$$

Donde Q_2 es el calor absorbido por los sólidos del efluente, m es la masa de sólidos en la descarga y ΔT es el cambio de temperatura entre la salida y la entrada al digestor.

$$Q_2 = (25.85 \pm 0.09 \text{ kg}) \left(32.41 \pm 23.97 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \right) (23.0 \pm 0.1 - 20.0 \pm 0.1) \text{K} = 2,513.41 \pm 1,862.74 \text{ J}$$

Nota: El cálculo del C_p para los sólidos se detalla más en el Apéndice G.

- 10) Determinación del calor total absorbido por todas las especies salientes del digestor, para el rango de temperaturas manejadas.

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 = 326,714.57 \pm 49,233.45 \text{ J} + 2,513.41 \pm 1,862.74 \text{ J} = 329,227.98 \pm 49,268.68 \text{ J}$$

- 11) Determinación del calor de reacción para el sistema de digestión de la Granja La Flor (a 20°C), tomando en cuenta una operación adiabática en la cual todo el calor liberado por la reacción es absorbido por los productos y utilizado para aumentar su temperatura.

$$\Delta H_{R,20^\circ\text{C}} = \frac{-Q_{total}}{m_{sólidos}}$$

Donde $\Delta H_{R,20^\circ\text{C}}$ es el calor de reacción de la digestión anaerobia, Q_{total} es el calor absorbido por las especies salientes del digestor y $m_{sólidos}$ es la masa de sólidos en la carga del digestor.

$$\Delta H_{R,20^\circ\text{C}} = \frac{-329,227.98 \pm 49,268.68 \text{ J}}{44.10 \pm 22.65 \text{ kg}} = 7,465.80 \pm 3,993.73 \text{ J/kg}$$

3. Datos calculados intermedios.

Cuadro 59: Parámetros para la determinación del Cp/R de los productos en ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
τ	1.0034 ± 0.0066	1.0051 ± 0.0077
A (mol)	$9,747.04 \pm 697.54$	$6,616.66 \pm 535.92$
B (mol/K)	16.76 ± 1.20	9.35 ± 0.76
C (mol/K ²)	-0.003719 ± 0.000266	-0.002039 ± 0.000165
D (mol·K ²)	$-115,246,895.07 \pm 8,247,608.83$	$-76,551,871.51 \pm 6,200,353.61$
Cp/R (mol)	$13,098.97 \pm 1,874.85$	$8,320.07 \pm 1,347.78$

Cuadro 60: Calor absorbido por los productos del proceso de digestión par ambas granjas.

	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Calor absorbido por los gases y el agua (J)	$326,714.57 \pm 49,233.45$	$242,105.61 \pm 40,420.55$
Calor absorbido por los sólidos del efluente (J)	$2,513.41 \pm 1,862.74$	$2,721.59 \pm 2,017.91$
Calor total absorbido (J)	$329,227.98 \pm 49,268.68$	$244,817.20 \pm 40,470.89$

G. Determinación del Cp promedio de los sólidos contenidos en el efluente de los digestores.

1. Datos originales.

Cuadro 61: Condiciones experimentales para la determinación del Cp de los sólidos del efluente de los digestores, en el análisis hecho para agua pura destilada.

Condición	Valor
Volumen de agua para análisis comparativo (mL)	100 ± 5
Temperatura Inicial (°C)	24.50 ± 0.05
Temperatura (°C)	33.00 ± 0.05
Tiempo de calentamiento (s)	120.00 ± 0.01

Cuadro 62: Condiciones experimentales para la determinación del Cp de los sólidos del efluente de los digestores, en el análisis hecho para una muestra del efluente.

Condición	Valor
Volumen de agua para análisis comparativo (mL)	100 ± 5
Temperatura Inicial (°C)	25.00 ± 0.05
Temperatura (°C)	33.00 ± 0.05
Tiempo de calentamiento (s)	120.00 ± 0.01

Cuadro 63: Parámetros para el cálculo de Cp/R para el agua.

Especie	A	B (K ⁻¹)	C (K ⁻²)	D (K ²)
Agua	8.712	0.001250	-0.000000180	0

2. Cálculos.

- 1) Determinación de la masa de agua destilada utilizada para la determinación del Cp de los sólidos (tomando una densidad a 24.5°C de 997.172 kg/m³).

$$m_{agua} = 100 \pm 5 \text{ mL} \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \left(\frac{997.172 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} \right) = 0.09972 \pm 0.00499 \text{ kg}$$

- 2) Determinación de la relación de temperaturas para el calentamiento del agua en la determinación del Cp de los sólidos.

$$\tau = \frac{T}{T_o}$$

Donde τ es la relación de temperaturas, T es la temperatura absoluta final y T_o es la temperatura absoluta inicial.

$$\tau = \frac{(33.0 \pm 0.1 + 273.15)K}{(24.5 \pm 0.1 + 273.15)K} = 1.0286 \pm 0.0026$$

- 3) Determinación del valor de Cp/R para el agua destilada utilizada para la determinación del Cp de los sólidos.

$$\frac{Cp}{R} = A + \frac{B}{2}T_o(\tau + 1) + \frac{C}{3}T_o^2(\tau^2 + \tau + 1) + \frac{D}{\tau T_o^2}$$

Donde A, B, C y D son las constantes del agua para la determinación del Cp/R, τ es la relación de temperaturas y T_o es la temperatura inicial del agua.

$$\begin{aligned} \frac{Cp}{R} = & (8.712) + \frac{(0.001250)}{2}(24.50 \pm 0.05 + 273.15)(1.0286 \pm 0.0026 + 1) \\ & + \frac{(-0.000000180)}{3}(24.50 \pm 0.05 + 273.15)^2 ((1.0286 \pm 0.0026)^2 + (1.0286 \\ & \pm 0.0026) + 1) + \frac{(0)}{(1.0286 \pm 0.0026)(24.50 \pm 0.05 + 273.15)^2} \end{aligned}$$

$$\frac{Cp}{R} = 9.0828 \pm 0.0269$$

- 4) Cálculo de los moles de agua destilados utilizados en la primera parte de la determinación del Cp de los sólidos del efluente de los digestores.

$$n_{agua} = 0.09972 \pm 0.00499 \text{ kg} \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{18.0148 \text{ g}} \right) = 0.005537 \pm 0.000277 \text{ mol}$$

- 5) Determinación del calor absorbido por el volumen de 100 ± 5 mL de agua destilada en la determinación del Cp de los sólidos del efluente del digestor.

$$Q_{agua} = nR \left(\frac{Cp}{R} \right) \Delta T$$

Donde Q_{agua} es el calor absorbido por el agua, n es la cantidad de moles de agua utilizados en dicho calentamiento, R es la constante de los gases ($8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$) y ΔT es el cambio de temperatura durante el calentamiento.

$$Q_{\text{agua}} = (0.005537 \pm 0.000277 \text{ mol}) \left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{K}\cdot\text{mol}} \right) (9.0828 \pm 0.0269)(33.00 \pm 0.05 - 24.50 \pm 0.05)\text{K}$$

$$Q_{\text{agua}} = 3.554 \pm 0.178 \text{ J}$$

Nota: Posteriormente se realizó el mismo procedimiento con una muestra del efluente del digestor de la Granja La Flor y se realizó el mismo análisis termodinámico de determinación de calor absorbido por el agua, para las temperaturas iniciales y finales ($25.00 \pm 0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ y $33.00 \pm 0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente), para lo cual fue necesario determinar la masa exacta de agua en dicha muestra y posteriormente sus moles como se muestra a continuación.

- 6) Determinación de la masa de sólidos presentes en la muestra, tomando un valor promedio de sólidos de $9,284.00 \pm 527.00 \text{ mg/L}$, según el análisis realizado en el Apéndice B.

$$m_{\text{sólidos}} = 100 \pm 5 \text{ mL} \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{9,284.00 \pm 527.00 \text{ mg}}{1 \text{ L}} \right) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right)$$

$$m_{\text{sólidos}} = 0.0009284 \pm 0.0000118 \text{ kg}$$

- 7) Determinación de la masa total de la muestra, tomando en cuenta una densidad similar a la del agua a 24.5°C .

$$m_{\text{total}} = 100 \pm 5 \text{ mL} \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \left(\frac{997.172 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} \right) = 0.09972 \pm 0.00499 \text{ kg}$$

- 8) Determinación de la masa de agua en la muestra analizada.

$$m_{\text{agua}} = m_{\text{total}} - m_{\text{sólidos}} = 0.09972 \pm 0.00499 \text{ kg} - 0.0009284 \pm 0.0000118 \text{ kg}$$

$$m_{agua} = 0.09879 \pm 0.00499 \text{ kg}$$

9) Determinación de los moles de agua en la muestra de efluente analizada.

$$n_{agua} = 0.09879 \pm 0.00499 \text{ kg} \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{18.0148 \text{ g}} \right) = 0.005485 \pm 0.000277 \text{ mol}$$

Nota: La determinación del Cp/R para el agua se realizó de la misma manera que en el cálculo No. 3 del presente apéndice, tomando como temperatura inicial $25.00 \pm 0.05^\circ\text{C}$ y como temperatura final $33.00 \pm 0.05^\circ\text{C}$, obteniéndose un valor de 9.0825 ± 0.0266 .

10) Determinación del calor absorbido por el agua para la muestra de efluente analizada.

$$Q_{agua} = nR \left(\frac{Cp}{R} \right) \Delta T$$

Donde Q_{agua} es el calor absorbido por el agua, n es la cantidad de moles de agua utilizados en dicho calentamiento, R es la constante de los gases ($8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$) y ΔT es el cambio de temperatura durante el calentamiento.

$$Q_{agua} = (0.005485 \pm 0.000277 \text{ mol}) \left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{K}\cdot\text{mol}} \right) (9.0825 \pm 0.0266)(33.00 \pm 0.05 - 25.00 \pm 0.05)\text{K}$$

$$Q_{agua} = 3.313 \pm 0.167 \text{ J}$$

11) Determinación del calor absorbido debido a los sólidos presentes en la muestra analizada.

$$Q_{sólidos} = Q_{total} - Q_{agua} = 3.554 \pm 0.178 \text{ J} - 3.313 \pm 0.167 \text{ J}$$

$$Q_{sólidos} = 0.241 \pm 0.178 \text{ J}$$

12) Determinación del Cp de los sólidos.

$$Cp = \frac{Q_{sólidos}}{m_{sólidos} \Delta T}$$

Donde $Q_{sólidos}$ es el calor absorbido por los sólidos de la muestra, $m_{sólidos}$ es la masa de sólidos presente en la muestra y ΔT es el cambio de temperatura en la muestra en el tiempo de análisis.

$$Cp = \frac{0.241 \pm 0.178 J}{(0.0009284 \pm 0.0000118 kg)(33.00 \pm 0.05 - 25.00 \pm 0.05)}$$

$$Cp = 32.41 \pm 23.97 \frac{J}{kg \cdot K}$$

H. Cálculos para determinar la eficiencia de los quemadores.

1. Datos originales.

Cuadro 64: Mediciones realizadas para la determinación de la eficiencia de los quemadores utilizados para calefacción de los lechones en los corrales de levante de lechones.

Parámetro	Valor
Velocidad lineal del gas para el análisis con la válvula totalmente abierta (m/s)	5.3 ± 0.1
Velocidad lineal del gas para el análisis con la válvula abierta a la mitad del giro (m/s)	3.0 ± 0.1
Diámetro del ducto de salida del gas (m)	0.0150 ± 0.0005
Temperatura ambiente (°C)	26.0 ± 0.1
Presión atmosférica (Pa)	87997.1
Concentración de dióxido de carbono en biogás (% mol)	$36.37 \pm 0.73\%$
Concentración de metano en biogás (% mol)	$62.63 \pm 0.73\%$
Concentración de sulfuro de hidrógeno (% mol)	1%
Exceso de aire utilizado	5%

Cuadro 65: Mediciones de dióxido de carbono en los gases de combustión para dos diferentes flujos de biogás.

