

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA  
INTEGRAL PARA EL TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DEL  
POTENCIAL ENERGÉTICO Y FERTILIZANTE DE LAS EXCRETAS HUMANAS  
Y ANIMALES EN UNA VIVIENDA RURAL**

**WEIMAR EGIDIO TIRADO GALEANO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA  
INTEGRAL PARA EL TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DEL  
POTENCIAL ENERGÉTICO Y FERTILIZANTE DE LAS EXCRETAS HUMANAS  
Y ANIMALES EN UNA VIVIENDA RURAL**

**WEIMAR EGIDIO TIRADO GALEANO**

**Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**JULIAN ERNESTO JARAMILLO IBARRA**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

## DEDICATORIA

*A mí amado hijo J.J.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al creador, por la salud y vida.

A mis amados padres Stella y Egidio, su incondicional apoyo ha hecho posible la consecución de este logro.

A mis abuelos Isabel y Juan José, por su cariño, compañía y ayuda.

A mis hermanitas Karen e Isabella, llenan mi vida de alegría y optimismo.

A Yayita por su amor, paciencia y colaboración; a sus padres, hermanos, tíos y abuela por acogerme en su hogar y extenderme la mano cuando lo necesité.

A mis tías y primos, por los buenos momentos.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	22
1. FORMULACIÓN .....	23
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	23
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA .....	24
1.3 OBJETIVOS .....	25
1.3.1 Objetivo general.....	25
1.3.2 Objetivos específicos .....	25
2. SANEAMIENTO .....	27
2.1 TÉCNICAS DE SANEAMIENTO EN LA ACTUALIDAD .....	29
2.1.1 Descarga y flujo por cañería.....	29
2.1.2 Descarga y depósito.....	31
2.2 ESTADO DEL SANEAMIENTO EN EL MUNDO .....	32
2.3 ESTADO DEL SANEAMIENTO EN COLOMBIA.....	34
2.4 SANEAMIENTO ECOLÓGICO: SANITARIO SECO.....	37
2.4.1 Orina .....	40
2.4.2 Heces .....	42
3. FERMENTACIÓN ANAERÓBICA.....	49
3.1 BIOGÁS.....	49
3.1.1 Generación del biogás .....	50
3.1.2 Factores que afectan la producción de biogás.....	51
3.2 FERTILIZANTE .....	55

<b>3.3</b>	<b>BIODIGESTOR.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Clasificación según flujo.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Aspectos operacionales.....</b>	<b>59</b>
<b>3.4</b>	<b>LÍNEA DE TRANSPORTE DEL BIOGÁS .....</b>	<b>62</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Caída de presión en la tubería.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Longitud total tramo de tubería.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Diámetro de la tubería .....</b>	<b>63</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Espesor de la tubería.....</b>	<b>64</b>
<b>3.4.5</b>	<b>Material de la tubería .....</b>	<b>64</b>
<b>3.5</b>	<b>QUEMADOR .....</b>	<b>66</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Intercambiabilidad de gases.....</b>	<b>66</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Combustión del biogás .....</b>	<b>71</b>
<b>3.6</b>	<b>DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD Y ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS.....</b>	<b>78</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Válvula de seguridad.....</b>	<b>78</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Antorcha .....</b>	<b>78</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Arresta llamas .....</b>	<b>79</b>
<b>3.6.4</b>	<b>Filtro para sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).....</b>	<b>80</b>
<b>3.6.5</b>	<b>Filtro para dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) .....</b>	<b>81</b>
<b>3.6.6</b>	<b>Trampa de agua .....</b>	<b>82</b>
<b>3.7</b>	<b>NORMATIVIDAD.....</b>	<b>84</b>
<b>4.</b>	<b>PRESENTACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLA EL PROYECTO.....</b>	<b>86</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DEL LUGAR .....</b>	<b>86</b>
<b>4.2</b>	<b>DISTRIBUCIÓN DEL PREDIO .....</b>	<b>86</b>

<b>4.3</b>	<b>CONDICIONES PRELIMINARES .....</b>	<b>87</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Saneamiento .....</b>	<b>87</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Combustible para cocción de alimentos .....</b>	<b>88</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Fertilización de cultivos .....</b>	<b>89</b>
<b>5.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN: PLANTEAMIENTO, EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS .....</b>	<b>90</b>
<b>5.1</b>	<b>DISPOSICIÓN DEL SISTEMA .....</b>	<b>90</b>
<b>5.2</b>	<b>PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS .....</b>	<b>90</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Alternativas para sanitario seco.....</b>	<b>90</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Alternativas para biodigestor .....</b>	<b>90</b>
<b>5.3</b>	<b>EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.....</b>	<b>92</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Requerimientos del consumidor .....</b>	<b>92</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Requerimientos de diseño del producto .....</b>	<b>92</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Matriz de calidad.....</b>	<b>93</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Ponderación de alternativas .....</b>	<b>93</b>
<b>5.4</b>	<b>ALTERNATIVAS GANADORAS.....</b>	<b>97</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Sanitario con doble cámara y calentador solar .....</b>	<b>97</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Biodigestor de membrana tubular.....</b>	<b>99</b>
<b>6.</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA .....</b>	<b>101</b>
<b>6.1</b>	<b>UBICACIÓN .....</b>	<b>101</b>
<b>6.2</b>	<b>DISEÑO DEL SANITARIO SECO .....</b>	<b>102</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Materia prima .....</b>	<b>102</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Elementos del sanitario seco .....</b>	<b>103</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Materiales estructurales.....</b>	<b>106</b>

6.2.4	Dimensionamiento de la cámara de recolección y almacenamiento de orina.....	108
6.2.5	Dimensionamiento de las cámaras de recolección, deshidratación y almacenamiento de heces .....	108
6.2.6	Mecanismo para deshidratación de las heces .....	109
6.3	DISEÑO DEL BIODIGESTOR.....	111
6.3.1	Dimensionamiento de la zanja y la geomembrana flexible tubular.....	111
6.3.2	Características de la geomembrana flexible tubular .....	115
6.3.3	Tanques de carga y descarga.....	117
6.3.4	Válvula de seguridad .....	118
6.4	CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS PRODUCIDO.....	119
6.5	SELECCIÓN DE LA TUBERÍA PARA TRANSPORTE DEL BIOGÁS .	124
6.5.1	Material .....	124
6.5.2	Longitud .....	124
6.5.3	Diámetro interno .....	125
6.5.4	Espesor.....	128
6.5.5	Acondicionadores del biogás.....	128
6.6	ADAPTACIÓN DEL QUEMADOR .....	130
7.	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA.....	131
8.	PUESTA EN MARCHA Y RESULTADOS DEL SISTEMA .....	137
8.1	PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR, LINEA DE TRANSPORTE Y ESTUFA PARA CONSUMO DEL BIOGÁS. ....	137
8.1.1	Alimentación del biodigestor.....	138
8.1.2	Producción de biogás .....	139

8.1.3	Disponibilidad energética .....	146
8.1.4	Producción de fertilizante .....	147
8.2	PUESTA EN MARCHA DEL SANITARIO SECO .....	149
8.3	RESUMEN DE RESULTADOS .....	150
8.4	ANALISIS DE RESULTADOS .....	150
8.4.1	Biogás.....	150
8.4.2	Fertilizante.....	152
9.	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.....	153
10.	IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DEL PROYECTO .....	158
10.1	IMPACTO AMBIENTAL .....	158
10.2	IMPACTO SOCIAL.....	158
11.	CONCLUSIONES.....	160
	CITAS BIBLIOGRÁFICAS .....	162
	BIBLIOGRAFÍA.....	166
	ANEXOS.....	172

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vías de transmisión de agentes patógenos encontrados en las excretas.....	28
Figura 2. Descarga y flujo por cañería.....	29
Figura 3. Aguas negras superficiales.....	30
Figura 4. Descarga y depósito.....	31
Figura 5. Contaminación de agua subterránea por filtración desde fosa séptica..	32
Figura 6. Evolución en cobertura de saneamiento en el mundo.....	33
Figura 7. Municipios con planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).....	35
Figura 8. Fuente que recibe la descarga de aguas residuales.....	36
Figura 9. Municipios que hacen descargas en una o más fuentes de agua.....	36
Figura 10. Acceso al agua y al saneamiento.....	37
Figura 11. Taza para sanitario seco.....	39
Figura 12. Esquema de sanitario seco.....	40
Figura 13. Etapas para la generación de biogás a partir de materia orgánica.....	50
Figura 14. Incidencia del nitrógeno, fósforo y potasio en la planta.....	56
Figura 15. Biodigestor de flujo discontinuo tipo “Olade – Guatemala”.....	57
Figura 16. Influencia de la temperatura sobre el tiempo de retención del estiércol.....	61
Figura 17. Diámetro de tubería recomendado.....	65

Figura 18. Quemador casero.....	67
Figura 19. Velocidad de llama como una función de la concentración de dióxido de carbono y porcentaje de metano en el aire.....	73
Figura 20. Límites de flamabilidad como una función de la concentración de metano y vapor de agua.....	74
Figura 21. Temperatura teórica de llama como una función de la concentración de metano y vapor de agua.....	75
Figura 22. Poder calorífico inferior como una función de la concentración de metano y vapor de agua.....	76
Figura 23. Válvula de seguridad.....	79
Figura 24. Arresta llamas.....	80
Figura 25. Filtro para sulfuro de hidrógeno.....	81
Figura 26. Filtro para dióxido de carbono.....	82
Figura 27. Trampa de agua.....	83
Figura 28. Eliminación del condensado de la trampa de agua.....	83
Figura 29. Ubicación de fuentes de agua, excretas y sistemas de cocción.....	87
Figura 30. Saneamiento en la vivienda.....	88
Figura 31. Disposición del sistema.....	91
Figura 32. “Empujador” hacia el colector con calentador solar.....	98
Figura 33. Sanitario seco con doble cámara y calentador solar.....	98
Figura 34. Biodigestor de membrana tubular.....	100
Figura 35. Ubicación seleccionada para el sistema.....	101
Figura 36. Producción semanal de orina.....	102

Figura 37. Producción semanal de heces fecales humanas.....	103
Figura 38. Gasto semanal de agua para saneamiento.....	103
Figura 39. Inodoro seco.....	104
Figura 40. Empujador de heces.....	105
Figura 41. Sistema recolector de agua lluvia.....	105
Figura 42. Material vegetal para bahareque.....	106
Figura 43. Sanitario seco.....	107
Figura 44. Mecanismo para la deshidratación de las heces.....	110
Figura 45. Geomembrana montada en la zanja.....	111
Figura 46. Perfil transversal de la geomembrana.....	114
Figura 47. Tanque de carga.....	117
Figura 48. Válvula de seguridad.....	118
Figura 49. Gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert.....	122
Figura 50. Trampa de agua.....	129
Figura 51. Filtro para sulfuro de hidrógeno.....	129
Figura 52. Inflado de la geomembrana.....	137
Figura 53. Llenado de la geomembrana con agua.....	138
Figura 54. Toma de muestra de biogás para ser analizada.....	139
Figura 55. Llama conseguida tras el ajuste del inyector y la lumbrera.....	140
Figura 56. Válvula de seguridad.....	141
Figura 57. Consumo diario de biogás.....	145
Figura 58. Producción de biogás.....	145

Figura 59. Fertilizante procesado por el biodigestor.....148

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características epidemiológicas de los patógenos excretados.....	28
Tabla 2. Porcentaje de hogares por tipo de servicio sanitario en Colombia.....	34
Tabla 3. Condiciones ambientales que estimulan la muerte de los patógenos....	39
Tabla 4. Excreción de nutrientes per cápita por año en Sur África.....	41
Tabla 5. Tiempos de almacenamiento recomendados para la orina.....	43
Tabla 6. Sistemas sanitarios basados en la deshidratación.....	44
Tabla 7. Sistemas sanitarios basados en la descomposición.....	47
Tabla 8. Composición usual del biogás.....	49
Tabla 9. Fase térmica y tiempos de retención típicos.....	52
Tabla 10. Relación C/N materias primas empleadas corrientemente (aproximación).....	53
Tabla 11. Porcentaje en masa de sólidos totales en algunos sustratos.....	54
Tabla 12. Concentración inhibidora de inhibidores comunes.....	55
Tabla 13. Biodigestores comunes de flujo semicontinuo.....	58
Tabla 14. Características de los estiércoles de ganado porcino y vacuno.....	60
Tabla 15. Velocidad de generación a igual temperatura usando materiales comunes.....	61
Tabla 16. Constantes de Pole para cálculo de pérdida de presión.....	63
Tabla 17. Relación longitud/diámetro para accesorios de tubería.....	64

Tabla 18. Ventajas y desventajas de materiales de tuberías para transporte de biogás.....	66
Tabla 19. Clasificación de los gases.....	68
Tabla 20. Propiedades de gases de combustión.....	71
Tabla 21. Equivalencia del biogás con otros combustibles.....	72
Tabla 22. Diámetro de orificio multiplicador para aparatos de gas.....	77
Tabla 23. Características geográficas del lugar.....	86
Tabla 24. Matriz de calidad.....	94
Tabla 25. Ponderación de alternativas para sanitario seco.....	95
Tabla 26. Ponderación de alternativas para biodigestor.....	96
Tabla 27. Comportamiento de relación la relación L/D y área superficial al variar r.....	116
Tabla 28. Dimensiones de la geomembrana.....	116
Tabla 29. Dimensiones de la zanja.....	117
Tabla 30. Resultados cromatografía del biogás producido.....	119
Tabla 31. Propiedades de los componentes del biogás producido.....	123
Tabla 32. Longitud equivalente de los accesorios de la tubería para 3 diámetros.....	125
Tabla 33. Pérdidas de presión para 3 diámetros de tubería.....	127
Tabla 34. Construcción del sistema.....	131
Tabla 35. Cantidad de biogás en el tiempo.....	142
Tabla 36. Producción de biogás entre días.....	144
Tabla 37. Consumo de biogás durante el ensayo.....	146

Tabla 38. Composición NPK del fertilizante líquido.....	148
Tabla 39. NPK en heces humanas.....	149
Tabla 40. NPK en orina humana.....	149
Tabla 41. Generalidades del biogás producido.....	150
Tabla 42. Generalidades del fertilizante producido.....	150
Tabla 43. Costo anual sin proyecto.....	153
Tabla 44. Costos materiales.....	154
Tabla 45. Costo mano de obra.....	155
Tabla 46. Costos análisis en laboratorio.....	155
Tabla 47. Inversión inicial del proyecto.....	155
Tabla 48. Costo anual de insumos para mantenimiento.....	155
Tabla 49. Costo anual de productos no cubiertos por el sistema.....	156
Tabla 50. Costo anual con proyecto.....	156

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXOS A. COMPLEMENTO MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>172</b>
<b>ANEXOS B. PLANOS.....</b>	<b>183</b>
<b>ANEXOS C. ANÁLISIS EN LABORATORIO DEL BIOGÁS Y EL FERTILIZANTE.....</b>	<b>201</b>
<b>ANEXOS D. MACRONUTRIENTES EN HECES Y ORINA HUMANA.....</b>	<b>206</b>
<b>ANEXO E. CARTILLA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....</b>	<b>209</b>

## RESUMEN

**TITULO:** DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA INTEGRAL PARA EL TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y FERTILIZANTE DE LAS EXCRETAS HUMANAS Y ANIMALES EN UNA VIVIENDA RURAL\*

**AUTOR:** WEIMAR EGIDIO TIRADO GALEANO†

**PALABRAS CLAVES:** Saneamiento, Sanitario seco, Fermentación anaeróbica, Biodigestor, Fertilizante, Biogás.

### **CONTENIDO:**

El cuidado del agua, enriquecimiento de los suelos y disponibilidad energética son aspectos de gran importancia para la calidad de vida de las comunidades rurales; el presente trabajo está motivado por ello y se desarrolla en el vivero “la fuente” de Los Santos, Santander.

Por un lado, se implementa un sanitario seco como medida alternativa de saneamiento, con la capacidad de operar sin requerimientos de agua y la facultad de transformar las excretas humanas en fertilizante rico en macronutrientes. La estructura del sanitario se elaboró usando materiales del entorno, buscando minimizar costos e impacto ambiental; incluye: techo verde, paredes en bahareque y sistema para recolección de agua lluvia.

Por otro lado, se integra un biodigestor de membrana tubular para procesar mediante fermentación anaeróbica las heces de los animales domésticos, produciendo fertilizante líquido de fácil absorción y biogás para cocción de alimentos. Por tubería de PVC se trasporta el biogás hasta la vivienda para el consumo, previa limpieza mediante condensación del vapor de agua y disminución de los niveles de sulfuro de hidrógeno con accesorios construidos para tal fin. La quema adecuada del biogás se consigue al adaptar el orificio de un inyector convencional de gas natural.

El sistema promete tener muy buena aceptación debido al ahorro de gas y fertilizante, también por la conservación de un importante volumen de agua para consumo, en un sitio caracterizado por las prolongadas épocas secas y la consecuente escasez del líquido.

---

\* Proyecto de grado

† Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Julian Ernesto Jaramillo Ibarra

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN , CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF A COMPREHENSIVE SYSTEM FOR TREATMENT AND UTILIZATION OF ENERGY POTENTIAL AND FERTILIZER EXCRETA HUMAN AND ANIMAL IN A RURAL HOUSING\*

**AUTOR:** WEIMAR EGIDIO TIRADO GALEANO†

**KEYWORDS:** Sanitation, Dry Sanitation, Anaerobic fermentation, Biodigestor, Manure, Biogas.

### **CONTENTS:**

The water conservation, soil enrichment and energy availability are issues of great importance to the quality of life of rural communities; The present work is motivated by it is developed in the farm "la fuente" of Los Santos, Santander.

On the one hand, a dry toilet sanitation is installed as an alternative measure, with the ability to operate without water requirements and the power to transform human waste into fertilizer rich in macronutrients is implemented. The structure of toilet was made using materials from the environment, by seeking to minimize costs and environmental impact; including: green roof, adobe walls and system for rainwater harvesting.

On the other hand, a tubular membrane digester is applied to process feces of domestic animals by anaerobic fermentation, producing easily absorbed liquid fertilizer and biogas for cooking. By PVC pipe biogas is transported to the house to eat, pre-cleaning by condensation of water vapor and decreased levels of hydrogen sulfide with purpose-built accessories. Proper burning of biogas is achieved by adapting the injector hole of a conventional natural gas.

The system promises to be very well received because of saving gas and fertilizer, also for the preservation of a significant volumen of water for consumption, on a site characterized by prolonged dry spells and consequent water scarcity.

---

\* Graduation project

† Faculty of Physical and mechanical engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Engineer. Julian Ernesto Jaramillo Ibarra

## INTRODUCCIÓN

El desabastecimiento de agua y alimentos que padece gran parte de la población humana ha sido resultado de las malas prácticas en el manejo de los recursos naturales; la contaminación indiscriminada de las fuentes hídricas, polución del aire, depredación de los bosques y sobreexplotación de los suelos son el reflejo de una sociedad insostenible.

Las tecnologías actuales deben estar dirigidas a mitigar, o al menos no incrementar dichos problemas; disminuir la dependencia de las fuentes no renovables de energía y sustituir paulatinamente los productos muy procesados por aquellos que se pueden obtener directamente de la naturaleza, son decisiones que prometen aportar al mejoramiento de nuestra calidad de vida y del entorno.

Con seguridad, las decisiones que las personas tomen ahora sobre su estilo de vida serán las que definan el futuro de su descendencia y el de las especies que habitan el planeta.

## **1. FORMULACIÓN**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El vivero La Fuente se encuentra ubicado en el sector rural del municipio de los Santos Santander, la zona carece de sistema de acueducto y alcantarillado, el agua para consumo de las personas es obtenida de pozo subterráneo que se carga durante los cortos periodos de lluvia, las aguas negras son almacenadas en pozo séptico; a pesar de la escases de agua en el sitio, se contamina gran cantidad de líquido en saneamiento, adicionalmente, las aguas negras son depositadas a escasos metros de la fuente subterránea de agua para consumo posibilitando la contaminación y posterior ingesta de patógenos por parte de las personas.