Corrida	Porcentaje de Dióxido de Carbono (% vol)	
	Válvula totalmente abierta	Válvula abierta a ½ de su giro
Corrida 1	11.5 ± 0.5%	8.5 ± 0.5%
Corrida 2	10.0 ± 0.5%	10.5 ± 0.5%
Corrida 3	8.0 ± 0.5%	8.5 ± 0.5%

Cuadro 66: Temperatura de salida de los gases de combustión para dos diferentes flujos de biogás.

Corrida	Temperatura de los gases de combustión (°C)	
	Válvula totalmente abierta	Válvula abierta a ½ de su giro
Corrida 1	230.0 ± 0.1	250.0 ± 0.1
Corrida 2	244.0 ± 0.1	255.0 ± 0.1
Corrida 3	250.0 ± 0.1	258.0 ± 0.1

2. Cálculos.

- 1) Determinación del flujo volumétrico de biogás para el análisis con la válvula totalmente abierta.

$$\dot{V} = \frac{1}{4} \pi \phi^2 v$$

Donde ϕ es el diámetro de la manguera de salida de biogás y v es la velocidad lineal de flujo de biogás.

$$\dot{V} = \frac{1}{4} \pi (0.0150 \pm 0.0005 \text{ m})^2 \left(5.30 \pm 0.01 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 0.0009366 \pm 0.000042 \text{ m}^3/\text{s}$$

- 2) Determinación del flujo volumétrico de dióxido de carbono para el análisis con la válvula totalmente abierta.

$$\dot{V}_{CO_2} = 0.0009366 \pm 0.000042 \frac{m^3}{s} \left(\frac{36.37 \pm 0.73 m^3 CO_2}{100 m^3} \right) = 0.0003406 \pm 0.0000175 \frac{m^3 CO_2}{s}$$

- 3) Determinación del flujo molar de dióxido de carbono para el análisis con la válvula totalmente abierta.

$$\dot{n}_{CO_2} = \frac{P\dot{V}_{CO_2}}{RT}$$

Donde \dot{n}_{CO_2} es el flujo molar de dióxido de carbono, P es la presión a la salida de los gases (atmosférica), \dot{V}_{CO_2} es el flujo volumétrico de dióxido de carbono, R es la constante de los gases (8.314 J/K·mol) y T es la temperatura absoluta a la cual se realizó el análisis.

$$\dot{n}_{CO_2} = \frac{(87,997.1 Pa)(0.0003406 \pm 0.0000175 \frac{m^3}{s})}{(8.314 \frac{J}{K \cdot mol})(26.0 \pm 0.1 + 273.15)K} = 0.01205 \pm 0.00062 mol/s$$

- 4) Determinación del flujo molar de metano para el análisis con la válvula totalmente abierta.

$$\dot{n}_{CH_4} = \frac{\%CH_4 P \dot{V}}{RT}$$

Donde %CH₄ es el porcentaje volumétrico de metano en el biogás, \dot{n}_{CH_4} es el flujo molar de dióxido de carbono, P es la presión a la salida de los gases (atmosférica), \dot{V} es el flujo volumétrico de biogás, R es la constante de los gases (8.314 J/K·mol) y T es la temperatura absoluta a la cual se realizó el análisis.

$$\dot{n}_{CH_4} = \frac{(0.6263 \pm 0.0073)(87,997.1 Pa) \left(0.0009366 \pm 0.000042 \frac{m^3}{s} \right)}{(8.314 \frac{J}{K \cdot mol})(26.0 \pm 0.1 + 273.15)K} = 0.02075 \pm 0.00101 mol/s$$

- 5) Determinación de la flujo molar de aire necesario para la combustión del biogás, considerando un exceso del 5%, sabiendo que por cada mol de metano es necesario tener dos moles de oxígeno para la combustión completa y que el porcentaje de oxígeno en el aire es del 21%.

$$\dot{n}_{aire} = 0.02075 \pm 0.00101 \frac{mol CH_4}{s} \left(\frac{2 mol O_2}{1 mol CH_4} \right) \left(\frac{100 mol aire}{21 mol O_2} \right) (1.05) = 0.2075 \pm 0.0101 mol/s$$

- 6) Determinación del nitrógeno de salida después del proceso combustión, para el análisis hecho con la válvula totalmente abierta.

$$\dot{n}_{N_2} = 0.2075 \pm 0.0101 \frac{mol aire}{s} \left(\frac{79 mol N_2}{100 mol aire} \right) = 0.1640 \pm 0.0080 mol/s$$

- 7) Determinación del flujo de oxígeno de salida después del proceso de combustión, para el análisis hecho con la válvula totalmente abierta.

$$\begin{aligned} \dot{n}_{O_2} &= 0.2075 \pm 0.0101 \frac{mol aire}{s} \left(\frac{21 mol O_2}{100 mol aire} \right) - 0.02075 \pm 0.00101 \\ &= 0.1640 \pm 0.0080 \frac{mol CH_4}{s} \left(\frac{2 mol O_2}{1 mol CH_4} \right) \\ \dot{n}_{O_2} &= 0.002075 \pm 0.000101 mol/s \end{aligned}$$

- 8) Determinación del dióxido de carbono formado por una combustión completa.

$$\dot{n}_{CO_2} = 0.02075 \pm 0.00101 \frac{mol CH_4}{s} \left(\frac{1 mol CO_2}{1 mol CH_4} \right) = 0.02075 \pm 0.00101 mol/s$$

- 9) Determinación del vapor de agua formado por el proceso de combustión.

$$\dot{n}_{H_2O} = 0.02075 \pm 0.00101 \frac{mol CH_4}{s} \left(\frac{2 mol H_2O}{1 mol CH_4} \right) = 0.04151 \pm 0.00202 mol/s$$

- 10) Determinación del flujo total de gases posterior a la combustión, como la sumatoria del nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono (tanto del biogás como el producido en la combustión) y vapor de agua.

$$\begin{aligned} \dot{n} = & 0.1640 \pm 0.0080 \frac{\text{mol } N_2}{s} + 0.002075 \pm 0.000101 \frac{\text{mol } O_2}{s} + 0.02075 \\ & \pm 0.00101 \frac{\text{mol } CO_2 \text{ combustión}}{s} + 0.01205 \pm 0.00062 \frac{\text{mol } CO_2 \text{ inerte}}{s} + 0.04151 \\ & \pm 0.00202 \frac{\text{mol } H_2O}{s} \end{aligned}$$

$$\dot{n} = 0.2403 \pm 0.0083 \text{ mol/s}$$

- 11) Determinación del flujo de dióxido de carbono con base en la medición experimental para la primera corrida, para el análisis con la válvula totalmente abierta.

$$\dot{n}_{CO_2} = 0.2403 \pm 0.0083 \frac{\text{mol}}{s} \left(\frac{11.5 \pm 0.5 \text{ mol } CO_2}{100 \text{ mol}} \right) = 0.02764 \pm 0.0083 \frac{\text{mol } CO_2}{s}$$

- 12) Determinación del flujo de dióxido de carbono concerniente a la reacción como.

$$\begin{aligned} \dot{n}_{CO_2} &= \dot{n}_{CO_2, \text{experimental}} - \dot{n}_{CO_2, \text{inerte}} \\ \dot{n}_{CO_2} &= 0.02764 \pm 0.0083 \frac{\text{mol}}{s} - 0.01205 \pm 0.00062 \frac{\text{mol}}{s} = 0.01559 \pm 0.00166 \frac{\text{mol}}{s} \end{aligned}$$

- 13) Determinación del porcentaje de dióxido de carbono efectivo debido a la combustión.

$$\%CO_2 = \frac{\dot{n}_{CO_2}}{\dot{n}} = \frac{0.01559 \pm 0.00166 \frac{\text{mol}}{s}}{0.2403 \pm 0.0083 \frac{\text{mol}}{s}} \times 100 = 6.49 \pm 0.73\%$$

- 14) Determinación de las pérdidas de calor por convección, según la correlación de Seigert

$$\%pérdidas = A \frac{T_g - T_a}{\%CO_2 \times 100}$$

Donde A es una constante (que en el caso de biogás es de 0.71), Tg es la temperatura de los gases de combustión, Ta es la temperatura ambiente, %CO₂ es el porcentaje de dióxido de carbono en los gases de combustión (debido únicamente a la combustión).

$$\%p\u00e9rdidas = 0.71 \frac{(230.0 \pm 0.1 - 26.0 \pm 0.1)K}{(0.0649 \pm 0.0073) \times 100} = 22.33 \pm 2.50\%$$

15) Determinación de la eficiencia de los quemadores, para la primera corrida con la válvula de bola totalmente abierta.

$$\%eficiencia = 100\% - \%p\u00e9rdidas = 100\% - 22.33 \pm 2.50\% = 77.65 \pm 2.50\%$$

Nota: La determinación de la eficiencia con las otras corridas, tanto para la válvula totalmente abierta como para la válvula abierta a ½ de su giro se realizaron de la misma manera que la secuencia de los cálculos anteriormente mostrados.

3. Datos calculados intermedios.

Cuadro 67: Valores de flujo tanto para la situación de la válvula totalmente abierta como para la válvula abierta a ½ de su giro.

	Válvula totalmente abierta	Válvula abierta a ½ de su giro
Flujo volumétrico de biogás (m ³ /s)	0.0009366 ± 0.0000442	0.0005301 ± 0.0000251
Flujo molar de dióxido de carbono en el biogás de entrada (mol/s)	0.01205 ± 0.00062	0.006822 ± 0.000351
Flujo molar de metano en el biogás de entrada (mol/s)	0.02075 ± 0.00101	0.01175 ± 0.00057
Flujo molar de aire para combustión (mol/s)	0.2075 ± 0.0101	0.1175 ± 0.0057
Flujo molar del nitrógeno de salida después del proceso de combustión (mol/s)	0.1640 ± 0.0080	0.09281 ± 0.00453
Flujo molar de oxígeno en exceso después del proceso de combustión (mol/s)	0.002075 ± 0.000101	0.001175 ± 0.000057
Flujo molar de dióxido de carbono producto de la combustión del biogás (mol/s)	0.02075 ± 0.00101	0.01175 ± 0.00057
Flujo molar de vapor de agua en la salida del proceso de combustión (mol/s)	0.04151 ± 0.00202	0.02350 ± 0.00115
Flujo molar total de los gases a la salida del proceso de combustión (mol/s)	0.2403 ± 0.0083	0.1360 ± 0.0047

Cuadro 68: Flujo de dióxido de carbono calculado en base a los datos experimentales de concentración en los gases de combustión.

Corrida	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	
	Válvula totalmente abierta	Válvula abierta a ½ de su giro
Corrida 1	0.02764 ± 0.00154	0.01156 ± 0.00079
Corrida 2	0.02403 ± 0.00146	0.01428 ± 0.00084
Corrida 3	0.01923 ± 0.00137	0.01156 ± 0.00079

Cuadro 69: Flujo de dióxido de carbono debido exclusivamente a la combustión del biogás calculado en base a los datos experimentales de concentración en los gases de combustión.

Corrida	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	
	Válvula totalmente abierta	Válvula abierta a ½ de su giro
Corrida 1	0.01559 ± 0.00166	0.004742 ± 0.000864
Corrida 2	0.01198 ± 0.00159	0.007463 ± 0.000912
Corrida 3	0.00718 ± 0.00151	0.004742 ± 0.000864

Cuadro 70: Concentración de dióxido de carbono producto de la combustión en el flujo de gases de salida.

Corrida	Concentración de dióxido de carbono (%mol)	
	Válvula totalmente abierta	Válvula abierta a ½ de su giro
Corrida 1	6.49 ± 0.73%	3.49 ± 0.65%
Corrida 2	4.99 ± 0.68%	5.49 ± 0.70%
Corrida 3	2.99 ± 0.64%	3.49 ± 0.65%

Cuadro 71: Concentración de dióxido de carbono producto de la combustión en el flujo de gases de salida.