Los cítricos son el cultivo predominante en el predio, para garantizar buena producción se aplican nutrientes al suelo, la mayoría son producidos en el sitio mediante compostaje y transformación en lombrinaza, sin embargo, los requerimientos de nitrógeno, fósforo y potasio no logran ser perfectamente cubiertos, por lo tanto se requiere acceder a estos nutrientes mediante la compra de sustratos sintéticos; el costo de estos sustratos es elevado, dan muy buenos resultados a corto plazo, pero con el tiempo reduce la calidad de los suelos y las características saludables de los frutos.

Por otro lado, el alto precio del GLP incentiva el uso de la madera como fuente energética para cocción en la vivienda, dicha práctica además de generar efectos negativos en la salud de los usuarios produce degradación permanente del medio ambiente.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA**

El objetivo primordial de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, es fomentar el desarrollo social y económico de la comunidad, en consecuencia, se presenta esta propuesta de diseño, construcción, y puesta en marcha de un sistema integral formado por:

- Sanitario seco, en el cual se llevará a cabo la deposición, adaptación y almacenamiento de las excretas humanas para su posterior uso como fertilizante.
- Biodigestor, realizará el tratamiento de las heces de los animales, produciendo biogás y fertilizante orgánico.

La implementación de este sistema mejorará la calidad de vida de los usuarios ya que impactará positivamente en 3 aspectos fundamentales.

### **Impacto económico**

El proyecto generará un importante ahorro de dinero, ya que se conseguirá suplir parcialmente la demanda de combustible para los procesos de cocción en la vivienda y fertilizante para aporte a los cultivos.

Además, la sustitución del sanitario tradicional por el seco, elimina por completo el gasto de agua a través de este medio, dicho gasto puede llegar a ser desde 11 hasta 20 litros por descarga para un sanitario de diseño antiguo.

### **Impacto social**

Sustituyendo la leña como medio tradicional de combustión en la zona rural, por biogás, disminuirán las emisiones de humo causantes de alteraciones a la salud, como irritabilidad de las mucosas y enfermedades crónicas en las vías respiratorias producto de la continua exposición.

El fertilizante producido restituirá al suelo los macronutrientes de forma natural, para obtener cosechas orgánicas de altos valores nutritivos y saludables.

## **Impacto ambiental**

No se contaminará agua para la evacuación de excretas desde el sanitario.

Se eliminará el uso pozos sépticos, o el vertimiento de excretas sin tratamiento alguno al medio ambiente.

El proceso al que se someten las excretas en el sistema mitigará su potencial contaminante de fuentes hídricas y del aire.

Se incentivará la agricultura orgánica, brindando sostenibilidad ambiental a largo plazo, al eliminar el uso de fertilizantes sintéticos causantes de contaminación de las corrientes de agua y erosión del suelo.

## **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo general.** Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander de liderar procesos de cambio por el progreso y mejora de la calidad de vida de la comunidad, a través del diseño, construcción y evaluación de un sistema para la producción y aprovechamiento de biogás y fertilizante, mediante el tratamiento de excretas (materia fecal y orina) de origen humano y animal, en una vivienda del sector rural del municipio de Los Santos Santander.

### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Llevar a cabo el diseño, fabricación, montaje y puesta en marcha de:
  - Sanitario seco

- Biodigestor tipo membrana tubular con capacidad de carga diaria de 20 Kg de materia fecal fresca de porcinos.
- Línea de transporte de gas desde biodigestor hasta vivienda
- Quemador de gas
- Realizar análisis de composición al fertilizante y cromatografía de gases al biogás para evaluar la calidad de los productos con miras a elaborar el estudio de costo/beneficio del proyecto.
- Diseñar una cartilla de orientación al usuario en el uso y mantenimiento del sistema.

## 2. SANEAMIENTO

El *saneamiento* ambiental básico es el conjunto de acciones técnicas y socioeconómicas de salud pública que tienen por objetivo alcanzar niveles crecientes de salubridad ambiental. Comprende el manejo sanitario del agua potable, las aguas residuales, los residuos orgánicos tales como las excretas y residuos alimenticios, los residuos sólidos y el comportamiento higiénico que reduce los riesgos para la salud y previene la contaminación. Tiene por finalidad la promoción y el mejoramiento de condiciones de vida urbana y rural [1].

Según el doctor LEE Jong-wook, Director general de la Organización Mundial de la Salud (2003-2006): "El agua y el saneamiento son uno de los principales motores de la salud pública. Suelo referirme a ellos como «Salud 101», lo que significa que en cuanto se pueda garantizar el acceso al agua salubre y a instalaciones sanitarias adecuadas para todos, independientemente de la diferencia de sus condiciones de vida, se habrá ganado una importante batalla contra todo tipo de enfermedades" [2].

Las excretas humanas, principalmente las heces fecales, contienen gran cantidad de patógenos que al ser liberados al medio ambiente exponen a las personas y animales del entorno a contraerlos y desarrollar un gran número de enfermedades, se encuentran cuatro tipos de organismos perjudiciales para los humanos: bacterias, virus, protozoarios y lombrices [3] (Tabla 1). Su transmisión se da fundamentalmente por las manos, comida, terreno, moscas y animales domésticos (Figura 1).

Para evitar que los patógenos se propaguen es necesario disponer de ciertas medidas de contención evitando la contaminación del entorno, a ello deben estar encaminadas las prácticas del saneamiento.

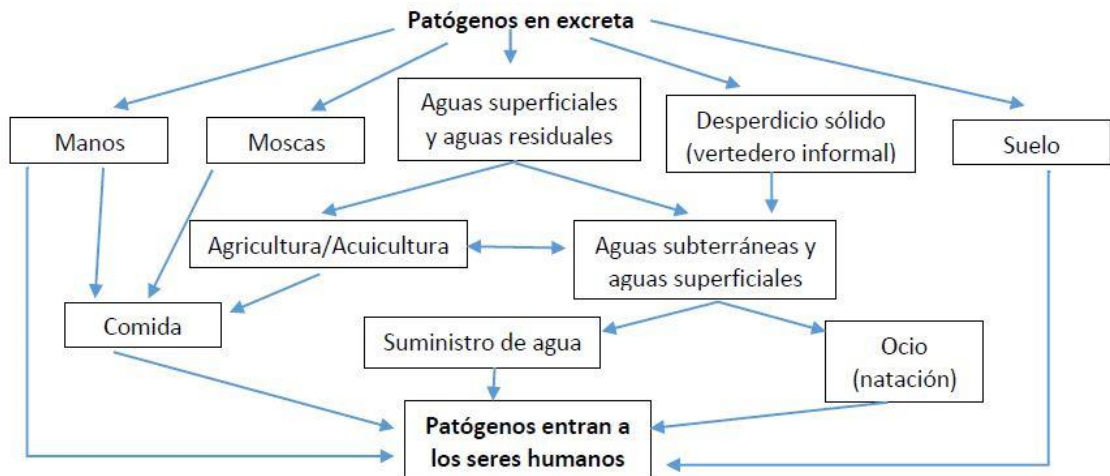
Tabla 1. Características epidemiológicas de los patógenos excretados

Patógeno <sup>a</sup>	Periodo de latencia	ID <sub>50</sub> <sup>b</sup>	Tiempo de supervivencia de patógenos		
			Aguas residuales	Suelo	Cultivos
Bacteria	0	>10 <sup>4</sup>	pocos días a 3 meses		
<i>Vibrio cholerae</i>	0	~ 10 <sup>8</sup>	~ 1 mes	< 3 semanas	< 5 días
Coliformes fecales	0	~ 10 <sup>9</sup>	~ 3 meses	< 2 meses	< 1 mes
Virus	0	desconocido	meses	meses	1-2 meses
Enterovirus <sup>c</sup>	0	100	~ 3 meses	< 3 meses	< 2 meses
Protozoos	0	10-100	algunos días a algunas semanas		
<i>Entamoeba spp</i>	0	10-100	25 días	< 3 semanas	< 10 días
Helmintos <sup>d</sup>	variable	1-100	meses	meses	meses
<i>Ancylostoma spp</i>	1 semana	1	3 meses	< 3 meses	< 1 mes
<i>Ascaris spp</i>	10 días	varios	~ 1 año	muchos meses	< 3 meses
Trematodos <sup>e</sup>	6-8 semanas	varios	vida de anfitrión <sup>f</sup>	horas <sup>f</sup>	horas <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Fuentes: Feachem et al. (1983); WHO (1987a)  
<sup>b</sup> ID<sub>50</sub>: número de organismos requeridos para causar desarrollo de síntomas clínicos en 50% de individuos  
<sup>c</sup> Incluido coxsackievirus, echovirus y poliovirus  
<sup>d</sup> Huevos de larvas cercarias  
<sup>e</sup> Excluyendo *Fasciola hepatica* pero incluyendo *Schistosoma spp*  
<sup>f</sup> Fuera del huésped acuático el patógeno sobrevive unas horas, en el huésped vive el tiempo de vida de éste

Fuente: Organización Mundial de la Salud. A Guide to the Development of on-site Sanitation. 1992.

Figura 1. Vías de transmisión de agentes patógenos encontrados en las excretas



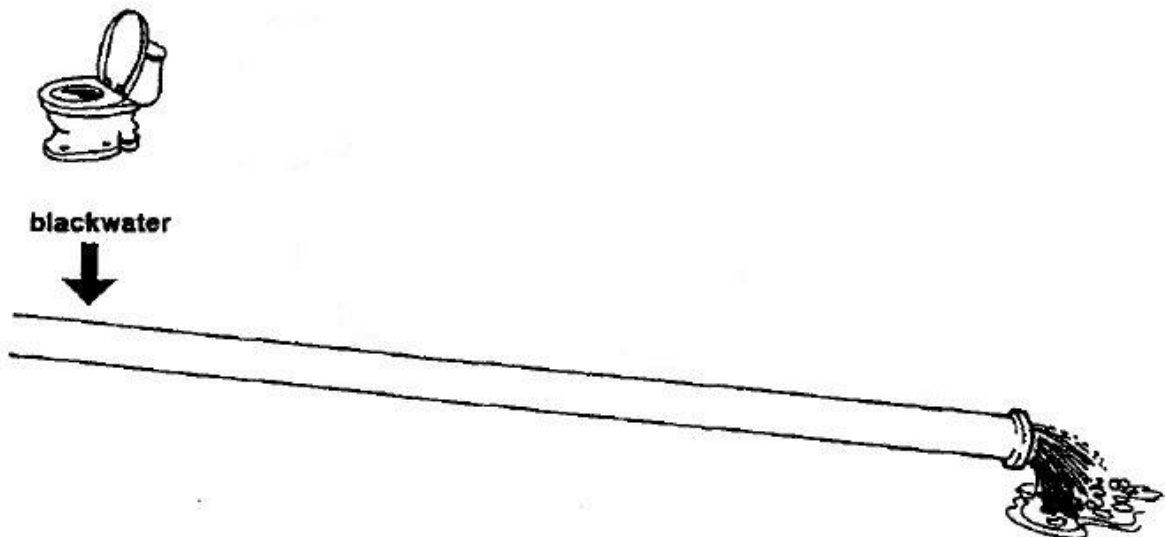
Fuente: Organización Mundial de la Salud. A Guide to the Development of on-site Sanitation. 1992.

## 2.1 TÉCNICAS DE SANEAMIENTO EN LA ACTUALIDAD

El saneamiento en la actualidad está dominado por 2 técnicas, la de *descarga y flujo por cañería* y la de *descarga y depósito* [3].

**2.1.1 Descarga y flujo por cañería.** Es considerado el sistema “ideal” ya que evacua la excreta transportándola desde el sanitario por red de cañería (Figura 2) hasta un sitio alejado de la vivienda donde finalmente es tratada en plantas construidas para tal fin, cuando esta técnica es implementada adecuadamente logra una destrucción razonable de patógenos.

Figura 2. Descarga y flujo por cañería



Fuente: SREY, Steven, *et al.* SANEAMIENTO ECOLÓGICO. Estocolmo: Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo / Fundación Friedrich Ebert, 1999. p. 2. Modificado por el autor.

A pesar de la tendencia general hacia la implementación de este sistema, no resulta ser del todo viable, debido a la contaminación de grandes volúmenes de agua (generalmente potable) durante el transporte de las excretas y el posterior costo de tratamiento para entregar al ambiente agua en condiciones aceptables. Éste último aspecto de tipo económico ha ocasionado que en la mayoría de los casos se genere un gran volumen de descarga de aguas negras, vertidas directamente al ambiente sin tratamiento alguno (Figura 3).

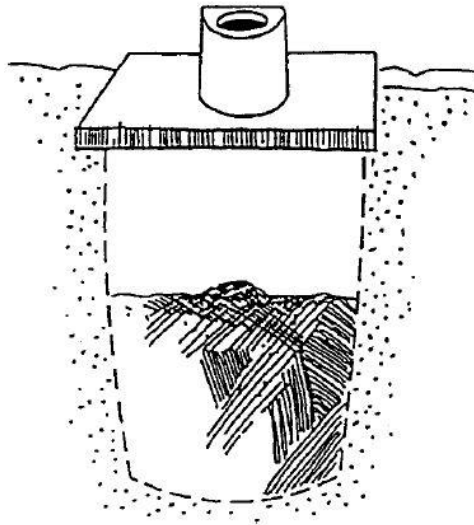
Figura 3. Aguas negras superficiales



Fuente: Organización Mundial de la Salud. *Trabajando juntos para derrotar al cólera* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <[http://www.who.int/features/2012/sierra\\_leone\\_cholera/photo\\_story/es/index1.html](http://www.who.int/features/2012/sierra_leone_cholera/photo_story/es/index1.html)>.

**2.1.2 Descarga y depósito.** Es el sistema de saneamiento más común en el mundo, consiste en almacenar indefinidamente las excretas humanas, no requiere grandes cantidades de agua para crear flujos, pero si, ciertas características del terreno donde se excava: suelo que pueda ser cavado, nivel profundo de los mantos acuíferos y no presentar problemas de inundaciones en el sitio (Figura 4).

Figura 4. Descarga y depósito



Fuente: SREY, Steven, *et al.* SANEAMIENTO ECOLÓGICO. Estocolmo: Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo / Fundación Friedrich Ebert, 1999. p. 3.

Ésta suele ser la alternativa para aquellos que no pueden acceder al sistema de descarga y flujo por cañería, representa una solución temporal más económica.

Dentro de las múltiples desventajas de éste sistema se encuentra: contaminación de agua y mantos acuíferos, malos olores, proliferación de moscas, saturación del depósito, desestabilización de cimientos cercanos y el riesgo de inundación en temporales intensos (Figura 5).

Figura 5. Contaminación de agua subterránea por filtración desde fosa séptica



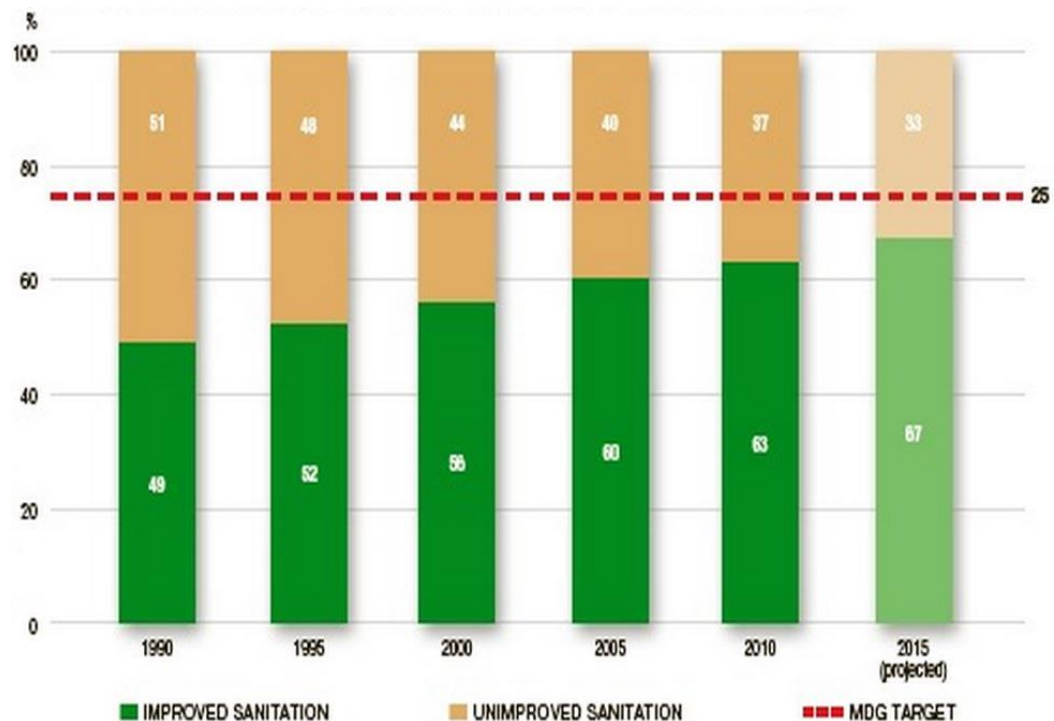
Fuente: Miliarium.com. *Contaminación de las aguas* [en línea]. [Fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <<http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Nitratos/ContaminacionAgua.asp>>.

## 2.2 ESTADO DEL SANEAMIENTO EN EL MUNDO

Según el Programa conjunto de seguimiento para el abastecimiento de agua y saneamiento de la OMS/UNICEF, el 37% de la población de los países en desarrollo (2.500 millones de personas) carecen de instalaciones mejoradas de saneamiento,

de ellos, 1000 millones no tienen ninguna instalación en absoluto y se ven obligadas a la arriesgada y humillante práctica de la defecación al aire libre. El acceso insuficiente al agua potable y los servicios sanitarios, provoca la enfermedad y muerte de miles de niños y niñas todos los días y conduce al empobrecimiento y a la reducción de las oportunidades para miles de personas más [4]. En la Figura 6 se presenta la evolución en cobertura de saneamiento en el mundo durante los últimos 20 años y la tendencia para el año 2015 por debajo de la meta de MDG (Objetivos de Desarrollo del Milenio de la ONU)

Figura 6. Evolución en cobertura de saneamiento en el mundo



Fuente: UNICEF. *Cobertura de agua y saneamiento* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <[http://www.unicef.org/spanish/wash/index\\_statistics.html](http://www.unicef.org/spanish/wash/index_statistics.html)>.

### 2.3 ESTADO DEL SANEAMIENTO EN COLOMBIA

En Colombia la mayor parte de los hogares que cuentan con inodoro conectado a alcantarillado se encuentran concentrados en las cabeceras urbanas. En la zona rural predomina la conexión de inodoro a pozo séptico (Tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje de hogares por tipo de servicio sanitario en Colombia

		Hogares con inodoro conectado a alcantarillado	Hogares con inodoro conectado a pozo séptico	Hogares con inodoro sin conexión	Hogares sin servicio sanitario	Otros*	Total
Total nacional	2012	74,5	16,9	2,6	4,1	1,9	100
	2013	75,2	16,0	3,5	3,9	1,4	100
Cabecera	2012	91,7	5,9	0,8	1,0	0,6	100
	2013	91,9	5,4	1,2	1,1	0,4	100
Resto	2012	13,8	55,8	8,8	15,2	6,4	100
	2013	14,7	54,7	11,7	14,0	4,8	100

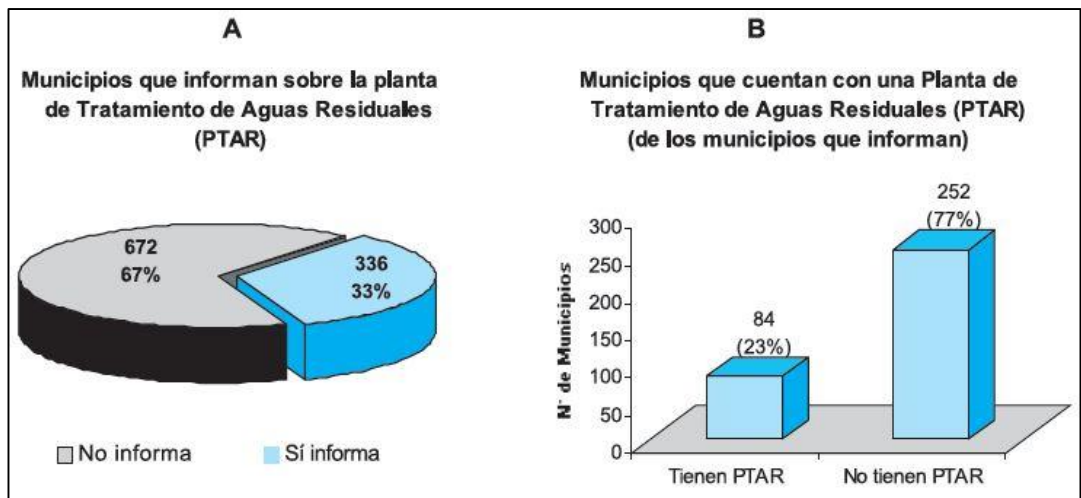
\*Otros: hogares con letrina, hogares con bajamar, no informa

Fuente: ENCUESTA NACIONAL DE CALIDAD DE VIDA 2013 (ECV) [en línea]. DANE, marzo de 2014 [fecha de consulta: octubre 2 de 2014]. Disponible en: <<http://www.dane.gov.co/index.php/es/estadisticas-sociales/calidad-de-vidaecv/87-sociales/calidad-de-vida/5399-encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-2013>>.

Según informe de la Procuraduría General de la Nación y UNICEF- Colombia [5], tras analizar 1008 planes de desarrollo municipales, solo 336 hacen diagnóstico sobre planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), los restantes no incluyen el tema en sus planes (Figura 7A). De los 336 municipios que informan, solo 84

(23%) tienen planta para mitigar el impacto de aguas residuales en el ambiente (Figura 7B).

Figura 7. Municipios con planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)

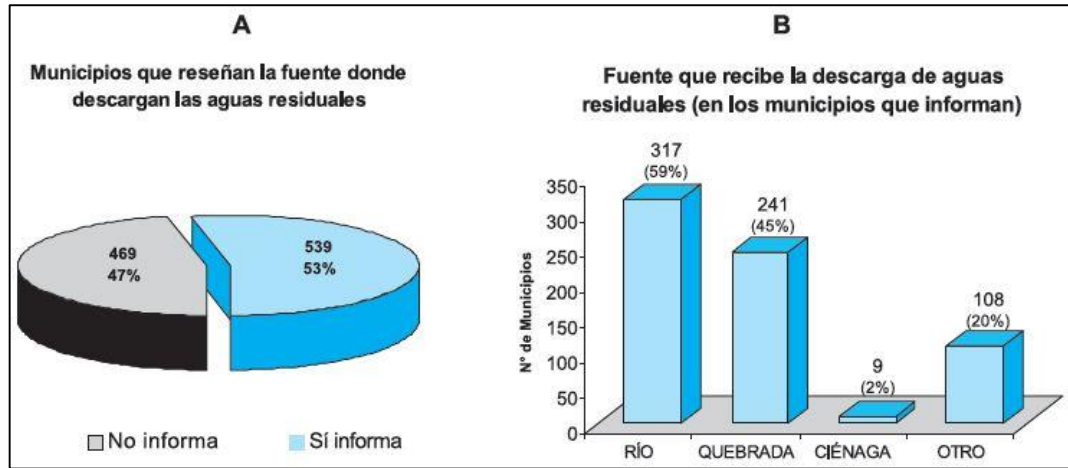


Fuente: PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN Y UNICEF-COLOMBIA. III El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. Capítulo 1: El estado del agua, alcantarillado y residuos sólidos en los municipios. 2006, p. 47.

Otro aspecto documentado corresponde al tipo de fuente que recibe la descarga de aguas residuales, de los 1008 planes de desarrollo analizados 469 (46%) no hacen referencia (Figura 8A), de los municipios que reportan, la mayoría descargan estas aguas en ríos (Figura 8B).

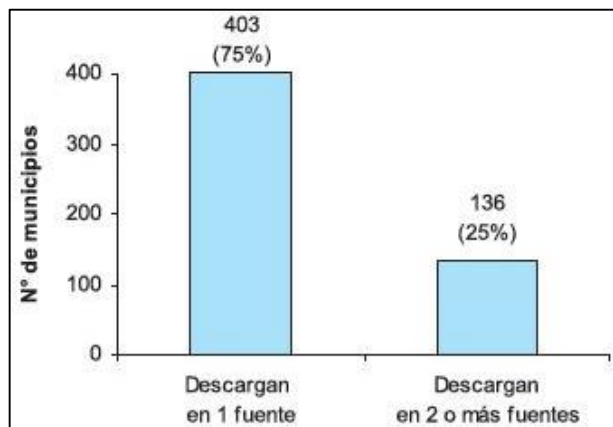
Posiblemente un mismo municipio realice descargas de aguas residuales en una o más fuentes al mismo tiempo, por lo cual la suma de los municipios reseñados en la Figura 8 puede resultar mayor al número de municipios que reportan (Figura 9).

Figura 8. Fuente que recibe la descarga de aguas residuales



Fuente: PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN Y UNICEF-COLOMBIA. III El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. Capítulo 1: El estado del agua, alcantarillado y residuos sólidos en los municipios. 2006, p. 49.

Figura 9. Municipios que hacen descargas en una o más fuentes de agua



Fuente: PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN Y UNICEF-COLOMBIA. III El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. Capítulo 1: El estado del agua, alcantarillado y residuos sólidos en los municipios. 2006, p. 49.

## 2.4 SANEAMIENTO ECOLÓGICO: SANITARIO SECO

Las técnicas de saneamiento actuales son ineficientes, ya que su proceso implica la contaminación directa o indirecta de agua limpia (Figura 10), y requiere de procedimientos complejos y costosos para devolver parcialmente las características originales del líquido, el cual deja de ser incompatible con el medio ambiente; esto constituye un mecanismo de disminución rápida del agua potable disponible.

Figura 10. Acceso al agua y al saneamiento



Fuente: OBSERVATORIO DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESPAÑA (OSE). *El acceso al agua* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 2 de 2014]. Disponible en: [http://193.146.56.6/Observatorio+Sostenibilidad/esp/plataformas/agua/escolar/acceso\\_agua/](http://193.146.56.6/Observatorio+Sostenibilidad/esp/plataformas/agua/escolar/acceso_agua/).

Las características fundamentales del *saneamiento ecológico* son: la prevención de la contaminación y las enfermedades causadas por la excreta humana; el considerar a la excreta como recurso y no desperdicio, y la recuperación de nutrientes. En la naturaleza, la excreta humana y la de otros animales juega un papel esencial para la conformación de suelos sanos y nutritivos que las plantas aprovechan. En un enfoque convencional de saneamiento, estos nutrientes se desechan y se ubican mal, lo que rompe el ciclo natural [3].

El *sanitario seco* es un sistema que no necesita agua para la evacuación de la orina y el excremento.

Dicho sanitario debe enfocarse como una solución ecológica fundamental dentro del ciclo de saneamiento, pues sigue los principios de:

- Sanidad: previene enfermedades y promueve la salud, al brindar un ambiente hostil frente a los patógenos (Tabla 3).
- Verde: protege el medio ambiente y conserva el agua, ya que no necesita de esta para su funcionamiento.
- Productividad: recupera, recicla y aporta nutrientes.

El sanitario seco, a diferencia de una letrina, es una técnica que permite utilizar los desechos como abono para el suelo y neutralizar la capacidad contaminante de las heces [6].

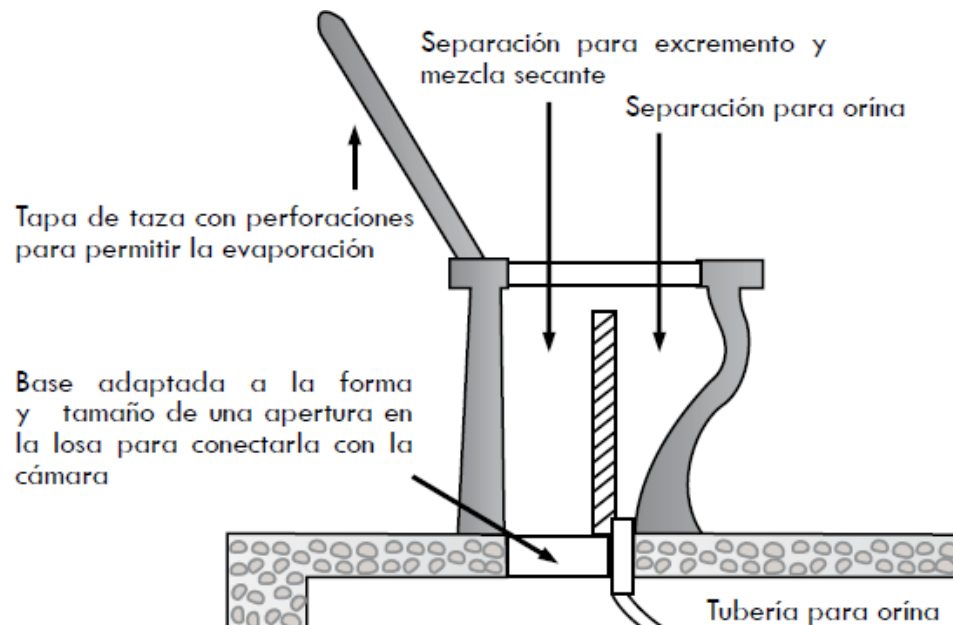
Su función es la separación de los desechos sólidos y líquidos, a menudo se emplea una taza con división para la orina y las heces (Figura 11), la orina se conduce mediante manguera a un recipiente, mientras que los desechos sólidos caen a su respectivo depósito (Figura 12) y deben cubrirse con una mezcla de tierra, ceniza o cal luego de cada uso.

Tabla 3. Condiciones ambientales que estimulan la muerte de los patógenos

Factores ambientales	Cómo
Temperatura	Incremento de temperatura
Humedad	Decremento de humedad
Nutrientes	Decremento de nutrientes
Luz solar	Incremento de luz solar
PH	Incremento en PH

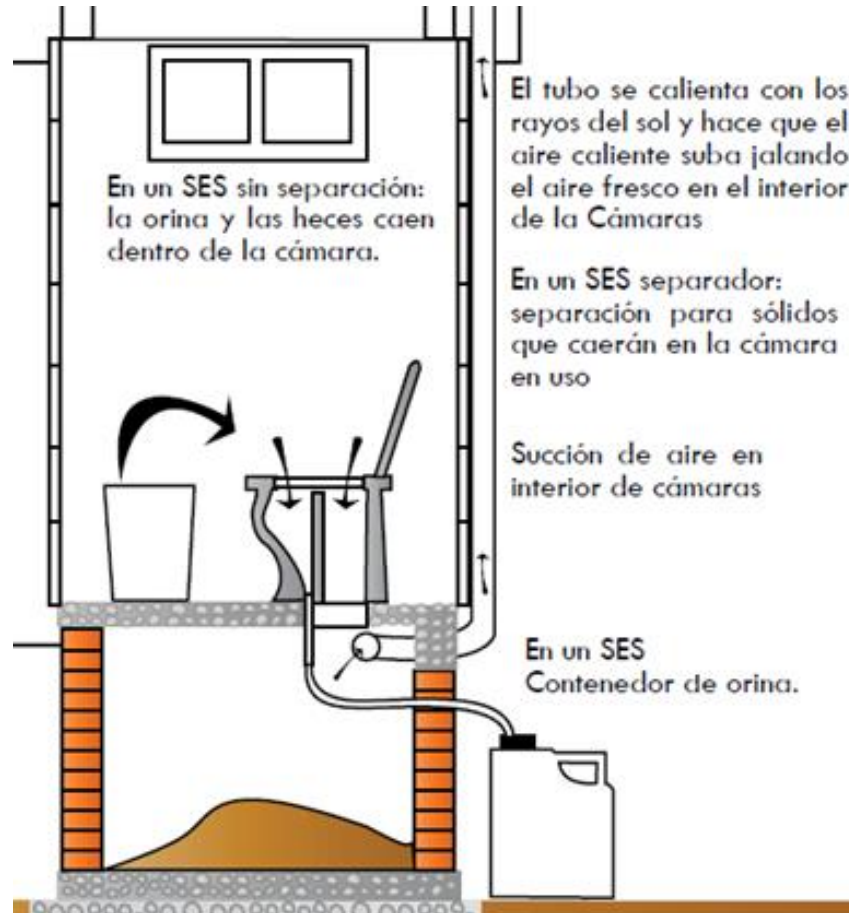
Fuente: SREY, Steven, *et al.* SANEAMIENTO ECOLÓGICO. Estocolmo: Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo / Fundación Friedrich Ebert, 1999. p. 11.

Figura 11. Taza para sanitario seco



Fuente: SANTANDER. CDMB. Sistema Séptico – SS & Sanitario Ecológico Seco – SES. 2011. p. 21.

Figura 12. Esquema de sanitario seco



Fuente: SANTANDER. CDMB. Sistema Séptico – SS & Sanitario Ecológico Seco – SES. 2011. p. 20

**2.4.1 Orina.** La mayor parte de los nutrientes de la excreta humana se encuentran en la orina. La orina es un fertilizante líquido bien equilibrado de acción rápida rico en nitrógeno. El contenido de nutrientes en la orina depende de la dieta alimenticia. Si se desconoce el contenido de nitrógeno en la orina, se puede esperar una concentración de 3 a 7 gramos de N por litro de orina. El fósforo en la orina se excreta en una forma asimilable para las plantas, produciendo la orina un fertilizante

de fósforo eficiente también. La cantidad de orina producida por un adulto depende de la cantidad de líquido que bebe una persona, siendo generalmente de 0,8 a 1,2 litros por adulto por día [7].

**2.4.1.1 Concentración de nutrientes.** La orina contiene cantidades importantes de los principales macronutrientes requeridos por las plantas: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), el nitrógeno se encuentra en forma de urea y en cantidades comparativamente mayores que el fósforo y potasio quienes se encuentran en forma de superfosfato y como ion respectivamente, fácilmente asimilables por las plantas (Tabla 4).

Tabla 4. Excreción de nutrientes per cápita por año en Sur África

Producto	Kg/año		
	N	P	K
Orina	3.56	0.34	1.26
Heces	0.42	0.24	0.21

Fuente: RICHERT, Anna, *et al.* Guía Práctica de Uso de la Orina en Producción Agrícola. Estocolmo: Stockholm Environment Institute. 2011. p. 3

**2.4.1.2 Manejo y uso.** En la recolección de orina para ser usada como fertilizante se debe almacenar de tal manera que se eviten los olores.

Otro aspecto importante es la existencia de investigaciones que demuestran que la mayor parte del nitrógeno en la orina, inicialmente en forma de urea, se convierte rápidamente en amoníaco dentro del recolector. Ésta pérdida puede minimizarse si está sellado o con ventilación parcial [3].

La orina puede ser aplicada pura o diluida con agua. No existe una recomendación estándar para la dilución o no-dilución y las recomendaciones existentes varían dependiendo de las condiciones locales. Los niveles de dilución pueden variar entre 1:1 (1 parte de orina a 1 parte de agua) y 1:15. Las tasas de dilución más comunes son 1:3 o 1:5. Sin embargo, la orina debe ser aplicada siempre en la tasa correspondiente a la dosis de aplicación deseada de nitrógeno, mientras que el agua adicional se debe aplicar de acuerdo a las necesidades de riego de las plantas [7].

**2.4.1.3 Riesgos para la salud.** Los riesgos para la salud asociados con el uso de la orina humana para la producción de cultivos son generalmente bajos en la medida que no exista contaminación cruzada con heces fecales. El almacenamiento de la orina en recipientes cerrados y por tiempo apropiado reducirá los riesgos para la salud de manera substancial (Tabla 5). También, se recomienda aplicar en el suelo (no directamente sobre las plantas) y dejando un mes de espera desde la última fertilización y el tiempo de cosecha.

**2.4.2 Heces.** En general, las heces humanas se componen de materia orgánica no digerida, como las fibras de carbón.

Tabla 5. Tiempos de almacenamiento recomendados para la orina

Temperatura de almacenamiento	Tiempo de almacenamiento	Posibles patógenos en la mezcla de orina después del almacenamiento	Cultivos recomendados
4°C	≥1 mes	Virus, protozoos	Cultivos de alimentos y forraje que serán procesados
4°C	≥6 meses	Virus	Cultivos de alimentos que serán procesados, cultivos de forraje <sup>d</sup>
20°C	≥1 mes	Virus	Cultivos de alimentos que serán procesados, cultivos de forraje <sup>d</sup>
20°C	≥6 meses	Probablemente ninguna	Todos los cultivos <sup>e</sup>

a Orina u orina y agua. Cuando diluida se asume que la mezcla de orina tiene como mínimo un pH de 8,8 y una concentración de nitrógeno de mínimo 1 g/l.

b Bacterias Gram-positivas y bacterias formadoras de esporas no están incluidas en las evaluaciones de riesgo subrayadas, pero normalmente no son reconocidas por causar cualquiera de las infecciones humanas de cuidado.

c Un sistema grande en este caso es un sistema donde la mezcla de la orina será usada como fertilizante en cultivos que serán consumidos por personas que no sean los miembros de la familia donde la orina fue recogida.

d No pastizales para la producción de forrajes.

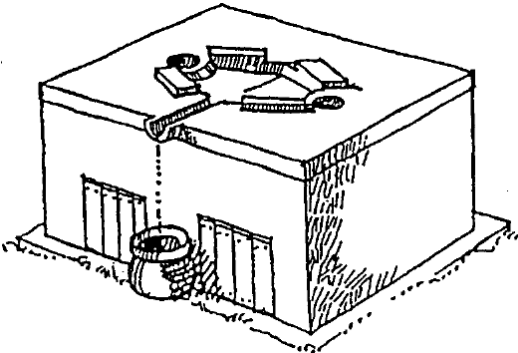
e Para cultivos de alimentos que se consumen crudos se recomienda que la orina sea aplicada al menos un mes antes de la cosecha y que sea incorporada en el suelo si las partes comestibles crecen sobre la superficie del suelo.

Fuente: RICHERT, Anna, *et al.* Guía Práctica de Uso de la Orina en Producción Agrícola. Estocolmo: Stockholm Environment Institute. 2011. p. 3

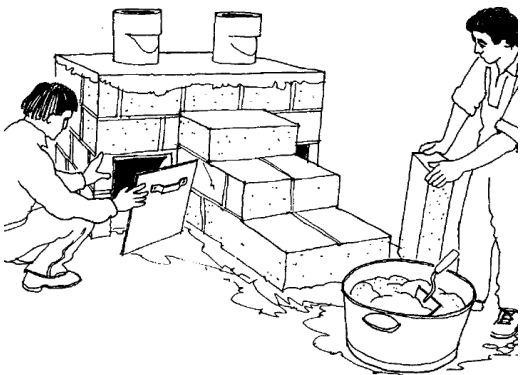
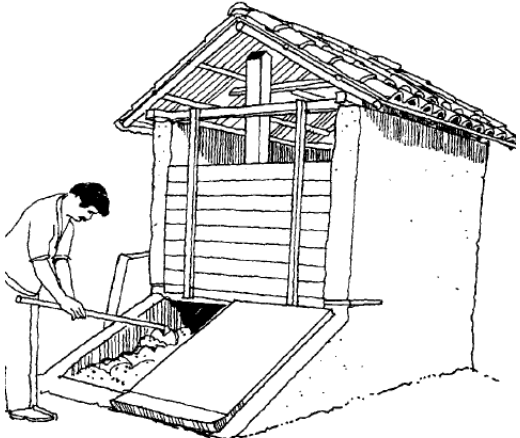
La cantidad total excretada por un humano en un año es de 25 a 50 Kg que a su vez contienen 550g de nitrógeno, 180g de fósforo y 370g de potasio. Si bien las heces contienen menos nutrientes que la orina, son un acondicionador valioso de suelos. Después de la destrucción de patógenos por *deshidratación* o *descomposición*, el material inofensivo que resulta puede aplicarse al suelo para incrementar la cantidad de material orgánico, mejorando así su capacidad para la retención de líquidos e incrementar la accesibilidad de los nutrientes. El humus que resulta del proceso de descomposición también contribuye a mantener una población adecuada de organismos del suelo, que proteja efectivamente a las plantas de enfermedades que tienen su origen en el suelo [3].