Corrida	Concentración de dióxido de carbono (%mol)	
	Válvula totalmente abierta	Válvula abierta a ½ de su giro
Corrida 1	6.49 ± 0.73%	3.49 ± 0.65%
Corrida 2	4.99 ± 0.68%	5.49 ± 0.70%
Corrida 3	2.99 ± 0.64%	3.49 ± 0.65%

Cuadro 72: Pérdidas en los quemadores por el proceso de combustión.

Corrida	Pérdidas energéticas (%)	
	Válvula totalmente abierta	Válvula abierta a ½ de su giro
Corrida 1	22.33 ± 2.50%	45.63 ± 8.47%
Corrida 2	31.05 ± 4.25%	29.64 ± 3.77%
Corrida 3	53.27 ± 11.34%	47.26 ± 8.77%

Cuadro 73: Eficiencia de los quemadores, para ambas condiciones de flujo.

Corrida	Eficiencia de los quemadores (%)	
	Válvula totalmente abierta	Válvula abierta a ½ de su giro
Corrida 1	77.67 ± 2.50%	54.37 ± 8.47%
Corrida 2	68.95 ± 4.25%	70.36 ± 3.77%
Corrida 3	46.73 ± 11.34%	52.74 ± 8.77%

I. Análisis termodinámico del biogás en términos de combustión, para diferentes panoramas de purificación del gas.

1. Datos originales.

Cuadro 74: Parámetros para la determinación del C_p de las diversas especies encontradas en el sistema de combustión del biogás.

Especie	A	B (K^{-1})	C (K^{-2})	D (K^2)
Metano	1.702	0.009081	-0.000002164	0
Dióxido de Carbono	5.457	0.001045	0	-115700
Sulfuro de hidrógeno	3.931	0.001490	0	-23200
Nitrógeno	3.280	0.000593	0	4000
Oxígeno	3.639	0.000506	0	-22700
Hidrógeno	3.249	0.000422	0	8300
Dióxido de Azufre	5.699	0.000801	0	-101500
Agua (g)	3.470	0.001450	0	12100

Cuadro 75: Calor de combustión de las especies combustibles en el biogás, para los diferentes panoramas de análisis.

Especie	Calor de combustión (J/kmol)
Metano	-802,600,000.00
Hidrógeno	-241,800,000.00
Sulfuro de Hidrógeno	-518,000,000.00

Cuadro 76: Condiciones termodinámicas de análisis en ambas granjas.

Condición	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Presión (Pa)	87,997.1	83,997.2
Temperatura ($^{\circ}C$)	26	20

Cuadro 77: Concentración de gases en el biogás para ambas granjas.

Condición	Granja La Flor	Granja Agua Blanca
Concentración de metano (%vol)	62.63%	57.94%
Concentración de dióxido de carbono (%vol)	36.37%	41.06%
Concentración de sulfuro de hidrógeno (%vol)	1.00%	1.00%

2. Cálculos. A continuación se presentan los cálculos de análisis termodinámico hecho para un solo uno de los flujos volumétricos de biogás hacia el digestor, ya que el método de cálculo es igual para todos los otros flujos. Se tomará el caso de la Granja La Flor, para un flujo de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, sin ningún sistema de filtración.

1) Determinación del flujo molar de biogás.

$$\dot{n} = \frac{P\dot{V}}{RT}$$

Donde \dot{n} es el flujo molar del biogás, P es la presión del sistema, \dot{V} es el flujo volumétrico de biogás, R es la constante de los gases ($8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$) y T es la temperatura absoluta del sistema.

$$\dot{n} = \frac{(87,997.1 \text{ Pa}) \left(1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{\left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{K}\cdot\text{mol}}\right) (26 + 273.15)\text{K}} = 35.38 \text{ mol/s}$$

2) Determinación del calor liberado durante la reacción del biogás.

$$\begin{aligned} \Delta H_r = & 35.38 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \left(\frac{62.63 \text{ mol } CH_4}{100 \text{ mol}} \right) \left(\frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}} \right) \left(\frac{-802,600,000.00 \text{ J}}{1 \text{ kmol}} \right) \\ & + 35.38 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \left(\frac{1 \text{ mol } H_2S}{100 \text{ mol}} \right) \left(\frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}} \right) \left(\frac{-518,000,000.00 \text{ J}}{1 \text{ kmol}} \right) \end{aligned}$$

$$\Delta H_r = -17,968,280.22 \text{ J}$$

- 3) Determinación del flujo molar de aire para la combustión, tomando en cuenta una base de un 5% de exceso.

$$\begin{aligned} \dot{n}_{aire} = & 35.38 \frac{\text{mol biogás}}{\text{s}} \left(\frac{62.63 \text{ mol } CH_4}{100 \text{ mol biogás}} \right) \left(\frac{2 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } CH_4} \right) \left(\frac{100 \text{ mol aire}}{21 \text{ mol } O_2} \right) (1.05) \\ & + 35.38 \frac{\text{mol biogás}}{\text{s}} \left(\frac{1 \text{ mol } H_2S}{100 \text{ mol biogás}} \right) \left(\frac{\frac{3}{2} \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } H_2S} \right) \left(\frac{100 \text{ mol aire}}{21 \text{ mol } O_2} \right) (1.05) \end{aligned}$$

$$\dot{n}_{aire} = 224.25 \text{ mol/s}$$

- 4) Flujo molar de metano en la entrada al sistema de combustión.

$$\dot{n}_{CH_4} = 35.38 \frac{\text{mol biogás}}{\text{s}} \left(\frac{62.63 \text{ mol } CH_4}{100 \text{ mol biogás}} \right) = 22.16 \text{ mol/s}$$

- 5) Flujo de dióxido de carbono de entrada al sistema de combustión.

$$\dot{n}_{CO_2} = 35.38 \frac{\text{mol biogás}}{\text{s}} \left(\frac{36.37 \text{ mol } CO_2}{100 \text{ mol biogás}} \right) = 12.87 \text{ mol/s}$$

- 6) Flujo de sulfuro de hidrógeno de entrada al sistema de combustión.

$$\dot{n}_{H_2S} = 35.38 \frac{\text{mol biogás}}{\text{s}} \left(\frac{1.00 \text{ mol } H_2S}{100 \text{ mol biogás}} \right) = 0.35 \text{ mol/s}$$

- 7) Flujo de oxígeno de entrada al sistema de combustión.

$$\dot{n}_{O_2} = 224.25 \frac{\text{mol aire}}{\text{s}} \left(\frac{21 \text{ mol } O_2}{100 \text{ mol aire}} \right) = 47.09 \text{ mol/s}$$

8) Flujo de nitrógeno de entrada al sistema de combustión.

$$\dot{n}_{N_2} = 224.25 \frac{\text{mol aire}}{s} \left(\frac{79 \text{ mol } N_2}{100 \text{ mol aire}} \right) = 177.15 \text{ mol/s}$$

9) Flujo de dióxido de carbono de salida.

$$\dot{n}_{CO_2} = 12.87 \frac{\text{mol } CO_2}{s} + 22.16 \frac{\text{mol } CH_4}{s} \left(\frac{1 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } CH_4} \right) = 35.03 \text{ mol/s}$$

10) Determinación del vapor de agua de salida producto de la combustión.

$$\dot{n}_{H_2O} = 22.16 \frac{\text{mol } CH_4}{s} \left(\frac{2 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } CH_4} \right) + 0.35 \frac{\text{mol } H_2S}{s} \left(\frac{1 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } H_2S} \right) = 44.67 \text{ mol/s}$$

11) Dióxido de azufre de salida producto de la combustión del sulfuro de hidrógeno.

$$\dot{n}_{SO_2} = 0.35 \frac{\text{mol } H_2S}{s} \left(\frac{1 \text{ mol } SO_2}{1 \text{ mol } H_2S} \right) = 0.35 \text{ mol/s}$$

12) Flujo de oxígeno de salida del proceso de combustión.

$$\dot{n}_{O_2} = 47.09 \frac{\text{mol } O_2}{s} - 22.16 \frac{\text{mol } CH_4}{s} \left(\frac{2 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } CH_4} \right) - 0.35 \frac{\text{mol } H_2S}{s} \left(\frac{\frac{3}{2} \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } H_2S} \right) = 2.24 \text{ mol/s}$$

13) Determinación del parámetro A para la entrada, tomando en cuenta los moles de cada especie presente al principio.

$$A_{global} = \sum n_i A_i$$

Donde n_i representa los moles de cada uno de las especies en la entrada al sistema de digestión y A_i representa el primer coeficiente para la determinación del Cp/R de cada una de las especies entrantes al sistema de digestión.

$$A_{global} = \left(22.16 \frac{\text{mol } CH_4}{s}\right)(1.702) + \left(12.87 \frac{\text{mol } CO_2}{s}\right)(5.457) + \left(0.35 \frac{\text{mol } H_2S}{s}\right)(3.931) \\ + \left(47.09 \frac{\text{mol } O_2}{s}\right)(3.639) + \left(177.15 \frac{\text{mol } N_2}{s}\right)(3.280)$$

$$A_{global} = 861.76$$

Nota: La determinación de los parámetros B, C y D en la entrada se realizaron de la misma manera que en el cálculo anterior. Así también, la determinación de los valores de A, B, C y D para la salida del sistema de combustión se realizó de la misma manera, tomando como especies presentes al nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, dióxido de azufre y dióxido de carbono.

- 14) Determinación del Cp para los reactivos del sistema de combustión, desde una temperatura de 26°C hasta 25°C.

$$\tau = \frac{T}{T_o} = \frac{25 + 273.15 \text{ K}}{26 + 273.15 \text{ K}} = 0.91$$

$$Cp = R \left(A + \frac{B}{2} T_o (\tau + 1) + \frac{C}{3} T_o^2 (\tau^2 + \tau + 1) + \frac{D}{\tau T_o^2} \right)$$

Donde A, B, C y D son las constantes globales determinadas anteriormente, τ es la relación de temperaturas, T_o es la temperatura de los reactivos y R es la constante de los gases (8.314 J/K·mol)

$$Cp = \left(8.314 \frac{J}{K \cdot mol}\right) \left(861.76 + \frac{0.3441}{2} (26 + 273.15)(0.91 + 1) \right. \\ \left. + \frac{-0.0000480}{3} (26 + 273.15)^2 (0.91^2 + 0.91 + 1) + \frac{-1,857,386.16}{0.91(26 + 273.15)^2} \right)$$

$$Cp = 7,761.60 \frac{J}{K}$$

- 15) Determinación del calor liberado por los reactivos hasta llegar a la temperatura estándar de reacción (25°C).

$$Q_r = \left(7,661.60 \frac{J}{K}\right) (25 - 26) = -7,661.60 J$$

- 16) Calor total liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de reacción así como el liberado por la reacción de combustión.

$$Q = Q_r + \Delta H_r = -7,661.60 J - 17,968,280.22 J = -17,976,041.83 J$$

- 17) Determinación de la temperatura final ideal de los gases de combustión en el supuesto que todo el calor liberado entre los reactivos y la reacción en sí se utilizara para calentar los gases de combustión.

$$\tau = \frac{T}{T_o} = \frac{T}{273.15}$$

$$\begin{aligned} Q &= R \left(A + \frac{B}{2} T_o (\tau + 1) + \frac{C}{3} T_o^2 (\tau^2 + \tau + 1) + \frac{D}{\tau T_o^2} \right) \\ &= \left(8.314 \frac{J}{K \cdot mol} \right) \left(937.40 + \frac{0.21}{2} (273.15) (\tau + 1) + \frac{0}{3} (273.15)^2 (\tau^2 + \tau + 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{-2,890,302.14}{\tau (273.15)^2} \right) = 17,976,041.83 \end{aligned}$$

Resolver simultáneamente ambas ecuaciones utilizando un programa de cómputo especial para resolución de ecuaciones simultáneas se determinó que el valor de T es de 2,106.05 K.

3. Datos calculados intermedios.

Análisis teórico de la Granja La Flor sin ningún tipo de filtro para el biogás.

Cuadro 78: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	35.38	22.16	12.87	0.35
2	70.76	44.32	25.74	0.71
3	106.14	66.48	38.60	1.06
4	141.52	88.64	51.47	1.42
5	176.90	110.80	64.34	1.77
6	212.29	132.96	77.21	2.12
7	247.67	155.11	90.08	2.48
8	283.05	177.27	102.94	2.83
9	318.43	199.43	115.81	3.18
10	353.81	221.59	128.68	3.54
11	389.19	243.75	141.55	3.89

Cuadro 79: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	224.25	47.09	177.15
2	448.49	94.18	354.31
3	672.74	141.27	531.46
4	896.98	188.37	708.62
5	1,121.23	235.46	885.77
6	1,345.48	282.55	1,062.93
7	1,569.72	329.64	1,240.08
8	1,793.97	376.73	1,417.23
9	2,018.21	423.82	1,594.39
10	2,242.46	470.92	1,771.54
11	2,466.71	518.01	1,948.70

Cuadro 80: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	35.03	44.67	0.35	177.15	2.24
2	70.05	89.34	0.71	354.31	4.48
3	105.08	134.02	1.06	531.46	6.73
4	140.11	178.69	1.42	708.62	8.97
5	175.14	223.36	1.77	885.77	11.21
6	210.16	268.03	2.12	1,062.93	13.45
7	245.19	312.71	2.48	1,240.08	15.70
8	280.22	357.38	2.83	1,417.23	17.94
9	315.24	402.05	3.18	1,594.39	20.18
10	350.27	446.72	3.54	1,771.54	22.42
11	385.30	491.40	3.89	1,948.70	24.67

Cuadro 81: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	861.76	0.3441	-0.0000480	-1,857,386.16
2	1,723.52	0.6882	-0.0000959	-3,714,772.31
3	2,585.28	1.0322	-0.0001439	-5,572,158.47
4	3,447.03	1.3763	-0.0001918	-7,429,544.62
5	4,308.79	1.7204	-0.0002398	-9,286,930.78
6	5,170.55	2.0645	-0.0002877	-11,144,316.93
7	6,032.31	2.4086	-0.0003357	-13,001,703.09
8	6,894.07	2.7527	-0.0003836	-14,859,089.24
9	7,755.83	3.0967	-0.0004316	-16,716,475.40
10	8,617.59	3.4408	-0.0004795	-18,573,861.55
11	9,479.34	3.7849	-0.0005275	-20,431,247.71

Cuadro 82: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	937.40	0.21	0	-2,890,302.14
2	1,874.80	0.42	0	-5,780,604.29
3	2,812.20	0.62	0	-8,670,906.43
4	3,749.59	0.83	0	-11,561,208.58
5	4,686.99	1.04	0	-14,451,510.72
6	5,624.39	1.25	0	-17,341,812.87
7	6,561.79	1.45	0	-20,232,115.01
8	7,499.19	1.66	0	-23,122,417.16
9	8,436.59	1.87	0	-26,012,719.30
10	9,373.99	2.08	0	-28,903,021.45
11	10,311.39	2.29	0	-31,793,323.59

Cuadro 83: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor liberador por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total liberado entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.91	7,761.60	-7,761.60	-17,968,280.22	-17,976,041.83
2	0.91	15,523.21	-15,523.21	-35,936,560.44	-35,952,083.65
3	0.91	23,284.81	-23,284.81	-53,904,840.67	-53,928,125.48
4	0.91	31,046.41	-31,046.41	-71,873,120.89	-71,904,167.30
5	0.91	38,808.01	-38,808.01	-89,841,401.11	-89,880,209.13
6	0.91	46,569.62	-46,569.62	-107,809,681.33	-107,856,250.95
7	0.91	54,331.22	-54,331.22	-125,777,961.55	-125,832,292.78
8	0.91	62,092.82	-62,092.82	-143,746,241.78	-143,808,334.60
9	0.91	69,854.43	-69,854.43	-161,714,522.00	-161,784,376.43
10	0.91	77,616.03	-77,616.03	-179,682,802.22	-179,760,418.25
11	0.91	85,377.63	-85,377.63	-197,651,082.44	-197,736,460.08

Cuadro 84: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor sin la utilización de ningún filtro

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	9,807.45	2,106.05	7.71
2	19,614.90	2,106.05	7.71
3	29,422.36	2,106.05	7.71
4	39,229.81	2,106.05	7.71
5	49,037.26	2,106.05	7.71
6	58,844.71	2,106.05	7.71
7	68,652.16	2,106.05	7.71
8	78,459.62	2,106.05	7.71
9	88,267.07	2,106.05	7.71
10	98,074.52	2,106.05	7.71
11	107,881.97	2,106.05	7.71

Análisis teórico de la Granja La Flor sin con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Cuadro 85: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	35.38	22.16	12.87	0.35
2	70.76	44.32	25.74	0.71
3	106.14	66.48	38.60	1.06
4	141.52	88.64	51.47	1.42
5	176.90	110.80	64.34	1.77
6	212.29	132.96	77.21	2.12
7	247.67	155.11	90.08	2.48
8	283.05	177.27	102.94	2.83
9	318.43	199.43	115.81	3.18
10	353.81	221.59	128.68	3.54
11	389.19	243.75	141.55	3.89

Cuadro 86: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	222.48	46.72	175.76
2	444.95	93.44	351.51
3	667.43	140.16	527.27
4	889.91	186.88	703.03
5	1,112.38	233.60	878.78
6	1,334.86	280.32	1,054.54
7	1,557.34	327.04	1,230.30
8	1,779.82	373.76	1,406.05
9	2,002.29	420.48	1,581.81
10	2,224.77	467.20	1,757.57
11	2,447.25	513.92	1,933.32

Cuadro 87: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	35.03	44.67	0.00	175.76	2.22
2	70.05	89.34	0.00	351.51	4.45
3	105.08	134.02	0.00	527.27	6.67
4	140.11	178.69	0.00	703.03	8.90
5	175.14	223.36	0.00	878.78	11.12
6	210.16	268.03	0.00	1,054.54	13.35
7	245.19	312.71	0.00	1,230.30	15.57
8	280.22	357.38	0.00	1,406.05	17.80
9	315.24	402.05	0.00	1,581.81	20.02
10	350.27	446.72	0.00	1,757.57	22.25
11	385.30	491.40	0.00	1,933.32	24.47

Cuadro 88: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	855.58	0.34	-0.0000480	-1,843,398.30
2	1,711.16	0.69	-0.0000959	-3,686,796.60
3	2,566.74	1.03	-0.0001439	-5,530,194.91
4	3,422.33	1.37	-0.0001918	-7,373,593.21
5	4,277.91	1.71	-0.0002398	-9,216,991.51
6	5,133.49	2.06	-0.0002877	-11,060,389.81
7	5,989.07	2.40	-0.0003357	-12,903,788.11
8	6,844.65	2.74	-0.0003836	-14,747,186.41
9	7,700.23	3.08	-0.0004316	-16,590,584.72
10	8,555.81	3.43	-0.0004795	-18,433,983.02
11	9,411.40	3.77	-0.0005275	-20,277,381.32

Cuadro 89: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	930.73	0.21	0.00	-2,859,579.11
2	1,861.47	0.41	0.00	-5,719,158.22
3	2,792.20	0.62	0.00	-8,578,737.32
4	3,722.94	0.83	0.00	-11,438,316.43
5	4,653.67	1.03	0.00	-14,297,895.54
6	5,584.40	1.24	0.00	-17,157,474.65
7	6,515.14	1.45	0.00	-20,017,053.76
8	7,445.87	1.65	0.00	-22,876,632.86
9	8,376.61	1.86	0.00	-25,736,211.97
10	9,307.34	2.07	0.00	-28,595,791.08
11	10,238.07	2.27	0.00	-31,455,370.19

Cuadro 90: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor liberador por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total liberado entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.91	7,708.35	-7,708.35	-17,870,558.07	-17,878,266.43
2	0.91	15,416.70	-15,416.70	-35,741,116.15	-35,756,532.85
3	0.91	23,125.05	-23,125.05	-53,611,674.22	-53,634,799.28
4	0.91	30,833.41	-30,833.41	-71,482,232.29	-71,513,065.70
5	0.91	38,541.76	-38,541.76	-89,352,790.37	-89,391,332.13
6	0.91	46,250.11	-46,250.11	-107,223,348.44	-107,269,598.55
7	0.91	53,958.46	-53,958.46	-125,093,906.52	-125,147,864.98
8	0.91	61,666.81	-61,666.81	-142,964,464.59	-143,026,131.40
9	0.91	69,375.16	-69,375.16	-160,835,022.66	-160,904,397.83
10	0.91	77,083.52	-77,083.52	-178,705,580.74	-178,782,664.25
11	0.91	84,791.87	-84,791.87	-196,576,138.81	-196,660,930.68

Cuadro 91: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	9,743.20	2,108.10	7.72
2	19,486.40	2,108.10	7.72
3	29,229.60	2,108.10	7.72
4	38,972.80	2,108.10	7.72
5	48,716.01	2,108.10	7.72
6	58,459.21	2,108.10	7.72
7	68,202.41	2,108.10	7.72
8	77,945.61	2,108.10	7.72
9	87,688.81	2,108.10	7.72
10	97,432.01	2,108.10	7.72
11	107,175.21	2,108.10	7.72

Análisis teórico de la Granja La Flor sin con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Cuadro 92: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	28.20	22.16	5.69	0.35
2	56.40	44.32	11.37	0.71
3	84.60	66.48	17.06	1.06
4	112.80	88.64	22.74	1.42
5	141.00	110.80	28.43	1.77
6	169.20	132.96	34.12	2.12
7	197.39	155.11	39.80	2.48
8	225.59	177.27	45.49	2.83
9	253.79	199.43	51.18	3.18
10	281.99	221.59	56.86	3.54
11	310.19	243.75	62.55	3.89

Cuadro 93: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	222.48	46.72	175.76
2	444.95	93.44	351.51
3	667.43	140.16	527.27
4	889.91	186.88	703.03
5	1,112.38	233.60	878.78
6	1,334.86	280.32	1,054.54
7	1,557.34	327.04	1,230.30
8	1,779.82	373.76	1,406.05
9	2,002.29	420.48	1,581.81
10	2,224.77	467.20	1,757.57
11	2,447.25	513.92	1,933.32

Cuadro 94: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	27.85	44.67	0.00	175.76	2.22
2	55.69	89.34	0.00	351.51	4.45
3	83.54	134.02	0.00	527.27	6.67
4	111.38	178.69	0.00	703.03	8.90
5	139.23	223.36	0.00	878.78	11.12
6	167.07	268.03	0.00	1,054.54	13.35
7	194.92	312.71	0.00	1,230.30	15.57
8	222.76	357.38	0.00	1,406.05	17.80
9	250.61	402.05	0.00	1,581.81	20.02
10	278.45	446.72	0.00	1,757.57	22.25
11	306.30	491.40	0.00	1,933.32	24.47

Cuadro 95: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	816.39	0.34	-0.0000480	-1,012,474.80
2	1,632.78	0.67	-0.0000959	-2,024,949.60
3	2,449.17	1.01	-0.0001439	-3,037,424.40
4	3,265.56	1.34	-0.0001918	-4,049,899.20
5	4,081.95	1.68	-0.0002398	-5,062,374.00
6	4,898.35	2.01	-0.0002877	-6,074,848.80
7	5,714.74	2.35	-0.0003357	-7,087,323.60
8	6,531.13	2.68	-0.0003836	-8,099,798.40
9	7,347.52	3.02	-0.0004316	-9,112,273.20
10	8,163.91	3.35	-0.0004795	-10,124,748.00
11	8,980.30	3.69	-0.0005275	-11,137,222.80