**2.4.2.1 Deshidratación.** El mecanismo de deshidratación busca eliminar toda el agua que contengan las heces fecales, en un sanitario seco esto se consigue con calor, ventilación y material secante. El primer paso para conseguirlo es evitar la mezcla entre heces y orina, de esta manera el proceso será más rápido. Tras la deshidratación el volumen no se ve muy reducido por el ingreso del material seco y la mínima descomposición de material orgánico. El producto conseguido al final no es composta, consiste en una “pasta” rica en nutrientes, carbón y materia fibrosa. La deshidratación es una manera muy efectiva para destruir patógenos, es ideal para zonas secas. (Tabla 6)

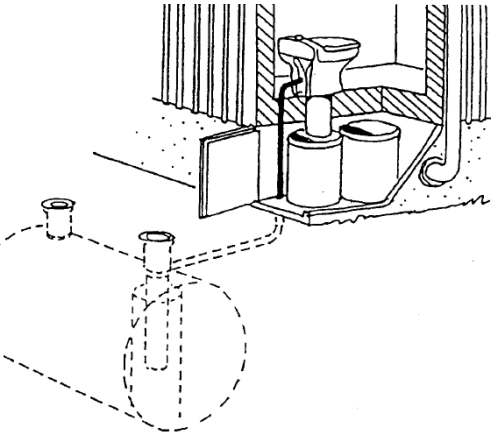
Tabla 6. Sistemas sanitarios basados en la deshidratación

Sistema	Descripción
<p data-bbox="337 1066 808 1136">Sanitario seco con doble cámara en Vietnam</p> 	<p data-bbox="857 1066 1461 1289">El sanitario se construye en su totalidad sobre la superficie y las cámaras de tratamiento descansan sobre una plancha sólida de concreto, ladrillo o barro. La plancha tiene por lo menos 10 cm de espesor para que las lluvias intensas no inunden las cámaras.</p> <p data-bbox="857 1297 1461 1640">Una losa para acucillarse cubre las dos cámaras de tratamiento; tiene dos orificios de entrada, descansos para los pies y un canal para orina. Ambos orificios cuentan con una tapa ajustada (no dibujadas en la figura). En la parte posterior hay dos aberturas de 30x30 cm para retirar el material deshidratado. Estas aberturas se mantienen selladas hasta el momento del vaciado de una de las cámaras.</p>

Continuación: Tabla 6.

Sistema	Descripción
<p data-bbox="337 359 808 428">Sanitario seco con doble cámara en América Central y México</p> 	<p data-bbox="857 359 1463 968">Cuenta con dos cámaras construidas sobre el nivel del piso. Desde un colector, la orina fluye por una manguera hacia un pozo de absorción debajo de la cámara (en América Central no se utiliza la orina como fertilizante). Las heces caen directamente en la cámara de tratamiento. Después de utilizar el servicio, el usuario espolvorea sobre la excreta algún material secante como ceniza, tierra, o una mezcla de tierra o aserrín y cal. Cada semana, con una vara, una persona mezcla el material y le agrega más material secante. Cuando la primera cámara está casi llena, se agrega tierra hasta el borde y se cierra la tapa. En ese momento se habilita la segunda cámara. Un año después, se abre la primera.</p>
<p data-bbox="386 1056 764 1125">Sanitario con doble cámara y calentador solar en Ecuador</p> 	<p data-bbox="857 1056 1463 1818">Desde 1985, en la provincia de Cotopaxi, en la región andina de Ecuador, se han construido unos 300 sanitarios de doble cámara con tapas que hacen de calentadores solares. Debido a la sequedad de la atmósfera, en esta región no hubo necesidad de desarrollar técnicas para desviar la orina. Después de cada uso, se espolvorea aserrín, cal o cenizas. Cada cámara se utiliza por seis meses antes de cambiar a la siguiente, y cada una tiene una tapa hecha con un bastidor de madera. Este bastidor se cubre con lámina de acero galvanizado, pintada de negro para que absorba la energía solar y contribuya al proceso de deshidratación. Las cámaras cuentan con un tubo de ventilación, mientras que las tapas tienen un respiradero para la entrada de aire. Tanto el tubo de ventilación como el respiradero están cubiertos con una malla de metal que funciona como mosquitero.</p>

Continuación: Tabla 6.

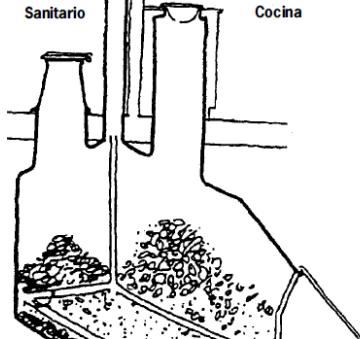
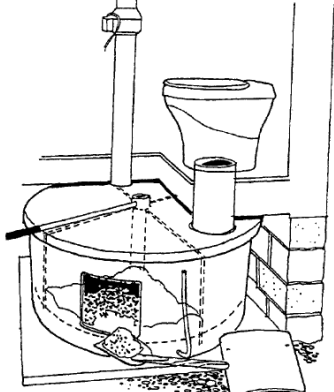
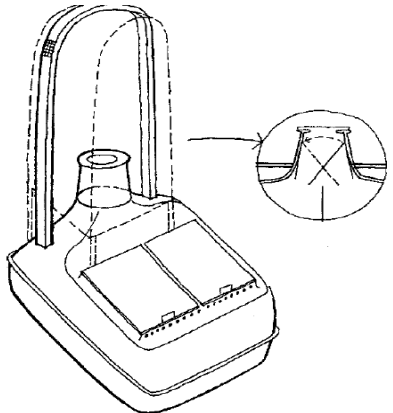
Sistema	Descripción
<p data-bbox="316 363 831 394">Sanitario seco WM Ekologen en Suecia</p> 	<p data-bbox="857 363 1463 737">A principios de la década de 1980, el profesor Mats Wolgast del Karolinska Institutet, en Estocolmo, Suecia, desarrolló el sistema <i>WM Ekologen</i>, tipo <i>ES</i>. Al igual que el sistema vietnamita, se basa en un proceso de deshidratación, diseñado para desviar la orina. El sistema utiliza un extractor que saca el aire del sanitario, lo conduce hacia debajo de la taza, a la cámara de tratamiento, y luego hacia afuera por medio de un tubo de ventilación.</p>

Fuente: SREY, Steven, *et al.* SANEAMIENTO ECOLÓGICO. Estocolmo: Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo / Fundación Friedrich Ebert, 1999. p. 21-30. Modificado por el autor.

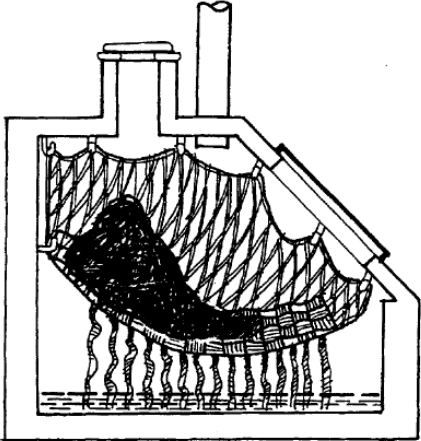
**2.4.2.2 Descomposición.** La descomposición es un proceso biológico que requiere de unas condiciones específicas para la supervivencia de los organismos.

La composta cuando alcanza temperaturas mayores a 60°C consigue destruir la mayoría de los patógenos, sin embargo al ser difícil alcanzar dichas temperaturas dentro del sanitario, se debe apelar a otros factores como el tiempo, pH desfavorable, competencia por la comida y toxicidad de los desechos de los organismos que generan el proceso de composta. (Tabla 7)

Tabla 7. Sistemas sanitarios basados en la descomposición

Sistema	Descripción
<p data-bbox="316 388 828 430">Sanit. composta Clivu Multrum (Suecia)</p> 	<p data-bbox="860 388 1461 766">Sanitario de composta con una cámara donde se procesan orina, heces y los residuos orgánicos que produce la familia. Consta de una cámara de composta con piso inclinado, conductos de aire y, en el extremo más bajo, un área de almacenado. Un tubo conecta la taza de sanitario de pedestal con el receptáculo y, generalmente, cuenta con un conducto especial para los desperdicios de la cocina. El aire sale por un respiradero.</p>
<p data-bbox="332 819 812 892">Sanitario de composta "Carrusel", de varias cámaras, en Noruega</p> 	<p data-bbox="860 819 1461 1270">El diseño del <i>Carrusel</i> consta de una cámara subterránea de procesamiento en forma de tanque cilíndrico, dentro de la que hay otro tanque cilíndrico más pequeño que gira sobre un eje. Este segundo tanque está dividido en cuatro cámaras (seis, en otros modelos). La cámara en uso está justo debajo del conducto de caída de la taza de sanitario. Una vez que la cámara se llena, se hace girar el tanque de tal manera que la siguiente cámara quede en el lugar de la anterior; así, cada cámara se va llenando en secuencia.</p>
<p data-bbox="316 1354 828 1438">Sanitario de composta "Sirdo Seco" con calentador solar, en México</p> 	<p data-bbox="860 1354 1461 1858">Posee un receptáculo con dos cámaras. Justo arriba de la pared divisoria hay un dispositivo desviador que dirige la excreta hacia una de las cámaras. Una vez que la cámara se llena, se gira una manivela colocada en la parte posterior de la taza de sanitario para cambiar la posición del dispositivo desviador, que envía la excreta hacia la otra cámara. Ambas cámaras tienen una tapa pintada de negro, hecha de aluminio laminado. Las tapas reciben la luz solar directa, para captar la mayor cantidad de calor lo que incrementa la evaporación dentro de éstas.</p>

Continuación: Tabla 7.

Sistema	Descripción
<p data-bbox="337 369 808 401">Sanitario CCD en el Pacífico del Sur</p> 	<p data-bbox="857 359 1463 506">La excreta se deposita en un petate de hoja de palma, que a su vez descansa en una red para pescar hecha de hilo de nylon, suspendida dentro de la cámara de asimilación.</p> <p data-bbox="857 512 1463 890">Este sistema separa todos los líquidos. El “piso falso” permite que el aire circule a través de todo el material. Periódicamente se agregan a través de la taza del sanitario de pedestal materia orgánica, como cáscaras de coco, viruta de madera, hojas o pedazos de verduras y alimentos. Esto se hace para proporcionar una fuente de carbón (energía) e incrementar la porosidad del material, facilitando con ello la circulación del aire en todo el montón.</p>

Fuente: SREY, Steven, *et al.* SANEAMIENTO ECOLÓGICO. Estocolmo: Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo / Fundación Friedrich Ebert, 1999. p. 33-40. Modificado por el autor.

“El sanitario seco es un sanitario limpio y sin olores; será el inodoro del futuro, pues cuando todo el mundo tome conciencia de hacer uso eficiente del agua potable, y producir comida para todos, el sanitario seco que aporta abono para la agricultura y no requiere agua para funcionar, que no requiere alcantarillado, entonces se volverá de uso común en todas nuestras viviendas” [8].

### 3. FERMENTACIÓN ANAERÓBICA

Es un proceso de fermentación microbiana en ausencia de oxígeno donde la materia orgánica es degradada, dando lugar a una mezcla de gas rico en metano “biogás” y una suspensión acuosa rica en nitrógeno “fertilizante” que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales presentes originalmente en la materia prima.

#### 3.1 BIOGÁS

Es un gas combustible formado principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Usualmente contiene pequeñas cantidades de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono y trazas de sulfuro de hidrógeno ( $\text{SH}_2$ ) (Tabla 8).

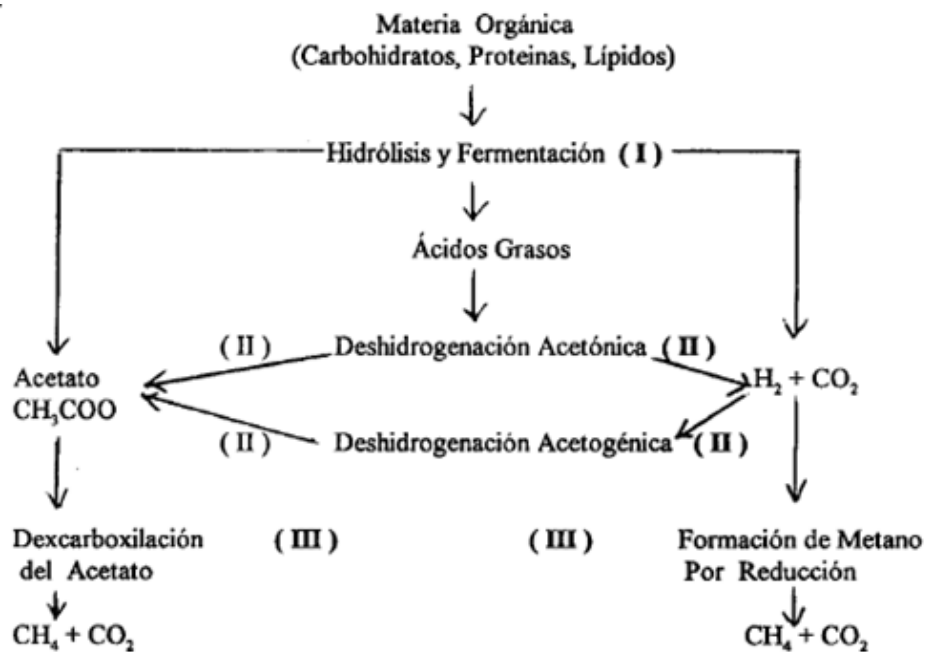
Tabla 8. Composición usual del biogás

Metano, $\text{CH}_4$	50-75
Dióxido de carbono, $\text{CO}_2$	25-45
Vapor de agua, $\text{H}_2\text{O}$	1-2
Monóxido de carbono, $\text{CO}$	0-0,3
Nitrógeno, $\text{N}_2$	1-5
Hidrógeno, $\text{H}_2$	0-3
Sulfuro de hidrógeno, $\text{H}_2\text{S}$	0,1-0,5
Oxígeno, $\text{O}_2$	0,1-1,0

Fuente: UNIÓN EUROPEA. Fondo Europeo de Desarrollo Regional. INFORME COMPLEMENTARIO SOBRE EL ESTUDIO DE SOLUCIONES VIABLES PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS EN EXTREMADURA. 2010. p. 8.

**3.1.1 Generación del biogás.** La descomposición de la biomasa en moléculas más pequeñas para dar biogás como producto final, gracias a la acción de diferentes tipos de bacterias, se da en tres etapas (Figura 13) [9]. (Ver Anexo A1)

Figura 13. Etapas para la generación de biogás a partir de materia orgánica



Fuente: GUEVARA, Antonio. FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES. Producción de gas y Saneamiento de Efluentes. Lima: OPS/CEPIS. 1996. p. 13. Modificada por el autor.

- I. Etapa fermentativa: Las bacterias fermentativas actúan sobre grasas, celulosa, proteínas, originando productos intermedios y compuestos orgánicos más simples como acetatos, propinatos y butiratos.

- II. Etapa acetogénica: Con los productos de la anterior etapa, sobre los ácidos orgánicos actúan las bacterias acetogénicas produciendo ácido acético,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ .
- III. Etapa metanogénica: En esta etapa actúan las bacterias metanogénicas, toman los productos de las etapas anteriores y los transforman en biogás ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ).

**3.1.2 Factores que afectan la producción de biogás.** La eficiencia de la fermentación anaeróbica y consecuente producción de biogás está influenciada por algunos parámetros críticos, por lo tanto es indispensable que se proporcione las condiciones adecuadas para los microorganismos anaerobios. El crecimiento y actividad de los microorganismos es significativamente influenciado por condiciones tales como la exclusión de oxígeno, temperatura constante, valor de pH, suministro de nutrientes, intensidad de agitación, así como la presencia y cantidad de inhibidores.

- **Temperatura**

Es uno de los factores más influyentes, ya que al aumentar, también aumenta la velocidad de degradación del material y por ende la tasa de producción de biogás.

Dado que el proceso de digestión anaerobia se da a diversas temperaturas, se diferencian 3 rangos en los cuales pueden operar bacterias metanogénicas: psicrófilico, mesófilico y termófilico (Tabla 9).

Aún más importante que el nivel de temperatura, ya sea ésta alta o baja, es el mantenerla lo más constante posible, ya que las fluctuaciones perjudican la acción bacteriana que se desarrolla [10].

Tabla 9. Fase térmica y tiempos de retención típicos

<b>Etapas térmica</b>	<b>Temperaturas de proceso</b>	<b>Tiempo mínimo de retención</b>
Sicrofílica	< 20 °C	70 a 80 días
Mesofílica	30 a 42 °C	30 a 40 días
Termofílica	43 a 55 °C	15 a 20 días

Fuente: AL SEADI, Teodorita, *et al.* biogas HANDBOOK. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg. 2008. p. 23.

- **pH**

El pH es un parámetro que no puede ser ignorado. Se busca un medio neutro para garantizar la supervivencia y reproducción de las bacterias metanogénicas.

La experiencia demuestra que la formación de metano se lleva a cabo dentro de un intervalo de pH relativamente estrecho, de aproximadamente 5.5 a 8.5, con un intervalo óptimo entre 7.0 - 8.0 para la mayoría de los metanógenos [11].

- **Material orgánico**

Corresponde a los desechos orgánicos que se degradan, en general, dependiendo de su origen pueden ser ricos en carbono o nitrógeno. Las excretas de humanos y animales son ricas en nitrógeno con una relación C/N inferior a 25:1, durante la fermentación tienen una mayor velocidad de biodegradación y de generación de gas; en cambio los residuos agrícolas son ricos en carbono, con una relación C/N superior a 30:1, pero con una generación más lenta de gas en el proceso de digestión (Tabla 10) [9].

Tabla 10. Relación C/N materias primas empleadas corrientemente (aproximación)

<b>Materias primas</b>	<b>Relación carbono a nitrógeno (C/N)</b>
Paja seca de trigo	87:1
Paja seca de arroz	67:1
Tallo del maíz	53:1
Hojas secas	41:1
Pasto	27:1
Cacahuets tallos y hojas	19:1
Estiércol de aves	32:1
Estiércol fresco de oveja	29:1
Estiércol fresco de vaca	25:1
Estiércol fresco de caballo	24:1
Estiércol fresco de cerdo	13:1
Excretas frescas humanas	2.9:1

Fuente: GUEVARA, Antonio. FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES. Producción de gas y Saneamiento de Efluentes. Lima: OPS/CEPIS. 1996. p. 15.

- **Dilución del material orgánico**

El proceso de fermentación anaeróbico se lleva a cabo en la mezcla diluida de agua y materia orgánica, la proporción de materia seca en la mezcla debe ser la apropiada para garantizar buen comportamiento de las bacterias. Las bacterias y otros microorganismos no pueden funcionar efectivamente cuando el contenido de agua de la mezcla es demasiado bajo, y la cantidad de biogás producido será pequeña. Cuando la mezcla es demasiado diluida se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción del biogás es limitada [12]; se recomienda una concentración de 5 a 10% [9].

El contenido de materia seca (Tabla 11) no debe exceder el 10% en la mayoría de los casos [13].