Cuadro 96: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	891.54	0.20	0.00	-2,028,655.61
2	1,783.09	0.40	0.00	-4,057,311.21
3	2,674.63	0.60	0.00	-6,085,966.82
4	3,566.17	0.80	0.00	-8,114,622.43
5	4,457.72	1.00	0.00	-10,143,278.03
6	5,349.26	1.20	0.00	-12,171,933.64
7	6,240.80	1.39	0.00	-14,200,589.24
8	7,132.35	1.59	0.00	-16,229,244.85
9	8,023.89	1.79	0.00	-18,257,900.46
10	8,915.43	1.99	0.00	-20,286,556.06
11	9,806.98	2.19	0.00	-22,315,211.67

Cuadro 97: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor liberador por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total liberado entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.91	7,449.21	-7,449.21	-17,870,558.07	-17,878,007.28
2	0.91	14,898.42	-14,898.42	-35,741,116.15	-35,756,014.57
3	0.91	22,347.63	-22,347.63	-53,611,674.22	-53,634,021.85
4	0.91	29,796.84	-29,796.84	-71,482,232.29	-71,512,029.14
5	0.91	37,246.05	-37,246.05	-89,352,790.37	-89,390,036.42
6	0.91	44,695.26	-44,695.26	-107,223,348.44	-107,268,043.70
7	0.91	52,144.47	-52,144.47	-125,093,906.52	-125,146,050.99
8	0.91	59,593.68	-59,593.68	-142,964,464.59	-143,024,058.27
9	0.91	67,042.89	-67,042.89	-160,835,022.66	-160,902,065.55
10	0.91	74,492.10	-74,492.10	-178,705,580.74	-178,780,072.84
11	0.91	81,941.31	-81,941.31	-196,576,138.81	-196,658,080.12

Cuadro 98: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	9,409.78	2,173.09	7.96
2	18,819.56	2,173.09	7.96
3	28,229.33	2,173.09	7.96
4	37,639.11	2,173.09	7.96
5	47,048.89	2,173.09	7.96
6	56,458.67	2,173.09	7.96
7	65,868.45	2,173.09	7.96
8	75,278.22	2,173.09	7.96
9	84,688.00	2,173.09	7.96
10	94,097.78	2,173.09	7.96
11	103,507.56	2,173.09	7.96

Análisis teórico de la Granja La Flor sin con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Cuadro 99: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	25.02	22.16	2.50	0.35
2	50.04	44.32	5.01	0.71
3	75.05	66.48	7.51	1.06
4	100.07	88.64	10.02	1.42
5	125.09	110.80	12.52	1.77
6	150.11	132.96	15.03	2.12
7	175.12	155.11	17.53	2.48
8	200.14	177.27	20.04	2.83
9	225.16	199.43	22.54	3.18
10	250.18	221.59	25.05	3.54
11	275.19	243.75	27.55	3.89

Cuadro 100: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	222.48	46.72	175.76
2	444.95	93.44	351.51
3	667.43	140.16	527.27
4	889.91	186.88	703.03
5	1,112.38	233.60	878.78
6	1,334.86	280.32	1,054.54
7	1,557.34	327.04	1,230.30
8	1,779.82	373.76	1,406.05
9	2,002.29	420.48	1,581.81
10	2,224.77	467.20	1,757.57
11	2,447.25	513.92	1,933.32

Cuadro 101: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	24.66	44.67	0.00	175.76	2.22
2	49.33	89.34	0.00	351.51	4.45
3	73.99	134.02	0.00	527.27	6.67
4	98.66	178.69	0.00	703.03	8.90
5	123.32	223.36	0.00	878.78	11.12
6	147.98	268.03	0.00	1,054.54	13.35
7	172.65	312.71	0.00	1,230.30	15.57
8	197.31	357.38	0.00	1,406.05	17.80
9	221.97	402.05	0.00	1,581.81	20.02
10	246.64	446.72	0.00	1,757.57	22.25
11	271.30	491.40	0.00	1,933.32	24.47

Cuadro 102: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	799.03	0.33	-0.0000480	-644,370.06
2	1,598.06	0.66	-0.0000959	-1,288,740.12
3	2,397.09	1.00	-0.0001439	-1,933,110.19
4	3,196.12	1.33	-0.0001918	-2,577,480.25
5	3,995.15	1.66	-0.0002398	-3,221,850.31
6	4,794.18	1.99	-0.0002877	-3,866,220.37
7	5,593.20	2.32	-0.0003357	-4,510,590.44
8	6,392.23	2.65	-0.0003836	-5,154,960.50
9	7,191.26	2.99	-0.0004316	-5,799,330.56
10	7,990.29	3.32	-0.0004795	-6,443,700.62
11	8,789.32	3.65	-0.0005275	-7,088,070.69

Cuadro 103: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	874.18	0.20	0.00	-1,660,550.87
2	1,748.36	0.39	0.00	-3,321,101.74
3	2,622.55	0.59	0.00	-4,981,652.61
4	3,496.73	0.78	0.00	-6,642,203.47
5	4,370.91	0.98	0.00	-8,302,754.34
6	5,245.09	1.18	0.00	-9,963,305.21
7	6,119.27	1.37	0.00	-11,623,856.08
8	6,993.45	1.57	0.00	-13,284,406.95
9	7,867.64	1.76	0.00	-14,944,957.82
10	8,741.82	1.96	0.00	-16,605,508.69
11	9,616.00	2.15	0.00	-18,266,059.55

Cuadro 104: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor liberador por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total liberado entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.91	7,334.41	-7,334.41	-17,870,558.07	-17,877,892.48
2	0.91	14,668.82	-14,668.82	-35,741,116.15	-35,755,784.97
3	0.91	22,003.23	-22,003.23	-53,611,674.22	-53,633,677.45
4	0.91	29,337.64	-29,337.64	-71,482,232.29	-71,511,569.93
5	0.91	36,672.04	-36,672.04	-89,352,790.37	-89,389,462.41
6	0.91	44,006.45	-44,006.45	-107,223,348.44	-107,267,354.90
7	0.91	51,340.86	-51,340.86	-125,093,906.52	-125,145,247.38
8	0.91	58,675.27	-58,675.27	-142,964,464.59	-143,023,139.86
9	0.91	66,009.68	-66,009.68	-160,835,022.66	-160,901,032.34
10	0.91	73,344.09	-73,344.09	-178,705,580.74	-178,778,924.83
11	0.91	80,678.50	-80,678.50	-196,576,138.81	-196,656,817.31

Cuadro 105: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	9,261.81	2,203.43	8.07
2	18,523.62	2,203.43	8.07
3	27,785.43	2,203.43	8.07
4	37,047.23	2,203.43	8.07
5	46,309.04	2,203.43	8.07
6	55,570.85	2,203.43	8.07
7	64,832.66	2,203.43	8.07
8	74,094.47	2,203.43	8.07
9	83,356.28	2,203.43	8.07
10	92,618.09	2,203.43	8.07
11	101,879.89	2,203.43	8.07

Análisis teórico de la Granja La Flor sin con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Cuadro 106: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	22.51	22.16	0.00	0.35
2	45.03	44.32	0.00	0.71
3	67.54	66.48	0.00	1.06
4	90.05	88.64	0.00	1.42
5	112.57	110.80	0.00	1.77
6	135.08	132.96	0.00	2.12
7	157.59	155.11	0.00	2.48
8	180.10	177.27	0.00	2.83
9	202.62	199.43	0.00	3.18
10	225.13	221.59	0.00	3.54
11	247.64	243.75	0.00	3.89

Cuadro 107: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	222.48	46.72	175.76
2	444.95	93.44	351.51
3	667.43	140.16	527.27
4	889.91	186.88	703.03
5	1,112.38	233.60	878.78
6	1,334.86	280.32	1,054.54
7	1,557.34	327.04	1,230.30
8	1,779.82	373.76	1,406.05
9	2,002.29	420.48	1,581.81
10	2,224.77	467.20	1,757.57
11	2,447.25	513.92	1,933.32

Cuadro 108: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	22.16	44.67	0.00	175.76	2.22
2	44.32	89.34	0.00	351.51	4.45
3	66.48	134.02	0.00	527.27	6.67
4	88.64	178.69	0.00	703.03	8.90
5	110.80	223.36	0.00	878.78	11.12
6	132.96	268.03	0.00	1,054.54	13.35
7	155.11	312.71	0.00	1,230.30	15.57
8	177.27	357.38	0.00	1,406.05	17.80
9	199.43	402.05	0.00	1,581.81	20.02
10	221.59	446.72	0.00	1,757.57	22.25
11	243.75	491.40	0.00	1,933.32	24.47

Cuadro 109: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	785.36	0.33	-0.0000480	-354,583.82
2	1,570.72	0.66	-0.0000959	-709,167.63
3	2,356.08	0.99	-0.0001439	-1,063,751.45
4	3,141.45	1.32	-0.0001918	-1,418,335.27
5	3,926.81	1.65	-0.0002398	-1,772,919.09
6	4,712.17	1.98	-0.0002877	-2,127,502.90
7	5,497.53	2.30	-0.0003357	-2,482,086.72
8	6,282.89	2.63	-0.0003836	-2,836,670.54
9	7,068.25	2.96	-0.0004316	-3,191,254.35
10	7,853.61	3.29	-0.0004795	-3,545,838.17
11	8,638.98	3.62	-0.0005275	-3,900,421.99

Cuadro 110: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	860.51	0.19	0.00	-1,370,764.62
2	1,721.03	0.39	0.00	-2,741,529.25
3	2,581.54	0.58	0.00	-4,112,293.87
4	3,442.06	0.77	0.00	-5,483,058.49
5	4,302.57	0.97	0.00	-6,853,823.12
6	5,163.08	1.16	0.00	-8,224,587.74
7	6,023.60	1.35	0.00	-9,595,352.36
8	6,884.11	1.55	0.00	-10,966,116.99
9	7,744.63	1.74	0.00	-12,336,881.61
10	8,605.14	1.93	0.00	-13,707,646.23
11	9,465.65	2.13	0.00	-15,078,410.86

Cuadro 111: Datos generales del calor liberado por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor liberador por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total liberado entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.91	7,244.03	-7,244.03	-17,870,558.07	-17,877,802.11
2	0.91	14,488.07	-14,488.07	-35,741,116.15	-35,755,604.21
3	0.91	21,732.10	-21,732.10	-53,611,674.22	-53,633,406.32
4	0.91	28,976.13	-28,976.13	-71,482,232.29	-71,511,208.43
5	0.91	36,220.16	-36,220.16	-89,352,790.37	-89,389,010.53
6	0.91	43,464.20	-43,464.20	-107,223,348.44	-107,266,812.64
7	0.91	50,708.23	-50,708.23	-125,093,906.52	-125,144,614.75
8	0.91	57,952.26	-57,952.26	-142,964,464.59	-143,022,416.85
9	0.91	65,196.30	-65,196.30	-160,835,022.66	-160,900,218.96
10	0.91	72,440.33	-72,440.33	-178,705,580.74	-178,778,021.06
11	0.91	79,684.36	-79,684.36	-196,576,138.81	-196,655,823.17

Cuadro 112: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja La Flor con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	9,145.21	2,228.03	8.16
2	18,290.41	2,228.03	8.16
3	27,435.62	2,228.03	8.16
4	36,580.83	2,228.03	8.16
5	45,726.04	2,228.03	8.16
6	54,871.24	2,228.03	8.16
7	64,016.45	2,228.03	8.16
8	73,161.66	2,228.03	8.16
9	82,306.86	2,228.03	8.16
10	91,452.07	2,228.03	8.16
11	100,597.28	2,228.03	8.16

Análisis teórico de la Granja Agua Blanca sin ningún tipo de filtro para el biogás.

Cuadro 113: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	34.46	19.97	14.15	0.34
2	68.93	39.93	28.30	0.69
3	103.39	59.90	42.46	1.03
4	137.86	79.87	56.61	1.38
5	172.32	99.84	70.76	1.72
6	206.78	119.80	84.91	2.07
7	241.25	139.77	99.07	2.41
8	275.71	159.74	113.22	2.76
9	310.18	179.70	127.37	3.10
10	344.64	199.67	141.52	3.45
11	379.10	219.64	155.67	3.79

Cuadro 114: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	202.26	42.47	159.78
2	404.51	84.95	319.56
3	606.77	127.42	479.35
4	809.02	169.89	639.13
5	1011.28	212.37	798.91
6	1213.53	254.84	958.69
7	1415.79	297.32	1118.47
8	1618.05	339.79	1278.26
9	1820.30	382.26	1438.04
10	2022.56	424.74	1597.82
11	2224.81	467.21	1757.60

Cuadro 115: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	34.12	40.28	0.34	159.78	2.02
2	68.24	80.56	0.69	319.56	4.05
3	102.36	120.84	1.03	479.35	6.07
4	136.48	161.12	1.38	639.13	8.09
5	170.60	201.39	1.72	798.91	10.11
6	204.72	241.67	2.07	958.69	12.14
7	238.84	281.95	2.41	1118.47	14.16
8	272.95	322.23	2.76	1278.26	16.18
9	307.07	362.51	3.10	1438.04	18.20
10	341.19	402.79	3.45	1597.82	20.23
11	375.31	443.07	3.79	1757.60	22.25

Cuadro 116: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	791.21	0.31	-0.0000432	-1,970,430.94
2	1,582.43	0.63	-0.0000864	-3,940,861.88
3	2,373.64	0.94	-0.0001296	-5,911,292.82
4	3,164.86	1.25	-0.0001728	-7,881,723.76
5	3,956.07	1.56	-0.0002160	-9,852,154.70
6	4,747.28	1.88	-0.0002593	-11,822,585.64
7	5,538.50	2.19	-0.0003025	-13,793,016.58
8	6,329.71	2.50	-0.0003457	-15,763,447.52
9	7,120.93	2.82	-0.0003889	-17,733,878.46
10	7,912.14	3.13	-0.0004321	-19,704,309.40
11	8,703.36	3.44	-0.0004753	-21,674,740.34

Cuadro 117: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	859.37	0.19	0.00	-2,901,993.97
2	1,718.73	0.38	0.00	-5,803,987.93
3	2,578.10	0.57	0.00	-8,705,981.90
4	3,437.46	0.76	0.00	-11,607,975.86
5	4,296.83	0.95	0.00	-14,509,969.83
6	5,156.19	1.14	0.00	-17,411,963.79
7	6,015.56	1.33	0.00	-20,313,957.76
8	6,874.93	1.52	0.00	-23,215,951.72
9	7,734.29	1.71	0.00	-26,117,945.69
10	8,593.66	1.90	0.00	-29,019,939.66
11	9,453.02	2.09	0.00	-31,921,933.62

Cuadro 118: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor absorbido por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.93	7,081.27	35,406.37	-16,204,109.99	-16,168,703.63
2	0.93	14,162.55	70,812.74	-32,408,219.99	-32,337,407.25
3	0.93	21,243.82	106,219.11	-48,612,329.98	-48,506,110.88
4	0.93	28,325.09	141,625.47	-64,816,439.97	-64,674,814.50
5	0.93	35,406.37	177,031.84	-81,020,549.97	-80,843,518.13
6	0.93	42,487.64	212,438.21	-97,224,659.96	-97,012,221.75
7	0.93	49,568.92	247,844.58	-113,428,769.96	-113,180,925.38
8	0.93	56,650.19	283,250.95	-129,632,879.95	-129,349,629.00
9	0.93	63,731.46	318,657.32	-145,836,989.94	-145,518,332.63
10	0.93	70,812.74	354,063.68	-162,041,099.94	-161,687,036.25
11	0.93	77,894.01	389,470.05	-178,245,209.93	-177,855,739.88

Cuadro 119: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca sin la utilización de ningún filtro

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	8,960.07	2,077.68	7.61
2	17,920.15	2,077.68	7.61
3	26,880.22	2,077.68	7.61
4	35,840.30	2,077.68	7.61
5	44,800.37	2,077.68	7.61
6	53,760.44	2,077.68	7.61
7	62,720.52	2,077.68	7.61
8	71,680.59	2,077.68	7.61
9	80,640.66	2,077.68	7.61
10	89,600.74	2,077.68	7.61
11	98,560.81	2,077.68	7.61

Análisis teórico de la Granja Agua Blanca sin con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Cuadro 120: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	34.46	19.97	14.15	0.34
2	68.93	39.93	28.30	0.69
3	103.39	59.90	42.46	1.03
4	137.86	79.87	56.61	1.38
5	172.32	99.84	70.76	1.72
6	206.78	119.80	84.91	2.07
7	241.25	139.77	99.07	2.41
8	275.71	159.74	113.22	2.76
9	310.18	179.70	127.37	3.10
10	344.64	199.67	141.52	3.45
11	379.10	219.64	155.67	3.79

Cuadro 121: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	200.53	42.11	158.42
2	401.07	84.22	316.84
3	601.60	126.34	475.26
4	802.13	168.45	633.68
5	1,002.66	210.56	792.10
6	1,203.20	252.67	950.52
7	1,403.73	294.78	1,108.94
8	1,604.26	336.89	1,267.37
9	1,804.79	379.01	1,425.79
10	2,005.33	421.12	1,584.21
11	2,205.86	463.23	1,742.63

Cuadro 122: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	34.12	40.28	0.00	158.42	2.01
2	68.24	80.56	0.00	316.84	4.01
3	102.36	120.84	0.00	475.26	6.02
4	136.48	161.12	0.00	633.68	8.02
5	170.60	201.39	0.00	792.10	10.03
6	204.72	241.67	0.00	950.52	12.03
7	238.84	281.95	0.00	1,108.94	14.04
8	272.95	322.23	0.00	1,267.37	16.04
9	307.07	362.51	0.00	1,425.79	18.05
10	341.19	402.79	0.00	1,584.21	20.05
11	375.31	443.07	0.00	1,742.63	22.06

Cuadro 123: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	785.20	0.31	-0.0000432	-1,956,805.62
2	1,570.39	0.62	-0.0000864	-3,913,611.24
3	2,355.59	0.93	-0.0001296	-5,870,416.87
4	3,140.79	1.25	-0.0001728	-7,827,222.49
5	3,925.99	1.56	-0.0002160	-9,784,028.11
6	4,711.18	1.87	-0.0002593	-11,740,833.73
7	5,496.38	2.18	-0.0003025	-13,697,639.36
8	6,281.58	2.49	-0.0003457	-15,654,444.98
9	7,066.77	2.80	-0.0003889	-17,611,250.60
10	7,851.97	3.12	-0.0004321	-19,568,056.22
11	8,637.17	3.43	-0.0004753	-21,524,861.84

Cuadro 124: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	852.87	0.19	0.00	-2,872,067.21
2	1,705.75	0.38	0.00	-5,744,134.41
3	2,558.62	0.57	0.00	-8,616,201.62
4	3,411.49	0.76	0.00	-11,488,268.82
5	4,264.37	0.95	0.00	-14,360,336.03
6	5,117.24	1.13	0.00	-17,232,403.23
7	5,970.12	1.32	0.00	-20,104,470.44
8	6,822.99	1.51	0.00	-22,976,537.65
9	7,675.86	1.70	0.00	-25,848,604.85
10	8,528.74	1.89	0.00	-28,720,672.06
11	9,381.61	2.08	0.00	-31,592,739.26

Cuadro 125: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor absorbido por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.93	7,029.46	35,147.32	-16,108,920.60	-16,073,773.28
2	0.93	14,058.93	70,294.65	-32,217,841.20	-32,147,546.55
3	0.93	21,088.39	105,441.97	-48,326,761.80	-48,221,319.83
4	0.93	28,117.86	140,589.30	-64,435,682.40	-64,295,093.10
5	0.93	35,147.32	175,736.62	-80,544,603.00	-80,368,866.38
6	0.93	42,176.79	210,883.94	-96,653,523.59	-96,442,639.65
7	0.93	49,206.25	246,031.27	-112,762,444.19	-112,516,412.93
8	0.93	56,235.72	281,178.59	-128,871,364.79	-128,590,186.20
9	0.93	63,265.18	316,325.91	-144,980,285.39	-144,663,959.48
10	0.93	70,294.65	351,473.24	-161,089,205.99	-160,737,732.75
11	0.93	77,324.11	386,620.56	-177,198,126.59	-176,811,506.03

Cuadro 126: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	8,897.50	2,079.70	7.61
2	17,794.99	2,079.70	7.61
3	26,692.49	2,079.70	7.61
4	35,589.98	2,079.70	7.61
5	44,487.48	2,079.70	7.61
6	53,384.98	2,079.70	7.61
7	62,282.47	2,079.70	7.61
8	71,179.97	2,079.70	7.61
9	80,077.46	2,079.70	7.61
10	88,974.96	2,079.70	7.61
11	97,872.46	2,079.70	7.61

Análisis teórico de la Granja Agua Blanca sin con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Cuadro 127: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	25.46	19.97	5.15	0.34
2	50.92	39.93	10.30	0.69
3	76.39	59.90	15.45	1.03
4	101.85	79.87	20.60	1.38
5	127.31	99.84	25.75	1.72
6	152.77	119.80	30.90	2.07
7	178.24	139.77	36.05	2.41
8	203.70	159.74	41.20	2.76
9	229.16	179.70	46.35	3.10
10	254.62	199.67	51.51	3.45
11	280.08	219.64	56.66	3.79

Cuadro 128: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	222.48	42.11	158.42
2	444.95	84.22	316.84
3	667.43	126.34	475.26
4	889.91	168.45	633.68
5	1,112.38	210.56	792.10
6	1,334.86	252.67	950.52
7	1,557.34	294.78	1,108.94
8	1,779.82	336.89	1,267.37
9	2,002.29	379.01	1,425.79
10	2,224.77	421.12	1,584.21
11	2,447.25	463.23	1,742.63

Cuadro 129: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	25.12	40.28	0.00	158.42	2.01
2	50.24	80.56	0.00	316.84	4.01
3	75.35	120.84	0.00	475.26	6.02
4	100.47	161.12	0.00	633.68	8.02
5	125.59	201.39	0.00	792.10	10.03
6	150.71	241.67	0.00	950.52	12.03
7	175.82	281.95	0.00	1,108.94	14.04
8	200.94	322.23	0.00	1,267.37	16.04
9	226.06	362.51	0.00	1,425.79	18.05
10	251.18	402.79	0.00	1,584.21	20.05
11	276.29	443.07	0.00	1,742.63	22.06

Cuadro 130: Parámetros para la determinación del C_p para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m^3/s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K^2)	D ($mol \cdot K^2$)
1	736.07	0.30	-0.0000432	-915,311.16
2	1,472.15	0.60	-0.0000864	-1,830,622.32
3	2,208.22	0.91	-0.0001296	-2,745,933.48
4	2,944.30	1.21	-0.0001728	-3,661,244.64
5	3,680.37	1.51	-0.0002160	-4,576,555.80
6	4,416.45	1.81	-0.0002593	-5,491,866.96
7	5,152.52	2.11	-0.0003025	-6,407,178.12
8	5,888.60	2.42	-0.0003457	-7,322,489.28
9	6,624.67	2.72	-0.0003889	-8,237,800.44
10	7,360.75	3.02	-0.0004321	-9,153,111.60
11	8,096.82	3.32	-0.0004753	-10,068,422.76

Cuadro 131: Parámetros para la determinación del C_p para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m^3/s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K^2)	D ($mol \cdot K^2$)
1	803.75	0.18	0.00	-1,830,572.74
2	1,607.50	0.36	0.00	-3,661,145.49
3	2,411.25	0.54	0.00	-5,491,718.23
4	3,215.01	0.72	0.00	-7,322,290.97
5	4,018.76	0.90	0.00	-9,152,863.72
6	4,822.51	1.08	0.00	-10,983,436.46
7	5,626.26	1.26	0.00	-12,814,009.20
8	6,430.01	1.44	0.00	-14,644,581.94
9	7,233.76	1.62	0.00	-16,475,154.69
10	8,037.52	1.80	0.00	-18,305,727.43
11	8,841.27	1.98	0.00	-20,136,300.17