Tabla 11. Porcentaje en masa de solidos totales en algunos sustratos

<b>Solidos totales en sustratos diferentes</b>	
Estiércol de vacunos	16-20%
Estiércol de cerdos	18%
Estiércol de gallinas	40-50%
Excretas humanas	17%
Rastrojo y hojas de maíz	77%
Pajas de arroz	92.6%
Papel periódico	93%

Fuente: INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA INDUSTRIAL (ICAITI). MANUAL DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN PLANTA DE BIOGÁS. 1983. (Proyecto de Leña y Fuentes Alternas de Energía). p. 67.

- **Promotores e inhibidores de la fermentación**

Los promotores son materiales que pueden fomentar la degradación de la materia orgánica; entre ellos tenemos enzimas, urea y carbonato de calcio. El primero acelera la producción de metano y la degradación del material, los últimos son útiles para la generación de gas y para aumentar el contenido de metano en el gas [9].

Por otro lado, la integridad de los microorganismos se puede ver comprometida por la presencia de algunos compuestos inhibidores (Tabla 12).

Tabla 12. Concentración inhibidora de inhibidores comunes

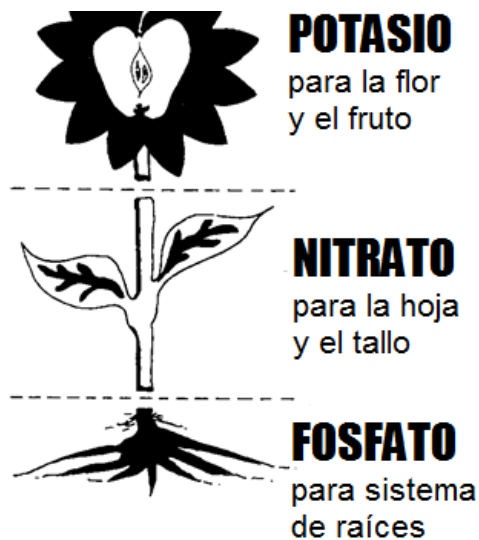
Inhibidores	Concentración inhibidora
SO <sub>4</sub>	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN	25 mg/l
Detergente sintético	20-40 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	1000-1500 mg/l

Fuente: GUEVARA, Antonio. FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES. Producción de gas y Saneamiento de Efluentes. Lima: OPS/CEPIS. 1996. p. 21.

### 3.2 FERTILIZANTE

El bioabono es un material viscoso, rico en nitrógeno y que, además, contiene cantidades considerables de potasio, fósforo y otros elementos indispensables para el desarrollo vegetal (Figura 14). Desde cualquier punto de vista, las condiciones de éste fertilizante son mucho mejores que las del material orgánico sin digerir, ya que los nutrientes del primero son más asimilables por las plantas que los del segundo [10].

Figura 14. Incidencia del nitrógeno, fósforo y potasio en la planta



Fuente: *What is NPK?* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 2 de 2014]. Disponible en: <<http://crawleyhorticulturalsociety.org.uk/npk.php>>. Modificado por el autor

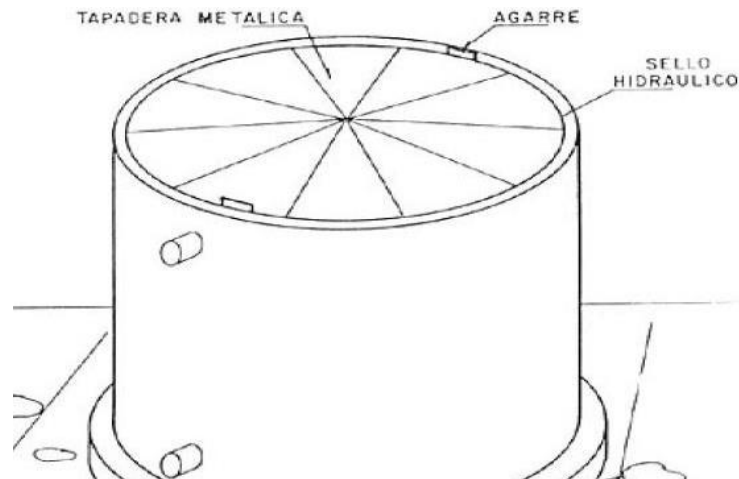
### 3.3 BIODIGESTOR

Un digestor de desechos orgánicos o *biodigestor* es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales-no se incluyen cítricos ya que acidifican-, etcétera) en determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaerobia se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los excrementos [14].

**3.3.1 Clasificación según flujo.** Según el ingreso de material al biodigestor, este puede ser de flujo discontinuo, semicontinuo o continuo.

**3.3.1.1 Flujo discontinuo.** La totalidad del material a procesar se carga al inicio, una vez realizado el proceso de fermentación ya no hay producción de biogás, entonces se extrae el bioabono y se vuelve a realizar la carga. Cuando hay producción de material orgánico diariamente, éste sistema requiere la posibilidad de su almacenamiento previo uso en el sistema. Además, es necesaria la construcción de depósitos para disponer de biogás en los picos bajos (días recientes a la carga). De los sistemas discontinuos el más usado es el tipo “Olade – Guatemala” (Figura 15).

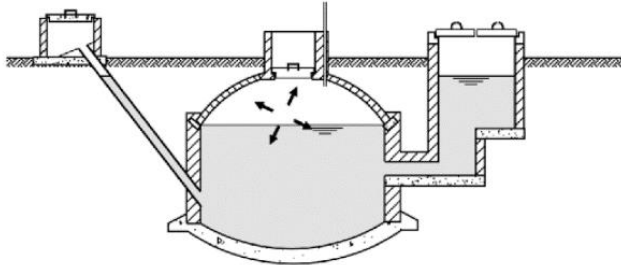
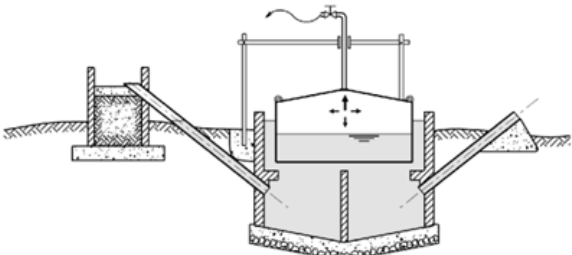
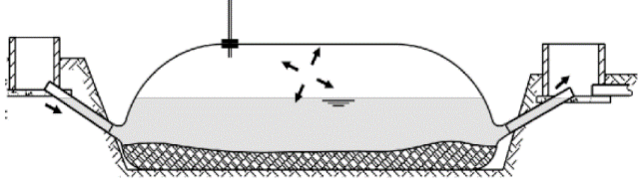
Figura 15. Biodigestor de flujo discontinuo tipo “Olade – Guatemala”



Fuente: BM Editores. *Biodigestores* [en línea]. Junio 14 de 2014 [fecha de consulta: octubre 6 de 2014]. Disponible en: <<http://bmeditores.com/biodigestores/>>.

**3.3.1.2 Flujo semicontinuo.** La carga y descarga del material se realiza en pequeños lapsos (generalmente una vez al día). Son los biodigestores más usados en el medio rural cuando se destinan para uso doméstico (Tabla 13).

Tabla 13. Biodigestores comunes de flujo semicontinuo

Descripción	Ventajas	Desventajas
<p><b>Biodigestor de cúpula fija (Tipo chino)</b>                      Este modelo consiste de un digestor construido en mampostería con un domo fijo e inmóvil donde sube el biogás</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Larga durabilidad (hasta 20 años).</li> <li>• Más económico que el de cúpula flotante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere personal calificado para su construcción lo que eleva costos.</li> <li>• No mantiene constante la presión del biogás.</li> <li>• Con el tiempo se presenta porosidad en las paredes.</li> </ul>
<p><b>Biodigestor de cúpula flotante (Tipo hindú)</b>                      Consiste de un digestor construido en mampostería y un depósito de gas móvil en forma de campana, la cual puede flotar en la masa de fermentación o en un anillo de agua dependiendo la producción de biogás.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite mantener una presión constante dentro de la cámara de digestión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de los materiales elevado.</li> <li>• Con el tiempo las partes metálicas se corroen, también se genera porosidad en las paredes.</li> </ul>
<p><b>Biodigestor horizontal de membrana tubular (Taiwán)</b>                      Este biodigestor consiste de una membrana tubular en plástico completamente sellado. La parte inferior de la planta, en un 75% constituye el volumen de la masa de fermentación, y en la parte superior, el 25% restante almacena el biogás.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil transporte.</li> <li>• Excelente hermeticidad en las paredes.</li> <li>• Instalación sencilla.</li> <li>• En general, bajo costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de vida útil bajo (entre 3 y 8 años).</li> <li>• Susceptibilidad al daño por factores externos como: animales, sol, malezas y piedras.</li> <li>• Baja presión de trabajo.</li> </ul>

Fuente: GUARDADO CHACÓN, José Antonio. Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. Ciudad de La Habana: Editorial Cuba solar. 2007. p. 13-14. Modificado por el autor.

**3.3.1.3 Flujo continuo.** Son implementados generalmente a escala industrial para el tratamiento de aguas residuales. Se instalan con dispositivos de calefacción, agitación y control de alimentación, producen grandes cantidades de gas.

**3.3.2 Aspectos operacionales.** En la sección 3.1.2 se presentaron los factores que influyen sobre la fermentación anaeróbica, para la operación del biodigestor se deben tener en cuenta otros dos aspectos de suma importancia: las condiciones de alimentación al biodigestor y tiempo de retención en éste.

**3.3.2.1 Alimentación del biodigestor.** Para que las bacterias anaerobias puedan funcionar correctamente, se requiere una adecuada proporción de agua y materia orgánica.

El uso primordialmente de excreta humana y orines, estiércol, y desechos de agricultura, como alimento para el digestor, deberá conllevar a una razón de biomasa a agua entre 1:1 y 1:2; y por cada 100 Kg de heces y orina, se requerirán entre 100 y 200 litros de agua. Cuando el material de alimento consta principalmente de residuos vegetales, se requiere más agua, en una razón de 1:3 o 1:4 [12].

El tipo de materia orgánica utilizada determina la cantidad de biogás que se produce, en la Tabla 14 se presentan algunas características de los estiércoles de ganado vacuno y porcino.

Tabla 14. Características de los estiércoles de ganado porcino y vacuno

Datos básicos	Ganado	
	Porcino	Vacuno
Cantidad de estiércol fresco/24 horas en porcentaje de peso vivo (PV)	3%	6%
Porcentaje de sólidos volátiles (SV) en estiércol fresco	20%	16%
Cantidad de estiércol por 500 Kg de PV	15 Kg	30 Kg
Cantidad de sólidos volátiles por 500 Kg de PV	3 Kg	4,8 Kg
Producción de biogás por 100 Kg de PV	0,25 m <sup>3</sup>	0,21 m <sup>3</sup>
Producción de biogás por 100 Kg de SV	0,42 m <sup>3</sup>	0,22 m <sup>3</sup>

Fuente: OLAYA ARBOLEDA, Yeison y GONZÁLEZ SALCEDO, Luis Octavio. FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES. Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 2009. p. 8.

**3.3.2.2 Tiempo de retención.** El tiempo de retención corresponde al tiempo necesario para que la materia orgánica se degrade, está directamente relacionado con la temperatura ambiente y el tipo de material usado (Tabla 15).

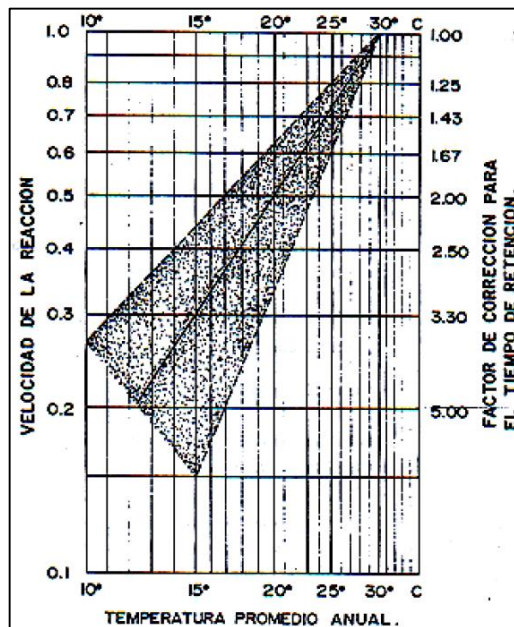
En condiciones óptimas del proceso, con una temperatura de 30 °C, el tiempo de retención ( $T_r$ ) del estiércol debería ser de 20 días, cuando la temperatura media ambiental del sitio donde se instala el biodigestor es menor a 30 °C el tiempo de retención será mayor, se calcula multiplicando 20 días por un factor de corrección obtenido de la Figura 16 [12].

Tabla 15. Velocidad de generación a igual temperatura usando materiales comunes

Días de fermentación	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Tasa de generación [m <sup>3</sup> /Kg]
<b>Materiales</b>	<b>Porcentaje del volumen total de gas generado</b>									
Excreta humana	40.7	81.5	94.1	98.2	98.7	100				0.478
Estiércol de cerdo	46.0	78.1	93.9	97.5	99.1	100				0.405
Estiércol de vaca	34.4	74.6	86.2	92.7	97.3	100				0.300
Pasto verde	-	-	-	98.2	-	100				0.410
Paja de trigo	8.8	30.8	53.7	78.3	88.7	93.2	96.7	98.7	100	0.435

Fuente: GUEVARA, Antonio. FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES. Producción de gas y Saneamiento de Efluentes. Lima: OPS/CEPIS. 1996. p. 40.

Figura 16. Influencia de la temperatura sobre el tiempo de retención del estiércol



Fuente: OLAYA ARBOLEDA, Yeison y GONZÁLEZ SALCEDO, Luis Octavio. FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES. Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 2009. p. 12.

### 3.4 LÍNEA DE TRANSPORTE DEL BIOGÁS

**3.4.1 Caída de presión en la tubería.** La mayoría de los programas de computadora que permiten simular redes de distribución de gases, hacen uso de ecuaciones empíricas que han supuesto algún tipo de comportamiento simplificado del factor de fricción de Moody. Para redes de distribución que operan a baja presión entre 0 y 75 [mbar] se puede utilizar la ecuación de Pole [15]. El modelo de Pole se presenta en la ecuación 1 [16]:

$$P_1 - P_2 = \frac{Q^2 GL}{(3.04 \cdot 10^{-3})^2 C^2 D^5} \quad (1)$$

Donde:

$P_1 - P_2$ : Caída máxima de presión permisible en la red (menor a 5 [mbar])

Q: caudal bajo condiciones estándar [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

G: gravedad específica del gas

L: longitud total del tramo [m]

D: diámetro interno de tubería [mm]

C: constante de Pole (Tabla 16).

**3.4.2 Longitud total tramo de tubería.** La longitud total del tramo de tubería se obtiene al sumar la longitud real más la longitud equivalente de los accesorios que hacen parte del tramo.

La longitud equivalente de cada accesorio se obtiene mediante la ecuación 2 [16].

$$L_e = \frac{(R.L.D)*D_i}{1000} \quad (2)$$

Donde:

$L_e$ : Longitud equivalente [m]

$R.L.D$ : Relación longitud/diámetro (Tabla 17)

$D_i$ : Diámetro interno [mm]

Tabla 16. Constantes de Pole para cálculo de pérdida de presión

Diámetro nominal (pulgadas)	Factor C
3/8 - 1/2	1.65
3/4 - 1	1.80
1 1/4 - 1 1/2	1.98
2	2.16
3	2.34
4	2.42

Fuente: SÁNCHEZ JARAMILLO, Claudia Yaneth; PALACIO GALLEGO, Orlando y ÁLVAREZ Álvarez, Mauricio. Diseño de la red de gas natural para el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid con énfasis en la acometida hacia la Planta de Etanol, área de servicios. Medellín: Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. 2006. p. 32.

**3.4.3 Diámetro de la tubería.** Por medio de la Figura 17 se puede calcular de forma práctica el diámetro adecuado de la tubería, para ello se requiere conocer el flujo de gas [pie<sup>3</sup>/h] así como la longitud [pie] estimada del sistema de tuberías.

Tabla 17. Relación longitud/diámetro para accesorios de tubería

<b>Accesorio</b>	<b>Relación longitud/diámetro (R.L.D)</b>
Codo A 90°	30
Codo A 45°	14
TEE A 90°	60
TEE A 45°	20

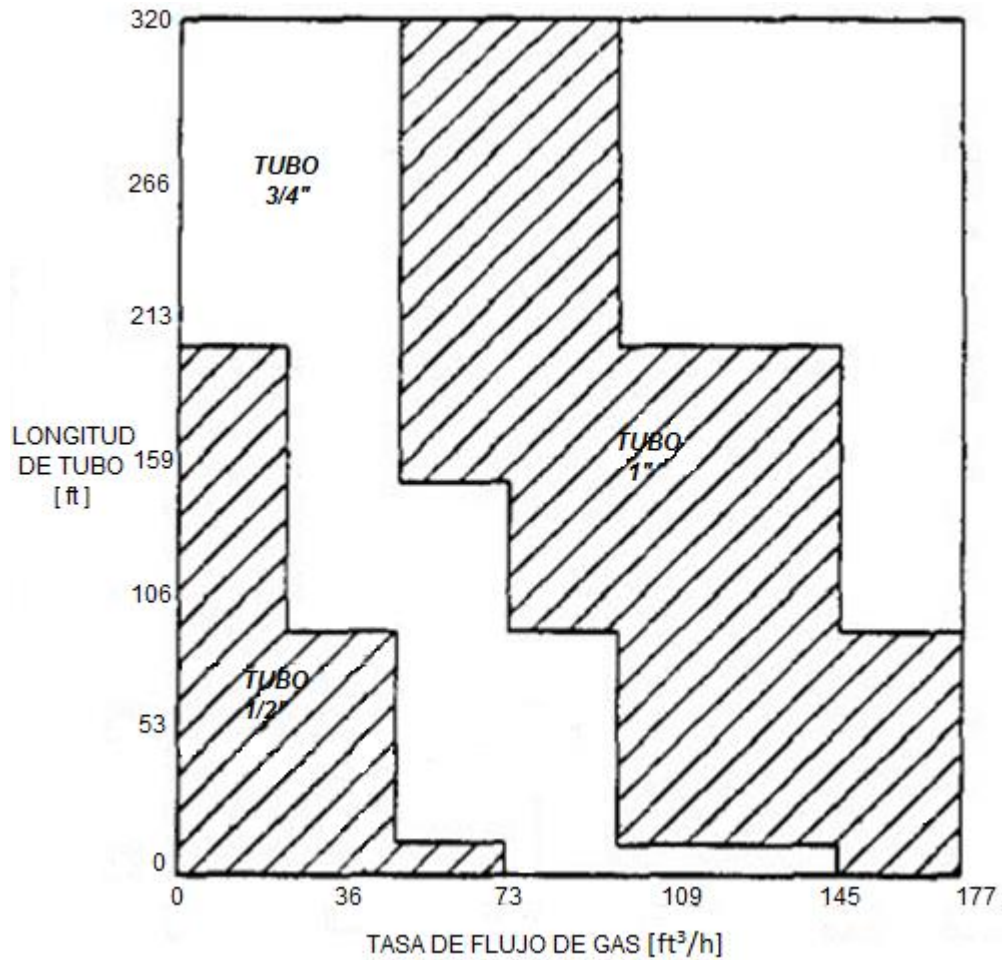
Fuente: SÁNCHEZ JARAMILLO, Claudia Yaneth; PALACIO GALLEGO, Orlando y ÁLVAREZ Álvarez, Mauricio. Diseño de la red de gas natural para el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid con énfasis en la acometida hacia la Planta de Etanol, área de servicios. Medellín: Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. 2006. p. 33.

**3.4.4 Espesor de la tubería.** El espesor de la tubería se selecciona para que resista la presión de diseño, la presión de diseño se calcula multiplicado la presión máxima de operación por un factor de seguridad de 1.5 (ecuación 3) [17].

$$P_{diseño} = 1.5P_{máxima} \quad (3)$$

**3.4.5 Material de la tubería.** La selección del material de la tubería debe estar respaldado por la normatividad vigente, NTC 1746 (Tubos y accesorios termoplásticos para conducción de gases a presión) [18].