Cuadro 132: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor absorbido por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.93	6,707.06	33,535.28	-16,108,920.60	-16,075,385.32
2	0.93	13,414.11	67,070.56	-32,217,841.20	-32,150,770.64
3	0.93	20,121.17	100,605.84	-48,326,761.80	-48,226,155.96
4	0.93	26,828.22	134,141.12	-64,435,682.40	-64,301,541.28
5	0.93	33,535.28	167,676.40	-80,544,603.00	-80,376,926.60
6	0.93	40,242.34	201,211.68	-96,653,523.59	-96,452,311.92
7	0.93	46,949.39	234,746.96	-112,762,444.19	-112,527,697.24
8	0.93	53,656.45	268,282.24	-128,871,364.79	-128,603,082.56
9	0.93	60,363.50	301,817.52	-144,980,285.39	-144,678,467.88
10	0.93	67,070.56	335,352.79	-161,089,205.99	-160,753,853.20
11	0.93	73,777.61	368,888.07	-177,198,126.59	-176,829,238.51

Cuadro 133: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 20%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	8,479.98	2,168.84	7.94
2	16,959.97	2,168.84	7.94
3	25,439.95	2,168.84	7.94
4	33,919.94	2,168.84	7.94
5	42,399.92	2,168.84	7.94
6	50,879.91	2,168.84	7.94
7	59,359.89	2,168.84	7.94
8	67,839.88	2,168.84	7.94
9	76,319.86	2,168.84	7.94
10	84,799.85	2,168.84	7.94
11	93,279.83	2,168.84	7.94

Análisis teórico de la Granja Agua Blanca sin con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Cuadro 134: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	22.57	19.97	2.26	0.34
2	45.14	39.93	4.52	0.69
3	67.71	59.90	6.78	1.03
4	90.29	79.87	9.04	1.38
5	112.86	99.84	11.30	1.72
6	135.43	119.80	13.56	2.07
7	158.00	139.77	15.82	2.41
8	180.57	159.74	18.08	2.76
9	203.14	179.70	20.34	3.10
10	225.71	199.67	22.60	3.45
11	248.29	219.64	24.86	3.79

Cuadro 135: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	200.53	42.11	158.42
2	401.07	84.22	316.84
3	601.60	126.34	475.26
4	802.13	168.45	633.68
5	1,002.66	210.56	792.10
6	1,203.20	252.67	950.52
7	1,403.73	294.78	1,108.94
8	1,604.26	336.89	1,267.37
9	1,804.79	379.01	1,425.79
10	2,005.33	421.12	1,584.21
11	2,205.86	463.23	1,742.63

Cuadro 136: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	22.23	40.28	0.00	158.42	2.01
2	44.45	80.56	0.00	316.84	4.01
3	66.68	120.84	0.00	475.26	6.02
4	88.91	161.12	0.00	633.68	8.02
5	111.13	201.39	0.00	792.10	10.03
6	133.36	241.67	0.00	950.52	12.03
7	155.59	281.95	0.00	1,108.94	14.04
8	177.81	322.23	0.00	1,267.37	16.04
9	200.04	362.51	0.00	1,425.79	18.05
10	222.27	402.79	0.00	1,584.21	20.05
11	244.50	443.07	0.00	1,742.63	22.06

Cuadro 137: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digester de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	720.30	0.30	-0.0000432	-580,848.59
2	1,440.60	0.60	-0.0000864	-1,161,697.19
3	2,160.90	0.90	-0.0001296	-1,742,545.78
4	2,881.20	1.20	-0.0001728	-2,323,394.38
5	3,601.50	1.50	-0.0002160	-2,904,242.97
6	4,321.80	1.79	-0.0002593	-3,485,091.56
7	5,042.10	2.09	-0.0003025	-4,065,940.16
8	5,762.40	2.39	-0.0003457	-4,646,788.75
9	6,482.70	2.69	-0.0003889	-5,227,637.35
10	7,203.00	2.99	-0.0004321	-5,808,485.94
11	7,923.30	3.29	-0.0004753	-6,389,334.53

Cuadro 138: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	787.98	0.18	0.00	-1,496,110.18
2	1,575.95	0.35	0.00	-2,992,220.36
3	2,363.93	0.53	0.00	-4,488,330.53
4	3,151.91	0.71	0.00	-5,984,440.71
5	3,939.88	0.88	0.00	-7,480,550.89
6	4,727.86	1.06	0.00	-8,976,661.07
7	5,515.84	1.24	0.00	-10,472,771.24
8	6,303.81	1.41	0.00	-11,968,881.42
9	7,091.79	1.59	0.00	-13,464,991.60
10	7,879.77	1.77	0.00	-14,961,101.78
11	8,667.74	1.94	0.00	-16,457,211.95

Cuadro 139: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor absorbido por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.93	6,603.52	33,017.59	-16,108,920.60	-16,075,903.01
2	0.93	13,207.04	66,035.18	-32,217,841.20	-32,151,806.01
3	0.93	19,810.56	99,052.78	-48,326,761.80	-48,227,709.02
4	0.93	26,414.07	132,070.37	-64,435,682.40	-64,303,612.03
5	0.93	33,017.59	165,087.96	-80,544,603.00	-80,379,515.03
6	0.93	39,621.11	198,105.55	-96,653,523.59	-96,455,418.04
7	0.93	46,224.63	231,123.15	-112,762,444.19	-112,531,321.05
8	0.93	52,828.15	264,140.74	-128,871,364.79	-128,607,224.05
9	0.93	59,431.67	297,158.33	-144,980,285.39	-144,683,127.06
10	0.93	66,035.18	330,175.92	-161,089,205.99	-160,759,030.07
11	0.93	72,638.70	363,193.51	-177,198,126.59	-176,834,933.08

Cuadro 140: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 10%

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	8,345.60	2,199.42	8.05
2	16,691.21	2,199.42	8.05
3	25,036.81	2,199.42	8.05
4	33,382.42	2,199.42	8.05
5	41,728.02	2,199.42	8.05
6	50,073.63	2,199.42	8.05
7	58,419.23	2,199.42	8.05
8	66,764.84	2,199.42	8.05
9	75,110.44	2,199.42	8.05
10	83,456.05	2,199.42	8.05
11	91,801.65	2,199.42	8.05

Análisis teórico de la Granja Agua Blanca sin con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Cuadro 141: Flujo molar del biogás de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de biogás (mol/s)	Flujo molar de metano (mol/s)	Flujo molar de dióxido de carbono	Flujo molar de sulfuro de hidrógeno (mol/s)
1	20.31	19.97	0.00	0.34
2	40.62	39.93	0.00	0.69
3	60.94	59.90	0.00	1.03
4	81.25	79.87	0.00	1.38
5	101.56	99.84	0.00	1.72
6	121.87	119.80	0.00	2.07
7	142.18	139.77	0.00	2.41
8	162.49	159.74	0.00	2.76
9	182.81	179.70	0.00	3.10
10	203.12	199.67	0.00	3.45
11	223.43	219.64	0.00	3.79

Cuadro 142: Flujo molar del aire de entrada en el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de aire (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno
1	200.53	42.11	158.42
2	401.07	84.22	316.84
3	601.60	126.34	475.26
4	802.13	168.45	633.68
5	1,002.66	210.56	792.10
6	1,203.20	252.67	950.52
7	1,403.73	294.78	1,108.94
8	1,604.26	336.89	1,267.37
9	1,804.79	379.01	1,425.79
10	2,005.33	421.12	1,584.21
11	2,205.86	463.23	1,742.63

Cuadro 143: Flujo molar gases en la salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Flujo molar de dióxido de carbono (mol/s)	Flujo molar de vapor de agua (mol/s)	Flujo molar de dióxido de azufre (mol/s)	Flujo molar de nitrógeno (mol/s)	Flujo molar de oxígeno (mol/s)
1	19.97	40.28	0.00	158.42	2.01
2	39.93	80.56	0.00	316.84	4.01
3	59.90	120.84	0.00	475.26	6.02
4	79.87	161.12	0.00	633.68	8.02
5	99.84	201.39	0.00	792.10	10.03
6	119.80	241.67	0.00	950.52	12.03
7	139.77	281.95	0.00	1,108.94	14.04
8	159.74	322.23	0.00	1,267.37	16.04
9	179.70	362.51	0.00	1,425.79	18.05
10	199.67	402.79	0.00	1,584.21	20.05
11	219.64	443.07	0.00	1,742.63	22.06

Cuadro 144: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de entrada el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	707.97	0.30	-0.0000432	-319,395.23
2	1,415.94	0.59	-0.0000864	-638,790.45
3	2,123.91	0.89	-0.0001296	-958,185.68
4	2,831.87	1.19	-0.0001728	-1,277,580.90
5	3,539.84	1.48	-0.0002160	-1,596,976.13
6	4,247.81	1.78	-0.0002593	-1,916,371.35
7	4,955.78	2.08	-0.0003025	-2,235,766.58
8	5,663.75	2.37	-0.0003457	-2,555,161.80
9	6,371.72	2.67	-0.0003889	-2,874,557.03
10	7,079.68	2.97	-0.0004321	-3,193,952.25
11	7,787.65	3.26	-0.0004753	-3,513,347.48

Cuadro 145: Parámetros para la determinación del Cp para los gases de salida el sistema de combustión para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	A (mol)	B (mol/K)	C (mol/K ²)	D (mol·K ²)
1	775.65	0.17	0.00	-1,234,656.81
2	1,551.29	0.35	0.00	-2,469,313.62
3	2,326.94	0.52	0.00	-3,703,970.43
4	3,102.58	0.70	0.00	-4,938,627.24
5	3,878.23	0.87	0.00	-6,173,284.04
6	4,653.87	1.05	0.00	-7,407,940.85
7	5,429.52	1.22	0.00	-8,642,597.66
8	6,205.16	1.39	0.00	-9,877,254.47
9	6,980.81	1.57	0.00	-11,111,911.28
10	7,756.45	1.74	0.00	-12,346,568.09
11	8,532.10	1.92	0.00	-13,581,224.90

Cuadro 146: Datos generales del calor absorbido por los reactivos para llevarlos a la temperatura de referencia y calor liberado durante el proceso de combustión, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%.

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Relación de temperatura, τ	Cp promedio de los gases de entrada (J/K)	Calor absorbido por los gases de entrada (J)	Calor liberado durante la reacción (J)	Calor total entre gases de entrada y proceso de combustión (J)
1	0.93	6,522.58	32,612.91	-16,108,920.60	-16,076,307.69
2	0.93	13,045.16	65,225.82	-32,217,841.20	-32,152,615.38
3	0.93	19,567.75	97,838.73	-48,326,761.80	-48,228,923.07
4	0.93	26,090.33	130,451.64	-64,435,682.40	-64,305,230.76
5	0.93	32,612.91	163,064.55	-80,544,603.00	-80,381,538.45
6	0.93	39,135.49	195,677.46	-96,653,523.59	-96,457,846.14
7	0.93	45,658.07	228,290.37	-112,762,444.19	-112,534,153.82
8	0.93	52,180.66	260,903.28	-128,871,364.79	-128,610,461.51
9	0.93	58,703.24	293,516.19	-144,980,285.39	-144,686,769.20
10	0.93	65,225.82	326,129.10	-161,089,205.99	-160,763,076.89
11	0.93	71,748.40	358,742.01	-177,198,126.59	-176,839,384.58

Cuadro 147: Datos generales del calor absorbido por los gases de salida para llevarlos a desde temperatura de referencia a su temperatura final, para el análisis teórico del biogás salido del digestor de la Granja Agua Blanca con filtro de sulfuro de hidrógeno y reducción de dióxido de carbono hasta un 0%

Flujo Volumétrico de biogás (m ³ /s)	Cp promedio de los gases de salida (J/K)	Temperatura final de los gases de salida (K)	Relación de temperatura, τ
1	8,240.45	2,224.05	8.14
2	16,480.91	2,224.05	8.14
3	24,721.36	2,224.05	8.14
4	32,961.82	2,224.05	8.14
5	41,202.27	2,224.05	8.14
6	49,442.72	2,224.05	8.14
7	57,683.18	2,224.05	8.14
8	65,923.63	2,224.05	8.14
9	74,164.09	2,224.05	8.14
10	82,404.54	2,224.05	8.14
11	90,645.00	2,224.05	8.14

J. Registro gráfico de los sistemas de biodigestión.

1. Granja La Flor.

Figura 18: Tanque de captación del digestor anaerobio de la Granja La Flor



Figura 19: Sistema de conducción de las aguas residuales hacia el tanque de captación de la Granja La Flor.