Figura 17. Diámetro de tubería recomendado



Fuente: WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. p. 24. Modificado por el autor.

En la Tabla 18 se describen las ventajas y desventajas de algunos de los materiales que pueden utilizarse para la elaboración de sistemas de tuberías orientados al transporte de biogás.

Tabla 18. Ventajas y desventajas de materiales de tuberías para transporte de biogás

Material	Ventajas	Desventajas
Plástico (PVC, CPVC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de trabajar</li> <li>• Relativamente barato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de quebrarse o facturarse</li> <li>• Puede ser mordido por roedores</li> <li>• Válvulas más caras que las de galvanizado</li> <li>• Sujeto a degradación causada por rayos ultravioleta</li> </ul>
Acero galvanizado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rígido</li> <li>• Menos posibilidades de fracturarse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se oxida</li> <li>• Tubería más cara que la de PVC o plástico</li> </ul>
Manguera plástica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de conectar a los equipos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cara</li> <li>• Se puede dañar fácilmente</li> </ul>
Plástico (ABS)	Ninguna	No recomendado

Fuente: WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. p. 26.

### 3.5 QUEMADOR

En una estufa, este dispositivo se encarga de producir calor mediante la quema del gas combustible (Figura 18). (Ver Anexo A2)

**3.5.1 Intercambiabilidad de gases.** La intercambiabilidad es la habilidad de sustituir un combustible gaseoso por otro, en una aplicación de combustión, sin que se presente un cambio sensible en la seguridad operacional, la eficiencia, el desempeño o el incremento de las emisiones contaminantes. Los diferentes

métodos para determinar la intercambiabilidad de una mezcla combustible se agrupan principalmente en dos: Métodos de índices simples y Métodos de índices múltiples, ambos generalmente basados en parámetros empíricos, desarrollados al ajustar los resultados de experimentos [19].

Figura 18. Quemador casero



Gas Natural Fenosa. *Gasodomésticos* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 7 de 2014]. Disponible en: <<http://www.gasnaturalfenosa.com.co/co/hogar/1297102458548/gasodomesticos.html>>.

**3.5.1.1 Índice de Wobbe.** Es el método de índice simple más conocido, a veces denominado Factor de Intercambiabilidad, está definido como el poder calorífico dividido por la raíz cuadrada de la densidad relativa.

Según el índice de Wobbe, los gases combustibles se clasifican en familias (ver Tabla 19), la intercambiabilidad solo podrá darse entre gases pertenecientes a una misma familia.

Tabla 19. Clasificación de los gases

Familia y grupo de gas	Índice de Wobbe Superior a 15 °C y 1013.25 mbar (MJ/m <sup>3</sup> )	
	Mínimo	Máximo
Primera familia		
- Grupo a*	22.4	24.8
Segunda familia	39.1	54.7
- Grupo H <sup>†</sup>	45.7	54.7
- Grupo L	39.1	44.8
- Grupo E	40.9	54.7
Tercera familia	72.9	87.3
- Grupo B/P <sup>‡</sup>	72.9	87.3
- Grupo P	72.9	76.8
- Grupo B	81.8	87.3

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. GASES DE ENSAYO, PRESIONES DE ENSAYO Y CATEGORÍAS DE LOS ARTEFACTOS A GAS. Bogotá: ICONTEC, 2004. (NTC 3527)

Aunque el índice de Wobbe es una manera fácil y efectiva de medir la intercambiabilidad entre gases, la industria reconoce históricamente que este índice por sí solo no es suficiente, ya que no predice adecuadamente todos los fenómenos de combustión.

---

\* A cada grupo se asigna una letra en función de la composición de los gases de ensayo usados para determinar los límites de combustión. A los grupos de la primera familia se les asigna las letras del alfabeto en orden ascendente partiendo desde la a y escritas en minúscula, para el caso de la norma técnica colombiana solo se contempla el grupo a.

<sup>†</sup> La segunda familia contiene a los grupos H, L y E, quienes a su vez se divide en subgrupos, por ejemplo, el grupo H contiene los subgrupos G20, G21, G222 y G23; cada uno de ellos representa a un gas con cierto porcentaje de metano y con otro acompañante, ya sea propano, hidrógeno o nitrógeno también en una proporción determinada.

<sup>‡</sup> La tercera familia contiene los grupos B (butano) y P (propano y propileno), se dividen en tres subgrupos: G30, G31 y G32. Para encontrar información completa y detallada, consultar la norma NTC 3527.

**3.5.1.2 Índice de Weaver.** Weaver derivó una serie de 6 índices para incluir más características de combustión. A continuación se muestra la definición de los 6 índices de Weaver así como las ecuaciones necesarias para su cálculo (ecuaciones 4-9) [19].

- **Índice de aireación primaria**

$$J_A = \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} \quad (4)$$

- **Índice de retroceso de llama**

$$J_F = \left( \frac{S_s}{S_a} \right) - 1.4J_A + 0.4 \quad (5)$$

- **Índice de entrada de calor**

$$J_H = \frac{H_s \sqrt{D_a}}{H_a \sqrt{D_s}} \quad (6)$$

- **Índice de combustión incompleta**

$$J_I = J_A - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634 \quad (7)$$

- **Índice de desprendimiento de llama**

$$J_L = J_A \left( \frac{S_s}{S_a} \right) (100 - Q_s)(100 - Q_a) \quad (8)$$

- **Índice de puntas amarillas**

$$J_Y = J_A - 1 + \frac{N_s - N_a}{110} \quad (9)$$

Dónde: El subíndice “a” denota el gas base y el subíndice “s” el gas sustituto.

A: pies cúbicos de aire requeridos para combustión completa por pie cúbico de gas.

D: gravedad específica del gas.

H: poder calorífico del gas [Btu/ft<sup>3</sup>]

R: relación entre el número de átomos de hidrógeno en el gas combustible y el número de átomos de carbono en los hidrocarburos solamente (excluido el monóxido de carbono).

Q: fracción volumétrica de oxígeno en la premezcla.

$N$ : número de átomos de carbono “fácilmente liberados” por la combustión de 100 moléculas de gas; para hidrocarburos saturados se asume que tienen un átomo de carbono por molécula.

$S$ : máxima velocidad de deflagración de la mezcla de gas con aire, expresada como una fracción de la velocidad de deflagración lineal para el hidrógeno en pies por segundo (ecuación 10).

$$S = \frac{aF_a + bF_b + cF_c \dots}{A + 5Z - 18.8Q + 1} \quad (10)$$

$a, b, c, \dots$  son las fracciones volumétricas de los diferentes combustibles que constituyen el gas.

$F$ : coeficiente mostrado en la Tabla 20.

$Z$ : fracción volumétrica de gases inertes ( $N_2$  y  $CO_2$ )

#### ➤ **Criterio de intercambiabilidad**

Dos o más gases son intercambiables teóricamente y de forma completa, si los índices de entrada de calor y desprendimiento de llama son iguales a 1; y los índices de retroceso de llama, puntas amarillas y combustión incompleta son iguales a 0. Sin embargo en la práctica, Weaver propone unos rangos dentro de los cuales la intercambiabilidad es todavía aplicable [20]:

- Índice de entrada de calor:  $0.925 < J_H < 1.075$
- Índice de desprendimiento de llama:  $J_L > 0.46$
- Índice de retroceso de llama:  $J_F < 0.12$
- Índice de combustión incompleta  $J_I < 0$
- Índice de puntas amarillas  $J_Y < 0.21$

Tabla 20. Propiedades de gases de combustión

Gas	Fórmula química	Potencia calorífica total, H	Gravedad específica, D	Aire necesario para quemar, A	Factor de velocidad de llama, F
Monóxido de carbono	CO	315.3	0.97	2.39	61
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	318.5	0.07	2.39	339
Metano	CH <sub>4</sub>	994.1	0.55	9.55	148
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1757	1.04	16.71	301
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2535	1.56	23.87	398
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3330	2.09	31.03	513
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1572	0.97	14.32	454
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	2337	1.45	21.48	674
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1464	0.91	11.93	776
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	3700	2.70	35.79	920
Nitrógeno atmosférico	N <sub>2</sub>	-----	0.97	-----	-----
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	-----	1.53	-----	-----
Oxígeno	O <sub>2</sub>	-----	1.11	(-4.78)	-----
Aire	-----	-----	1.00	-----	-----

Fuente: FLOREZ ORREGO, Daniel A. Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de Gas Natural y Gas Natural Syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar: Una artículo de revisión. Medellín: Universidad de Antioquia.

### 3.5.2 Combustión del biogás

**3.5.2.1 Valor aproximado de combustible.** Metano puro a temperatura y presión estándar\*, tiene un poder calorífico inferior de aproximadamente 912 [Btu/ft<sup>3</sup>].

\* La IUPAC define la temperatura y presión estándar igual a 0 [°C] y 100 [kPa]

Biogás típico de 65% de metano tiene un poder aproximado de 600 [Btu/ft<sup>3</sup>] ya que solo la porción de metano se quema [17].

La equivalencia del biogás con otros combustibles se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21. Equivalencia del biogás con otros combustibles

<b>Combustibles equivalentes a 1000 [ft<sup>3</sup>] (28.32 [m<sup>3</sup>]) de biogás*</b>		
<b>Combustible</b>	<b>Cantidad (Unidades Inglesas)</b>	<b>Cantidad (Unidades Internacionales)</b>
Gas natural	600 [ft <sup>3</sup> ]	16.99 [m <sup>3</sup> ]
Propano	6.6 [gal]	0.024984 [m <sup>3</sup> ]
Butano	5.9 [gal]	0.022334 [m <sup>3</sup> ]
Gasolina	4.7 [gal]	0.017791 [m <sup>3</sup> ]
Fuel oil	4.3 [gal]	0.016277 [m <sup>3</sup> ]
Carbón bituminoso	44 [lb]	19.96 [Kg]
Madera seca	100 [lb]	45.36 [Kg]

Fuente: WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. p. 13. Modificado por el autor.

**3.5.2.2 Parámetros de consideración en la combustión del biogás.** La evaluación de algunos parámetros sirve para predecir el comportamiento de la combustión y con ello, desarrollar sistemas seguros y eficientes.

---

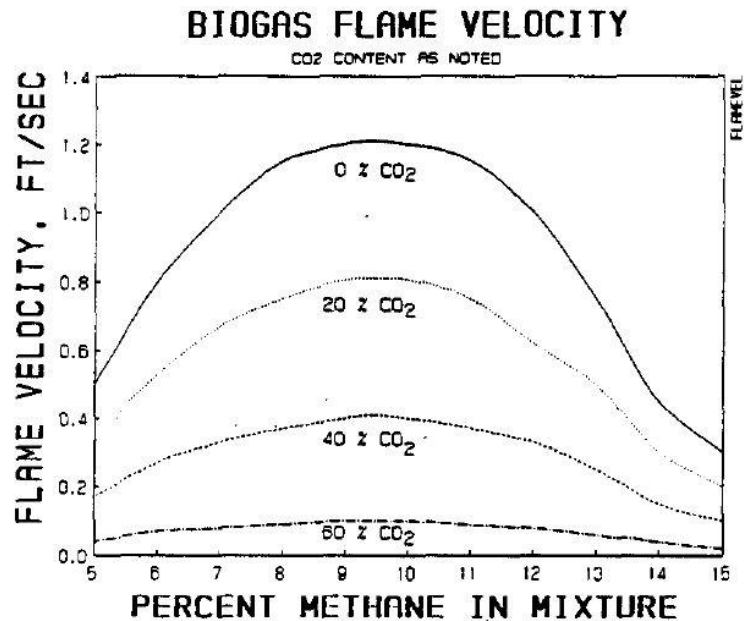
\* Biogás con 65% de metano a temperatura y presión estándar

➤ **Velocidad de llama**

Se define como la velocidad a la que progresa una llama en una mezcla con relación a la velocidad de la mezcla de combustible, es una consideración importante en el análisis de combustibles gaseosos , en particular aquellos tales como biogás con contenidos bajos de energía debido a la dilución con diversos gases no combustibles [17].

La Figura 19 muestra el impacto de las concentraciones de dióxido de carbono en las velocidades de llama en los límites de inflamabilidad. La información se puede usar para comparar el rendimiento de un sistema de combustión diseñado para el gas natural que será modificado para funcionar con biogás.

Figura 19. Velocidad de llama como una función de la concentración de dióxido de carbono y porcentaje de metano en el aire



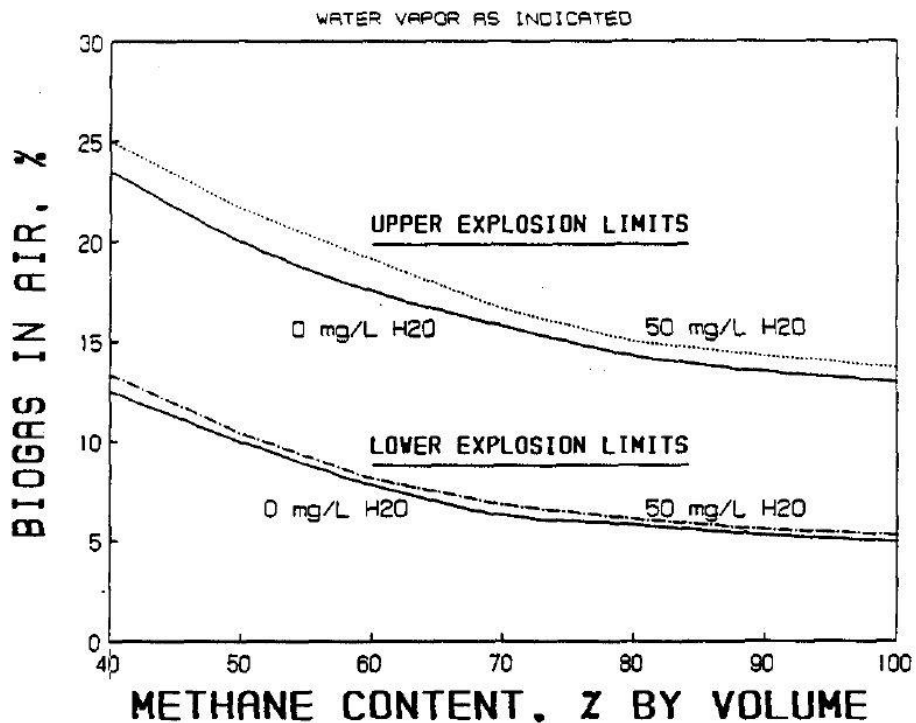
Fuente: WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. p. 15.

➤ **Límites de flamabilidad**

Indica el máximo y mínimo porcentaje posible de combustible en una mezcla de combustible y aire que se va a quemar. Este es un parámetro crítico en la combustión de biogás debido a la dilución de metano con dióxido de carbono y otros gases inertes.

En la Figura 20 se muestran los límites inferior y superior de explosividad, y el impacto del CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y vapor de agua en los límites de flamabilidad; la combustión únicamente se dará en la zona entre arcos de la gráfica.

Figura 20. Límites de flamabilidad como una función de la concentración de metano y vapor de agua



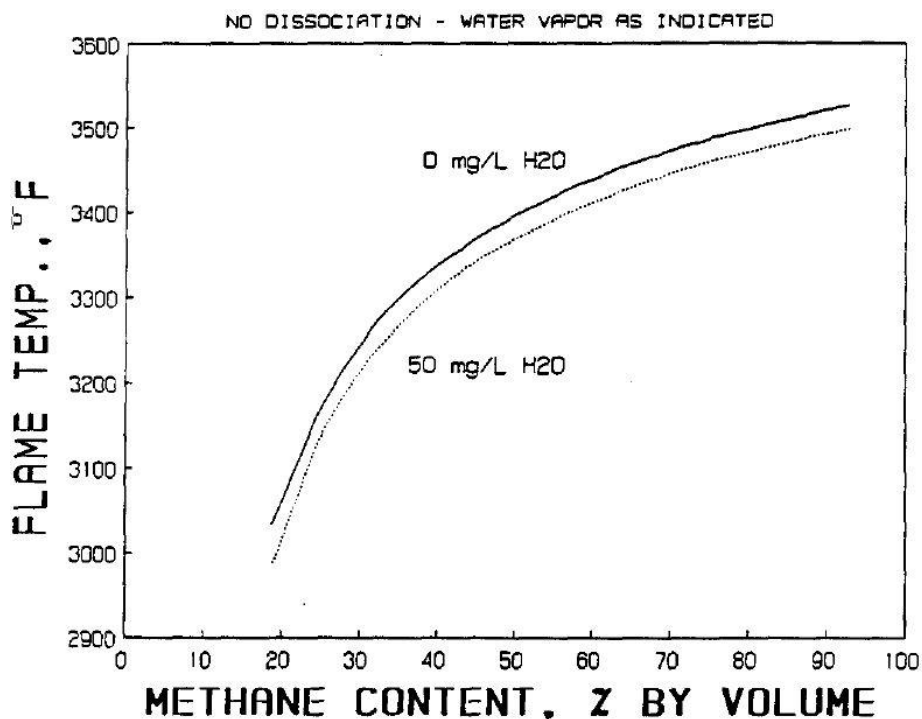
Fuente: WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. p. 16.

### ➤ Temperatura de llama

La temperatura del frente de llama creado por una mezcla combustible es un factor importante para la realización de los sistemas de combustión y la evaluación de su eficiencia térmica.

La temperatura teórica de llama en una mezcla estequiometrica de aire-metano y que incluye la disociación es 3484 °F [17]. Sin embargo, la temperatura teórica de llama disminuye en la medida que aumenta la concentración de no combustibles (Figura 21).

Figura 21. Temperatura teórica de llama como una función de la concentración de metano y vapor de agua

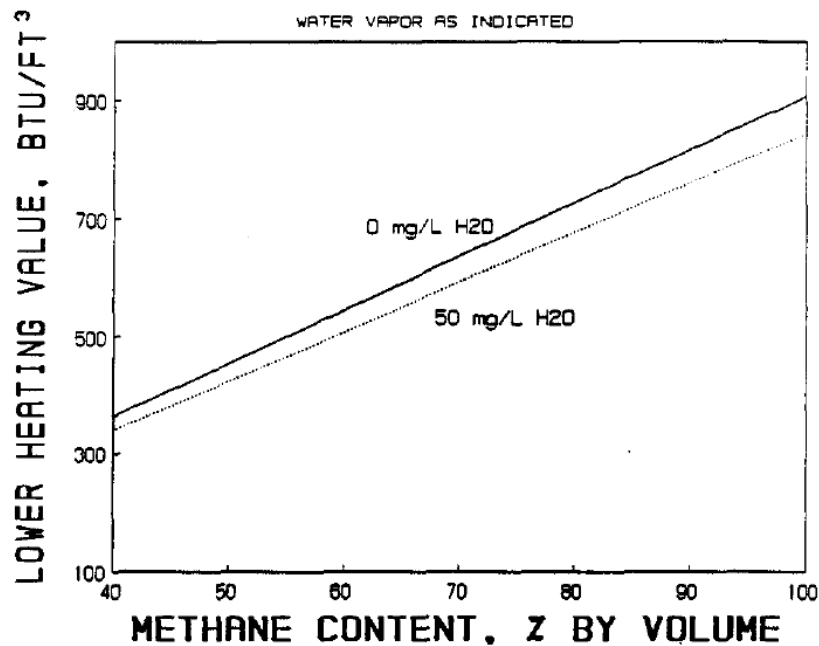


Fuente: WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. p. 17.

➤ **Valor energético del biogás**

El poder calorífico superior (HHV) es la energía liberada de una masa dada de un combustible, donde la energía requerida para vaporizar el agua en el combustible se recupera. El HHV de metano, el principal combustible en el biogás, se muestra como 1012 Btu/Ft<sup>3</sup>. El poder calorífico inferior (PCI), se define como el valor calorífico superior menos la energía necesaria para la vaporización de agua en los productos de combustible y de combustión, para el metano, su valor es 912 Btu/Ft<sup>3</sup> [17]. El Efecto del contenido de humedad y CH<sub>4</sub>, sobre el poder calorífico inferior del biogás se ilustra en la Figura 22.

Figura 22. Poder calorífico inferior como una función de la concentración de metano y vapor de agua



Fuente: WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. p. 19.

**3.5.2.3 Conversión del quemador.** La conversión de un quemador de gas natural o propano para ser utilizado con biogás implica que la velocidad de salida y caída de presión del biogás sea mantenida. La caída de presión a través de un orificio del quemador aumentará con la disminución en el valor calorífico y la gravedad específica de biogás en relación con el gas natural y propano. Para compensar este aumento en la caída de presión, el diámetro del orificio del inyector debe ser aumentado [17].

Un multiplicador del diámetro del inyector original de gas natural o propano para ser utilizado con biogás a diferentes contenidos de metano se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22. Diámetro de orificio multiplicador para aparatos de gas

<u>Percent Methane in Biogas</u>	<u>Orifice Diameter Multiplier</u>	
	<u>Natural Gas (1,050 Btu/ft<sup>3</sup>)</u>	<u>Propane (2,500 Btu/ft<sup>3</sup>)</u>
70%	1.32	1.63
65%	1.39	1.72
60%	1.46	1.81
55%	1.54	1.92
50%	1.64	2.04

**Example:** A natural gas appliance with an orifice diameter of 0.1" would have to be enlarged to  $0.1 \times 1.54 = 0.154$ " diameter for a biogas with 55% methane.

Fuente: WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. p. 70.

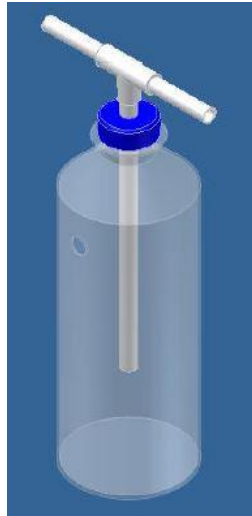
### **3.6 DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD Y ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS**

En la tubería de transporte del combustible desde el biodigestor hasta la cocina, deben ser instalados ciertos dispositivos para dar seguridad al sistema o “limpiar” al biogás de componentes no deseables.

**3.6.1 Válvula de seguridad.** En algún momento, la tasa de producción de biogás puede llegar a ser superior al consumo, produciéndose de esta manera una sobrepresión dentro del biodigestor o el sistema de tuberías, comprometiendo la integridad del sistema y seguridad del entorno. La válvula de seguridad, tiene como función limitar la presión máxima de operación del sistema, evacuando el exceso de biogás producido. En la Figura 23 se muestra un diseño tradicional de válvula de seguridad, su funcionamiento es el siguiente: la toma de biogás se hace de la línea principal proveniente del biodigestor por medio de una bifurcación en T extendida al interior de la botella plástica transparente. Esta tubería, estará sumergida en agua contenida en la botella, a una profundidad correspondiente a la presión de columna de agua, igual a la de accionamiento de la válvula. Cuando la presión del sistema exceda la de operación, el biogás vencerá la presión que de la columna y saldrá en forma de burbujas.

**3.6.2 Antorcha.** En algunas ocasiones se requiere liberar volúmenes considerables de biogás por la válvula de seguridad, dicho gas en grandes cantidades causa contaminación del entorno y puede ser peligroso si es inhalado, por lo cual se instalan antorchas para su quemado.

Figura 23. Válvula de seguridad



Fuente: HIDALGO BONILLA, José Alfredo; MARAVILLA CARRANZA, Víctor Arturo y RAMÍREZ CASTRO, William Omar. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS EN EL SALVADOR. Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”. 2010. p. 29.

**3.6.3 Arresta llamas.** Este dispositivo evita que una llama proveniente del quemador pueda trasladarse por la tubería y llegar hasta el biodigestor produciendo una explosión.

Cabe resaltar que las condiciones en el sistema generalmente no están dadas para que esto se presente, ya que cuando está funcionando normalmente no debe haber presencia de oxígeno dentro de éste sino puro biogás, lo cual evita la propagación de la llama.

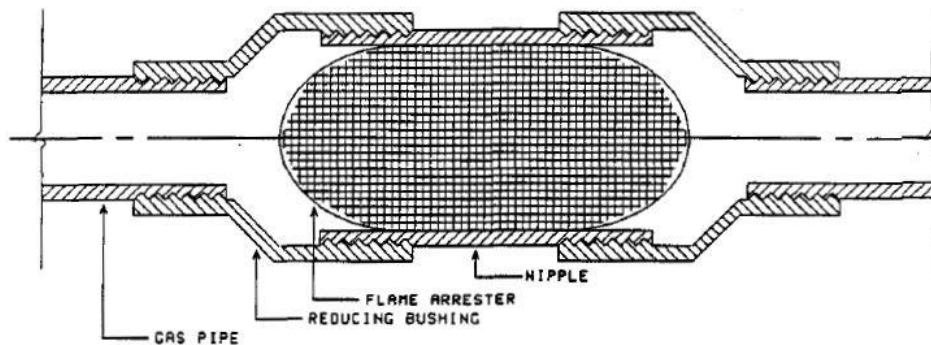
Los casos en los cuales puede ingresar oxígeno son [21]:

- Se acaba el gas y queda el quemador con la válvula abierta permitiendo el ingreso de aire al sistema.

- Cuando se carga el biodigestor por primera vez o luego de una reparación queda atrapado aire dentro del sistema

La Figura 24 corresponde a un arresta llamas, se construye colocando una bola de hilo de cobre o estropajo de acero para limpiar ollas dentro de la tubería entre el biodigestor y el quemador.

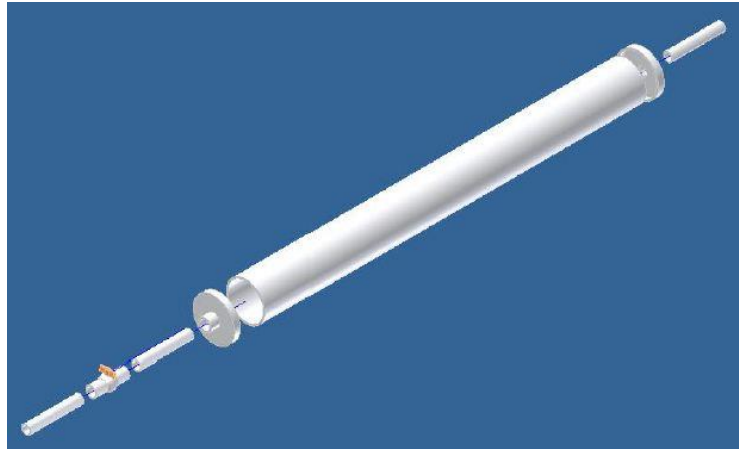
Figura 24. Arresta llamas



Fuente: WALSH, James. ROSS, Charles. SMITH, Michael. HARPER, Stephen. WILKINS, Allen. Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988, p. 31.

**3.6.4 Filtro para sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).** Al biogás generado es importante darle un tratamiento especial antes de ser utilizado, el H<sub>2</sub>S presente genera corrosión en las partes metálicas del sistema y olor desagradable al ser quemado, por ello, se busca disminuir sus niveles de concentración. Para llevar a cabo dicho proceso se instala un filtro de H<sub>2</sub>S en la línea de transporte (Figura 25).

Figura 25. Filtro para sulfuro de hidrógeno

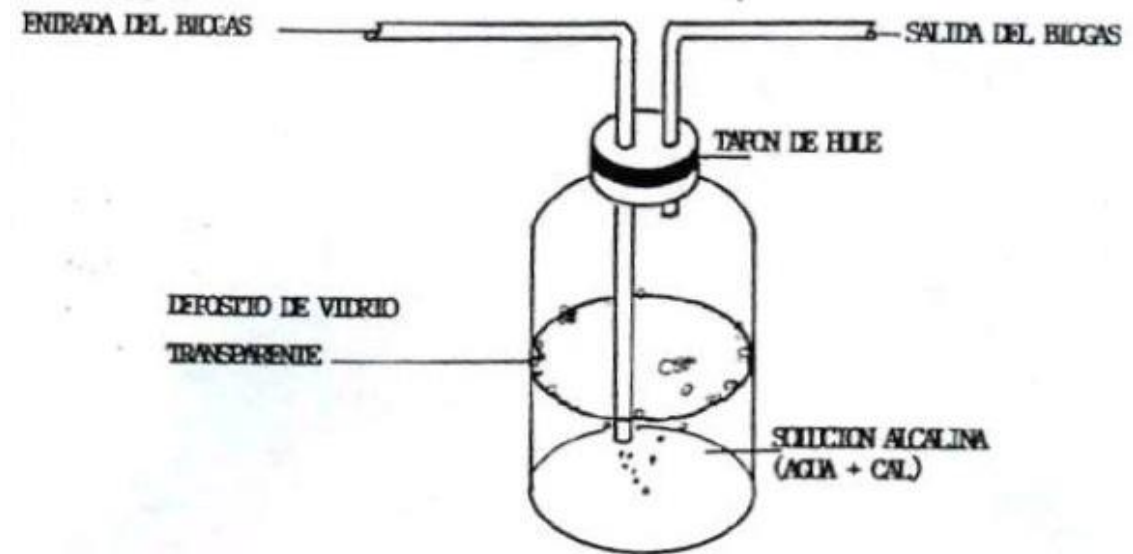


Fuente: HIDALGO BONILLA, José Alfredo; MARAVILLA CARRANZA, Víctor Arturo y RAMÍREZ CASTRO, William Omar. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS EN EL SALVADOR. Universidad “José Simeón Cañas”. 2010. p. 25.

**3.6.5 Filtro para dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).** La eliminación del CO<sub>2</sub> busca obtener un biogás más limpio y con mejores características energéticas.

En el caso de digestores domiciliarios de pequeña dimensión, por lo general los de geomembrana plástica, los cuales poseen una presión de generación muy baja, el biogás no puede vencer presiones que excedan el valor de 1 cm de columna de agua, para lo cual es recomendable utilizar filtros de CO<sub>2</sub> elaborados con recipientes, botellas plásticas o de vidrio (Figura 26), dentro de los cuales se colocará una solución alcalina (agua + cal). La solución se prepara agregando dos gramos de cal por cada litro de agua. Este filtro generalmente se ubica entre el biodigestor y el filtro para H<sub>2</sub>S, el recipiente debe de estar instalado en un lugar fijo, no en voladizo, y herméticamente sellado por su principio de funcionamiento [22].

Figura 26. Filtro para dióxido de carbono

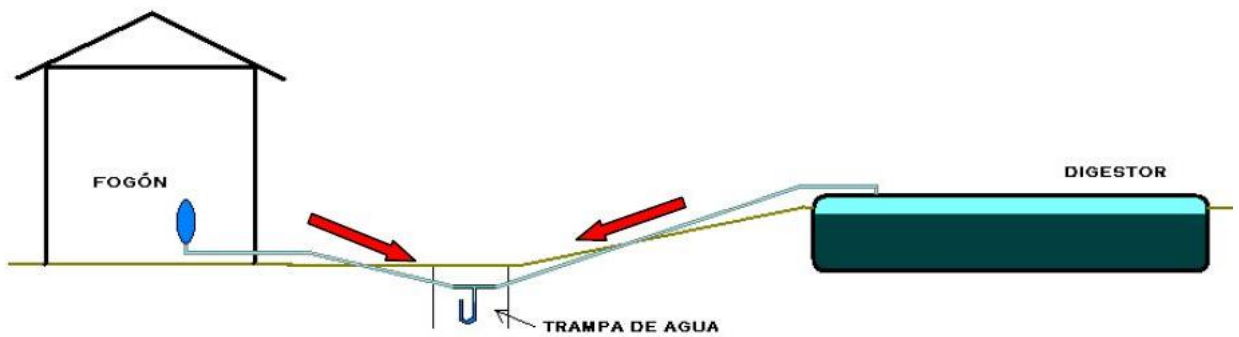


Fuente: HIDALGO BONILLA, José Alfredo; MARAVILLA CARRANZA, Víctor Arturo y RAMÍREZ CASTRO, William Omar. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS EN EL SALVADOR. Universidad “José Simeón Cañas”. 2010. p. 26.

**3.6.6 Trampa de agua.** El gas sale del biodigestor lleno de vapor de agua, sobre todo durante las horas soleadas. Cuando la tubería de transporte hacia el quemador pasa por un medio frío, por ejemplo dentro de la tierra, el vapor de agua se condensa y puede obstruir el flujo de gas, la trampa de agua ubicada en el punto más bajo de la pendiente extrae de la tubería el agua condensada (Figura 27).

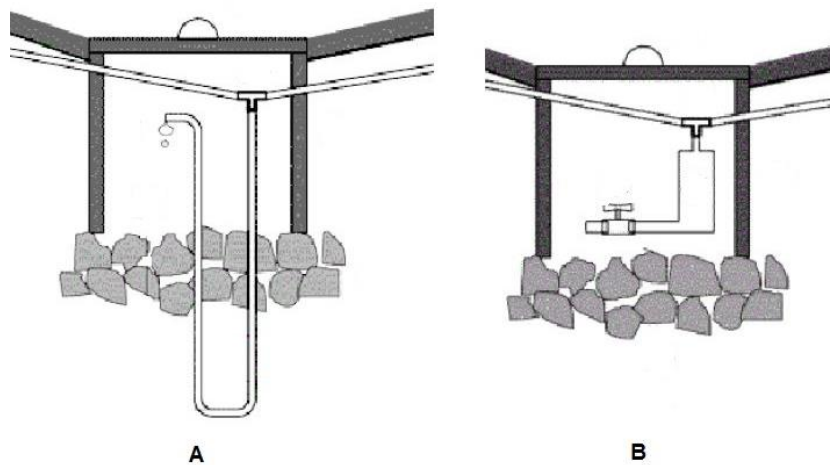
Para eliminar el condensado, se puede instalar un tubo en forma de U siempre lleno de agua para evitar que escape el gas (Figura 28A), o de forma manual, instalando una válvula por donde se deje salir el líquido contenido (Figura 28B).

Figura 27. Trampa de agua



Fuente: IAA y UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. MANUAL DE INSTALACIÓN DE UN BIODIGESTOR FAMILIAR TIPO MANGA PARA ZONAS ALTO-ANDINAS. 2007. p. 25.

Figura 28. Eliminación del condensado de la trampa de agua



Fuente: IAA y UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. MANUAL DE INSTALACIÓN DE UN BIODIGESTOR FAMILIAR TIPO MANGA PARA ZONAS ALTO-ANDINAS. 2007. p. 26. Modificado por el autor

### **3.7 NORMATIVIDAD**

La normatividad colombiana se encuentra plenamente definida para los gases combustibles de la segunda y tercera familia, sin embargo, para gases manufacturados como el biogás, pertenecientes generalmente a la primera familia, su regulación se encuentra en etapa de desarrollo.

#### **Uso comercial del biogás**

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) adscrita al Ministerio de Minas y Energía, es la entidad encargada de regular la producción, transporte, distribución y comercialización del biogás en Colombia [23].

La resolución No. 135 de 2012: Por la cual se adoptan normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con Biogás [24], corresponde a la última disposición de la CREG en relación a este tipo de combustible.

#### **Instalaciones para transporte y consumo de gas**

Las instalaciones para transporte y consumo de gas en Colombia se encuentran reguladas por la norma técnica colombiana (NTC):

- NTC 1746. Tubos y accesorios termoplásticos para la conducción de gases.  
Las tuberías para transporte de fluidos deben estar rotuladas con información respecto al límite de presión permisible para que el material mantenga su integridad, esta norma también enfatiza sobre la importancia de verificar la compatibilidad del material con la temperatura del fluido que transporta.  
Se verificará que las tuberías, accesorios y sustancias (en caso de requerirse) a emplear en la construcción de la línea para transporte del biogás cumplan estas condiciones y además tengan los sellos de certificación de calidad.

- NTC 2505. Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales.

La tubería para transportar el biogás se instalará 30 cm por debajo del nivel del suelo, tal como lo indica la NTC 2505.

- NTC 3527. Gases de ensayo, presiones de ensayo y categorías de los artefactos a gas

La norma NTC 3527 presenta la clasificación de los gases combustibles en función al índice de Wobbe, será consultada para clasificar el biogás a producir y poder realizar la conversión del quemador.

- NTC 3838. Presiones de operación permisibles para transporte y distribución de gases

Esta norma está desarrollada para regular las presiones de transporte y distribución de los gases. Las presiones a manejar en ésta aplicación son muy pequeñas, por lo tanto no hay riesgo de exceder los límites admitidos por la norma.

## 4. PRESENTACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLA EL PROYECTO

### 4.1 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DEL LUGAR

El presente trabajo se desarrolla en el predio “vivero La Fuente” del municipio de Los Santos Santander. La Tabla 23 resume algunas características del lugar.

Tabla 23. Características geográficas del lugar

<b>Municipio</b>	Los Santos
<b>Vereda</b>	Linderos
<b>Nombre del predio</b>	Vivero La Fuente
<b>Extensión</b>	2 hectáreas
<b>Altitud</b>	1640 msnm [25]
<b>Temperatura media anual</b>	19 °C (Ver Anexo A3)

### 4.2 DISTRIBUCIÓN DEL PREDIO

Aproximadamente, el predio se encuentra distribuido de la siguiente manera: 50% cultivado en cítricos (naranjos, mandarinos, limones), 30% son excavaciones para recolección de agua, 15% prado, 5% viviendas de personas, animales y almacenamiento de materiales; la Figura 29 corresponde a una fotografía satelital del lugar [25] donde se señala la ubicación de algunos puntos de interés para el presente trabajo.

Figura 29. Ubicación de fuentes de agua, excretas y sistemas de cocción



Fuente: Google Maps. *Vivero “la fuente”* [en línea]. 2014 [Fecha de consulta: octubre 13 de 2014]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/@6.8151299,-73.0777132,227m/data=!3m1!1e3>. Modificado por el autor

### 4.3 CONDICIONES PRELIMINARES

**4.3.1 Saneamiento.** Para saneamiento se dispone de un inodoro con tanque de 6 litros (Figura 30a) y descarga a pozo séptico (Figura 30b), este proceso emplea agua obtenida de pozo subterráneo de las mismas condiciones que la utilizada por

los habitantes para el consumo. Las aguas negras no reciben tratamiento alguno, simplemente son almacenadas.

Figura 30. Saneamiento en la vivienda



a. Inodoro tradicional



b. Pozo séptico

Los animales (bovinos y equinos) producen aproximadamente 20 Kg de excrementos al día, actualmente este material es aplicado directamente al suelo.

**4.3.2 Combustible para cocción de alimentos.** El GLP y la leña son las fuentes energéticas empleadas para cocción de alimentos, se consume un cilindro de 40 libras de GLP cada 6 meses.

**4.3.3 Fertilización de cultivos.** La fertilización de los cítricos se lleva a cabo con lombrinaza producida en el sitio, urea, fosfato y potasio. Anualmente se aplican 0.5 Kg de urea, 50 gramos de fósforo y 100 gramos de potasio por árbol.

Actualmente el predio consta de 220 árboles, por lo tanto se emplean cerca de 110 Kg de urea, 11 Kg de fósforo y 22 Kg de potasio.