Figura 20: Consistencia del material alimentado al digestor anaerobio de la Granja La Flor.



Figura 21: Cuerpo principal del digestor anaerobio de la Granja La Flor.



Figura 22: Salida de biogás en el digestor anaerobio de la Granja La Flor.



Figura 23: Tanque de descarga (efluente) del digestor anaerobio de la Granja La Flor.



Figura 24: Rebalse del efluente del digestor anaerobio de la Granja La Flor.



Figura 25: Trampa de agua para el biogás saliente del digestor anaerobio de la Granja La Flor.



Figura 26: Sistema de escape para el biogás del digestor anaerobio de la Granja La Flor.



Figura 27: Filtro de sulfuro de hidrógeno para el biogás del digestor anaerobio de la Granja La Flor.



2. Granja Agua Blanca.

Figura 28: Tanque de captación del digestor anaerobio de la Granja Agua Blanca.



Figura 29: Vista del digester anaerobio de la Granja Agua Blanca desde el punto de localización del tanque de captación.



Figura 30: Salida del biogás del digester anaerobio de la Granja Agua Blanca.



Figura 31: Tanque de descarga (efluente) del digester anaerobio de la Granja Agua Blanca.



Figura 32: Rebalse del tanque de descarga (efluente) del digestor anaerobio de la Granja Agua Blanca.



Figura 33: Conducción desde el tanque de estabilización hacia la segunda pileta de estabilización, en la Granja Agua Blanca.



Figura 34: Conducción desde la segunda pileta de estabilización hacia campos aledaños a la Granja Agua Blanca.



Figura 35: Distribución del biogás del digestor anaerobio de la Granja Agua Blanca hacia dos granjas de consumo.



Figura 36: Trampa de agua para el biogás consumido en la Granja Agua Blanca.



Figura 37: Filtro de sulfuro de hidrógeno para el biogás consumido en la Granja Agua Blanca.



3. Quemadores de biogás.

Figura 38: Quemador utilizado para la calefacción de lechones en los corrales de levante.



Figura 39: Quemador de biogás en operación.



Figura 40: Aplicación de calor por medio de los quemadores de biogás a los lechones.



K. Características geográficas de la ubicación de las dos granjas de interés.

Cuadro 148: Características geográficas de la Granja La Flor

Característica	Descripción
Ubicación	Km 94.5 Carretera Antigua Guatemala – Escuintla
Departamento	Sacatepéquez
Altitud	909 m sobre el nivel del mar
Punto de referencia	Cercano al Autódromo Pedro Cofiño
Presión atmosférica	87,997.1 Pa

Figura 41: Vista satelital de ubicación de la Granja La Flor.

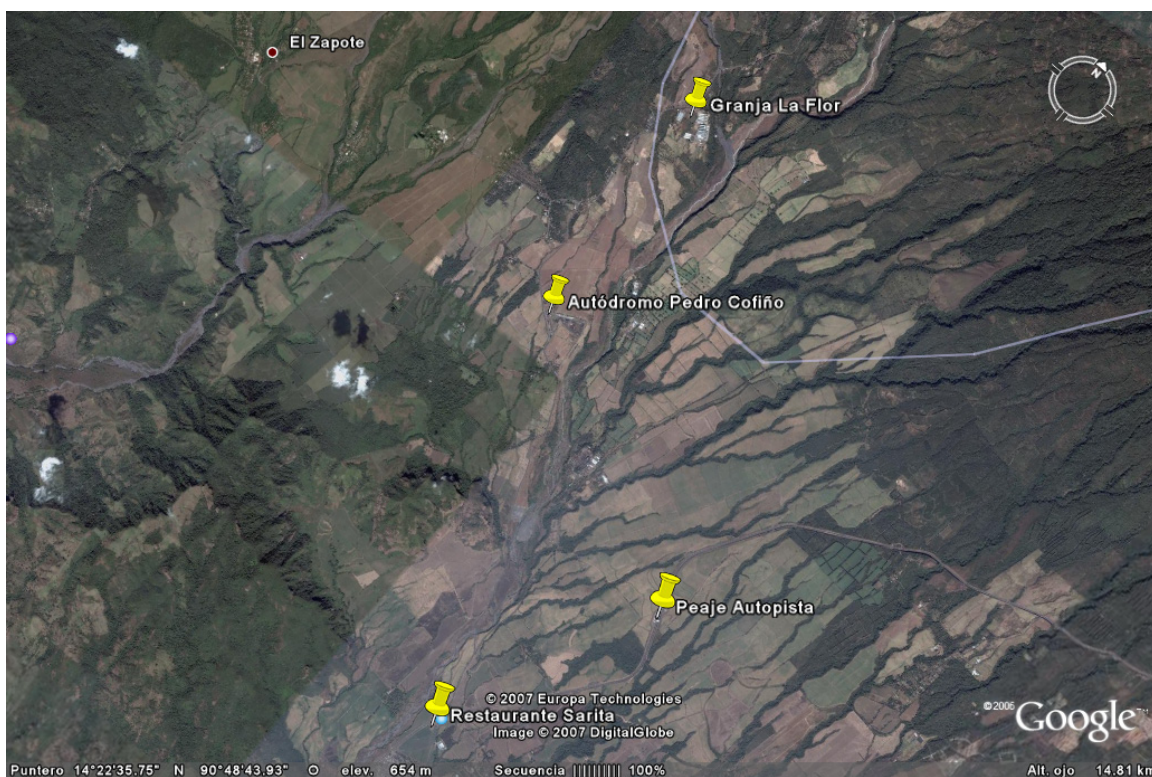


Figura 42: Vista satelital de la distribución de los corrales dentro de la Granja La Flor.



Cuadro 149: Características geográficas de la Granja Agua Blanca

Característica	Descripción
Ubicación	Inmediaciones de San Luis Pueblo Nuevo, Sacatepéquez
Departamento	Chimaltenango (en la frontera entre Chimaltenango y Sacatepéquez)
Altitud	1,725 m sobre el nivel del mar
Punto de referencia	Se ingresa en el cruce hacia la Granja Experimental Bejo
Presión atmosférica	83,997.2 Pa

Figura 43: Mapa de la ubicación de San Luis Pueblo Nuevo

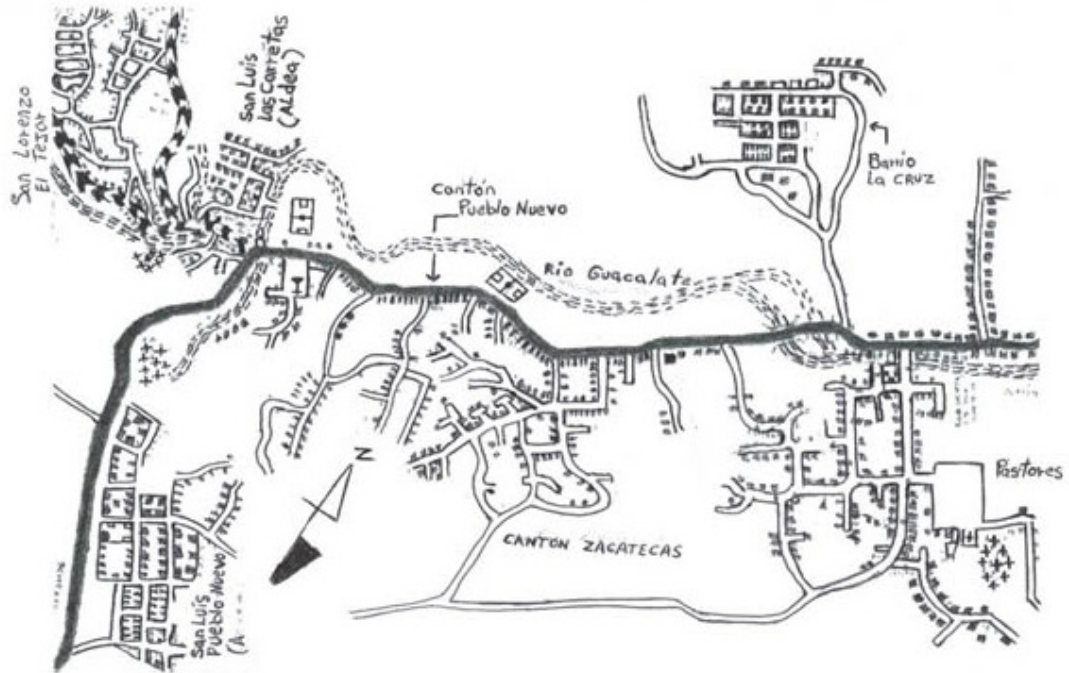


Figura 44: Vista satelital de la ubicación de la Granja Agua Blanca

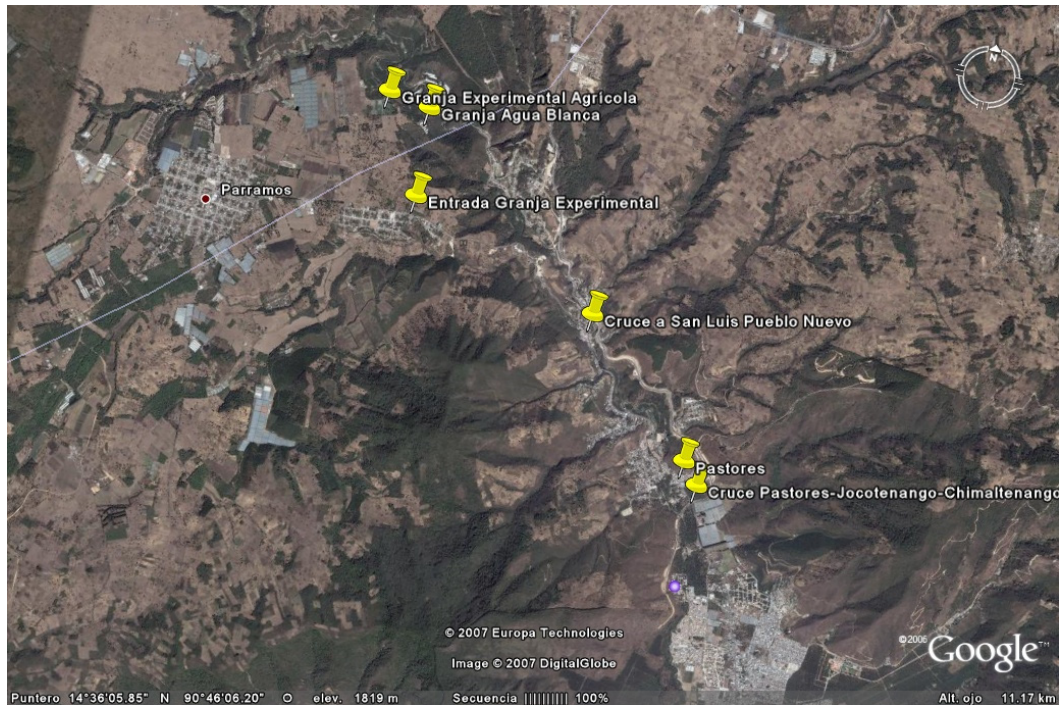


Figura 45: Vista satelital de la distribución de galerías en la Granja Agua Blanca