## **5. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN: PLANTEAMIENTO, EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

### **5.1 DISPOSICIÓN DEL SISTEMA**

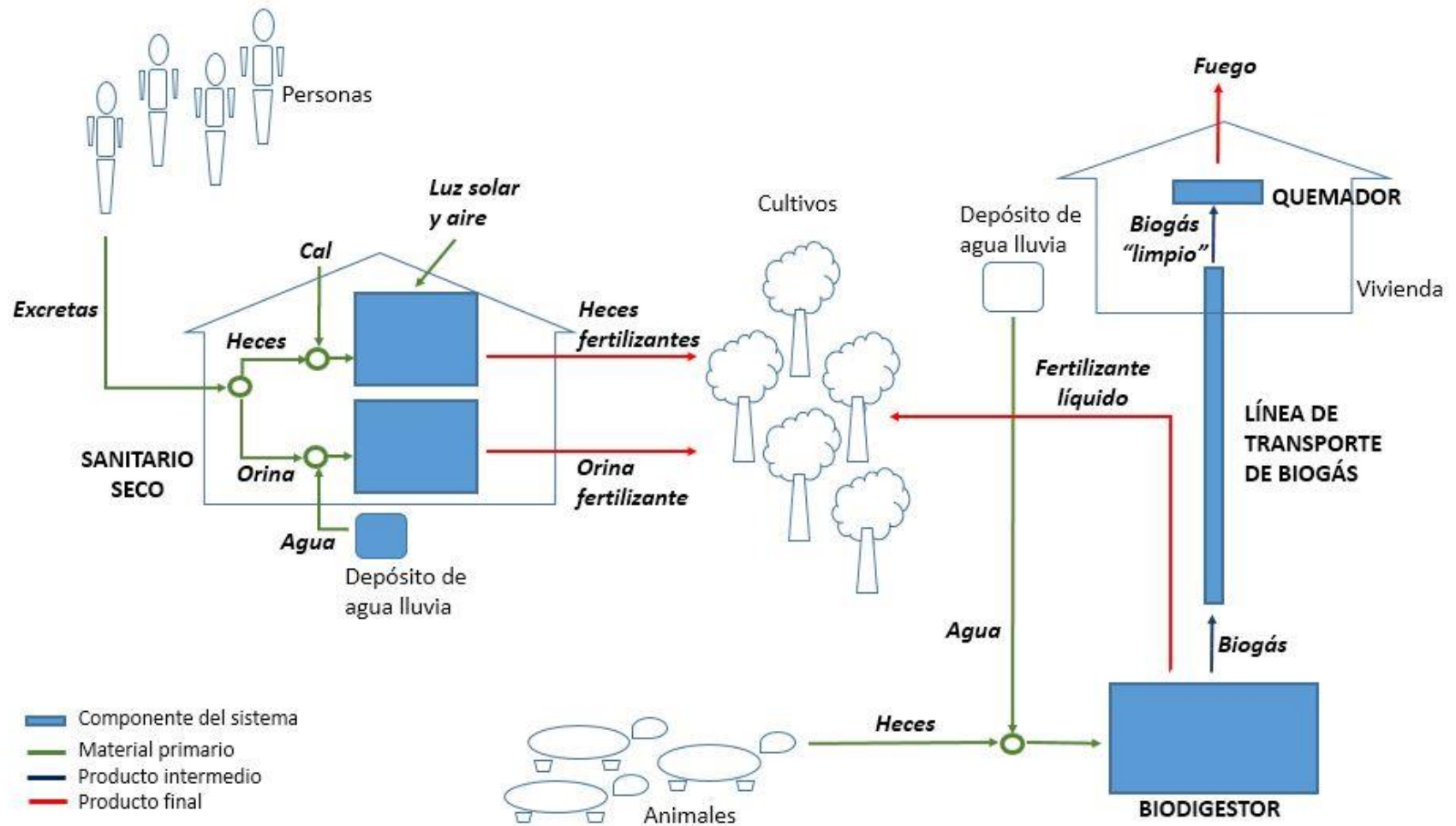
La Figura 31 corresponde a la disposición de los componentes del sistema a desarrollar y el flujo de materias primas y productos a través de ellos.

### **5.2 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS**

**5.2.1 Alternativas para sanitario seco.** Buscando garantizar una efectiva destrucción de los agentes patógenos y teniendo en cuenta la condición de baja precipitación del lugar donde se implementará, se evaluarán las 4 alternativas de sanitarios deshidratadores presentados en la Tabla 6.

**5.2.2 Alternativas para biodigestor.** En la Tabla 13 se describieron los 3 tipos de biodigestores de flujo semicontinuo más utilizados a escala doméstica, a continuación serán evaluados para seleccionar el que mejor se ajuste a las condiciones actuales del lugar.

Figura 31. Disposición del sistema



### **5.3 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS**

Con miras a satisfacer de manera favorable las necesidades del usuario, por medio de la función de calidad (QFD) se evaluarán las alternativas de solución para dos componentes del sistema: sanitario seco y biodigestor.

#### **5.3.1 Requerimientos del consumidor**

- Que procese y transforme toda la materia producida
- Que los productos queden listos para el uso
- Económico
- Seguro
- Sencillo
- Durable
- Fácil de transportar al sitio
- Fácil de realizar montaje
- Fácil de utilizar
- Fácil de realizar mantenimiento

#### **5.3.2 Requerimientos de diseño del producto**

- Accesibilidad a los materiales de fabricación
- Accesibilidad a mano de obra calificada para la fabricación
- Facilidad para llenado, vaciado y limpieza
- Impermeabilidad
- Resistencia al daño por ataque químico
- Resistencia al daño por fuerzas externas

**5.3.3 Matriz de calidad.** Con los requerimientos hechos por el consumidor y el establecimiento de los requerimientos para el diseño del producto, se realiza la matriz de calidad (Tabla 24).

A los requerimientos del cliente ordenados en la primera columna de la matriz se les asignó valores entre 1 y 10 según la importancia dada por este (fondo rojo), siendo:

1: Levemente importante

10: Muy importante

Los requerimientos de diseño se ordenaron en la primera fila de la matriz y en cada intersección con los requerimientos del cliente se asignaron valores según el grado de relación entre los dos (fondo verde), siendo:

0: Sin relación

1: Ligera

3: Media

9: Fuerte

Posteriormente se multiplican los valores de importancia con los de grado de relación y se producen los valores para cada casilla.

Los resultados de cada columna se suman y son presentados al final de cada tabla.

**5.3.4 Ponderación de alternativas.** En la Tabla 25 y Tabla 26 se lleva a cabo la ponderación de alternativas para sanitario seco y biodigestor respectivamente.

Tabla 24. Matriz de calidad

REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE		REQUERIMIENTOS DE DISEÑO DEL PRODUCTO													
Requerimiento	Importancia	Accesibilidad a los materiales de fabricación				Accesibilidad a mano de obra calificada para la fabricación		Facilidad de llenado, vaciado y limpieza		Impermeabilidad		Resistencia al daño por ataque químico		Resistencia al daño por interacciones externas	
		Que procese y transforme toda la materia prima producida	8	0	0	3	24	0	0	9	72	1	8	0	0
Que los productos queden listos para el uso	8	0	0	3	24	0	0	9	72	1	8	0	0		
Económico	10	9	90	9	90	3	30	3	30	9	90	9	90		
Seguro	8	0	0	3	24	1	8	9	72	9	72	9	72		
Sencillo	6	1	6	0	0	9	54	1	6	0	0	0	0		
Durable	8	1	8	3	24	1	8	3	24	9	72	9	72		
Fácil de transportar al sitio	4	3	12	0	0	1	4	1	4	0	0	0	0		
Fácil de realizar montaje	6	1	6	3	18	1	6	3	18	1	6	0	0		
Fácil de utilizar	8	0	0	0	0	9	72	3	24	0	0	0	0		
Fácil de realizar mantenimiento	8	9	72	3	24	9	72	3	24	9	72	9	72		
<b>Total</b>				194	228	254		346		328		306			

Tabla 25. Ponderación de alternativas para sanitario seco

REQUERIMIENTOS DE DISEÑO			ALTERNATIVAS								
			SANITARIO CON DOBLE CÁMARA EN VIETNAM		SANITARIO CON DOBLE CÁMARA EN AMÉRICA CENTRAL - MÉXICO		SANITARIO CON DOBLE CÁMARA Y CALENTADOR SOLAR EN ECUADOR		SANITARIO WM EKOLOGEN EN SUECIA		
CRITERIO	PUNTAJE	POND.	NOTA	PESO	NOTA	PESO	NOTA	PESO	NOTA	PESO	
Impermeabilidad	346	0.209	2	0.418	3	0.627	4	0.836	5	1.045	
Resistencia al daño por ataque químico	328	0.198	4	0.792	4	0.792	4	0.792	5	0.990	
Resistencia al daño por interacciones externas	306	0.185	3	0.554	5	0.924	5	0.924	4	0.739	
Facilidad de llenado, vaciado y limpieza	254	0.153	4	0.614	5	0.767	5	0.767	3	0.460	
Accesibilidad a mano de obra calificada para fabricación	228	0.138	5	0.688	5	0.688	5	0.688	3	0.413	
Accesibilidad a los materiales de fabricación	194	0.117	5	0.586	5	0.586	4	0.469	3	0.351	
TOTAL				3.652		4.384		<b>4.476</b>		4.000	

Tabla 26. Ponderación de alternativas para biodigestor

REQUERIMIENTOS DE DISEÑO			ALTERNATIVAS					
			BIODIGESTOR DE CÚPULA FIJA		BIODIGESTOR DE CÚPULA FLOTANTE		BIODIGESTOR DE MEMBRANA TUBULAR	
CRITERIO	PUNTAJE	POND.	NOTA	PESO	NOTA	PESO	NOTA	PESO
Impermeabilidad	346	0.209	4	0.836	4	0.836	5	1.045
Resistencia al daño por ataque químico	328	0.198	4	0.792	3	0.594	5	0.990
Resistencia al daño por interacciones externas	306	0.185	4	0.739	4	0.739	3	0.554
Facilidad de llenado, vaciado y limpieza	254	0.153	3	0.460	3	0.460	3	0.460
Accesibilidad a mano de obra calificada para fabricación	228	0.138	4	0.551	3	0.413	5	0.688
Accesibilidad a los materiales de fabricación	194	0.117	5	0.586	3	0.351	3	0.351
TOTAL			3.964		3.394		<b>4.089</b>	

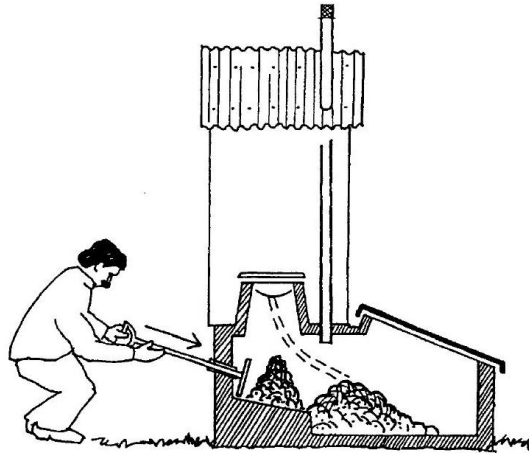
## 5.4 ALTERNATIVAS GANADORAS

**5.4.1 Sanitario con doble cámara y calentador solar.** La humedad es el factor de riesgo más importante en un sistema sanitario basado en la deshidratación; pero con sólo agregar un calentador solar a la cámara de proceso se reduce dicho riesgo.

El objetivo del proyecto “Tecpan” en El Salvador, de 1994 a 1997, fue el probar y desarrollar un sistema sanitario basado en la deshidratación con desviación de orina, con calentador solar para un sanitario con una sola cámara de tratamiento. La materia en la cámara de tratamiento es excreta humana y cenizas, y/o una mezcla de tierra y cal en proporción de 5:1. La orina se canaliza hacia un pozo de absorción ubicado cerca del sanitario (ya que en América Central no se utiliza la orina como fertilizante). El papel higiénico usado se deposita en una caja o una bolsa que se coloca cerca de la taza para quemarlo periódicamente, lo que es práctica común en El Salvador. Cada una o dos semanas, se levanta la tapa del recipiente que hace de calentador solar y se empuja hacia atrás el cúmulo de heces, ceniza, cal y arena que se encuentra debajo de la taza del baño. Esta operación se realiza con un azadón o un rastrillo, herramientas que pueden guardarse en la cámara de tratamiento. Cada dos o tres meses se retira el cúmulo de material seco desodorizado; se guarda en un costal y se almacena fuera del sanitario para su reciclaje en el patio. Algunas unidades han sido equipadas con un empujador (Figura 32), el cual sirve para echar hacia el fondo el material acumulado [3].

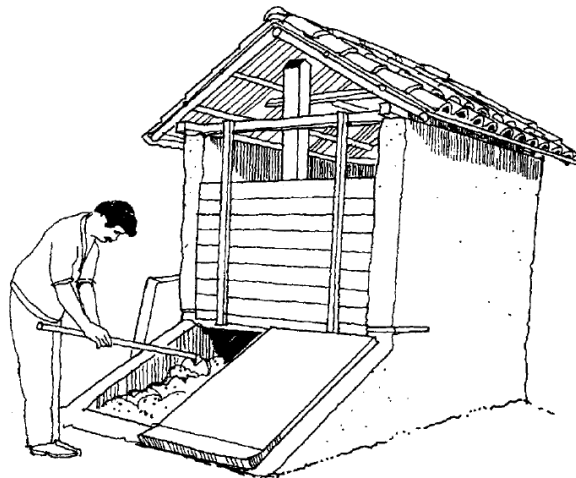
Desde 1985, en la región andina de Ecuador, se han construido unos 300 sanitarios de doble cámara con tapas que hacen de calentadores solares (Figura 33). Se optó por un sistema de reciclaje, en un intento de subsanar el problema crónico de pérdida de fertilidad del suelo en las regiones a gran altura de 3500 a 4000 metros sobre el nivel del mar.

Figura 32. “Empujador” hacia el colector con calentador solar



Fuente: SREY, Steven, *et al.* SANEAMIENTO ECOLÓGICO. Estocolmo: Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo / Fundación Friedrich Ebert, 1999. p. 29.

Figura 33. Sanitario seco con doble cámara y calentador solar



Fuente: SREY, Steven, *et al.* SANEAMIENTO ECOLÓGICO. Estocolmo: Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo / Fundación Friedrich Ebert, 1999. p. 30.

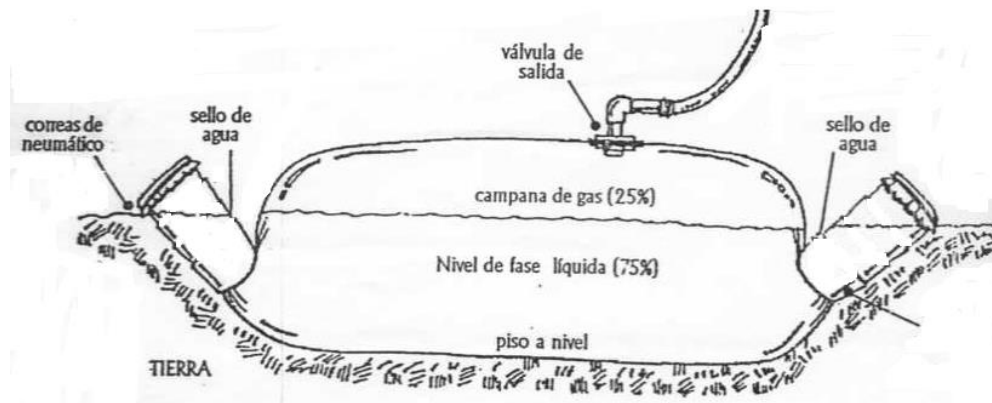
Debido a la sequedad de la atmósfera, en esta región no hubo necesidad de desarrollar técnicas para desviar la orina. Después de cada uso, se espolvorea aserrín y/o cenizas. Cada cámara se utiliza por seis meses antes de cambiar a la siguiente, y cada una tiene una tapa hecha con un bastidor de madera. Este bastidor se cubre con lámina de acero galvanizado, pintada de negro para que absorba la energía solar y contribuya al proceso de deshidratación. Las cámaras cuentan con un tubo de ventilación, mientras que las tapas tienen un respiradero para la entrada de aire [3].

**5.4.2 Biodigestor de membrana tubular.** El biodigestor de membrana tubular tiene una geometría “alargada” donde la mezcla de materia orgánica y agua circula en “flujo pistón”, como si fuese la circulación que se produce en el intestino del ser humano o de otro mamífero. Este tipo de flujo permite que cada porción que ingresa por un extremo cumpla el tiempo de retención necesario dentro del biodigestor antes de salir por el otro extremo [26].

Se instalan enterrados para mitigar las oscilaciones fuertes de la temperatura ambiental, la excavación suele realizarse en forma de “V” buscando no desestabilizar el terreno.

La alimentación se realiza por un extremo que comunica a la cámara de digestión, la extracción del material digerido (fertilizante) se hace por el otro extremo; dentro de la cámara se reserva un cierto volumen incomunicado con el exterior mediante sello hidráulico para almacenar el biogás producido (Figura 34).

Figura 34. Biodigestor de membrana tubular



Fuente: MENDOZA FLORES, Alexi Antonio. *BIODIGESTOR DE FLUJO CONTINUO* [en línea]. 2004 [fecha de consulta: octubre 13 de 2014]. Disponible en: <<http://dc384.4shared.com/doc/kdXKKeTd/preview.html>>

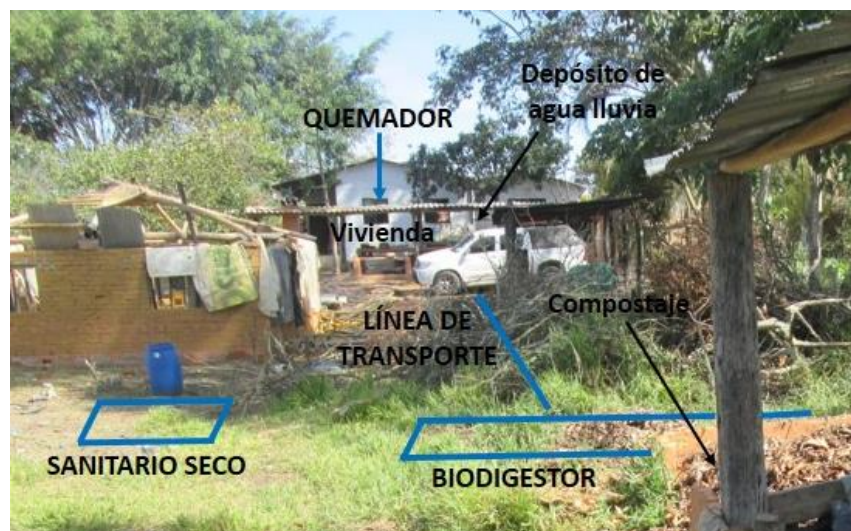
## 6. DISEÑO DEL SISTEMA

### 6.1 UBICACIÓN

En la Figura 35 se muestra la ubicación seleccionada para el montaje del sistema, los aspectos tenidos en cuenta fueron:

- Cercanía a la vivienda, animales y cultivos
- Área despejada de árboles o construcciones que impidan el paso de los rayos solares hacia el sanitario seco y el biodigestor
- Cierta inclinación del terreno para evitar inundaciones
- Facilidad de acceso

Figura 35. Ubicación seleccionada para el sistema



(Ver Anexo B1)

## 6.2 DISEÑO DEL SANITARIO SECO

El sanitario seco diseñado a continuación se muestra en los Anexos B2, B3 y B4

**6.2.1 Materia prima.** El lugar es habitado de lunes a viernes por una persona, mientras que los sábados y domingos suelen permanecer en el sitio 3 personas.

El sanitario de la vivienda dispone de un tanque de 6 litros de capacidad, que se evacua completamente cada vez que se hace uso de él. Una persona adulta en condiciones normales de salud produce entre 0.8 y 1.5 litros de orina al día [7], que en promedio se evacua mediante 6 micciones [27]. Por otro lado, la producción de heces fecales y la frecuencia de las deposiciones es muy variable entre uno y otro individuo, se estima 1 deposición diaria de 0.250 [Kg] por persona [9].

Con base a la anterior información, en las Figuras 36, 37 y 38 se muestra la producción esperada de orina, heces fecales y el gasto de agua para saneamiento por parte de los habitantes de la vivienda en una semana común.

Figura 36. Producción semanal de orina

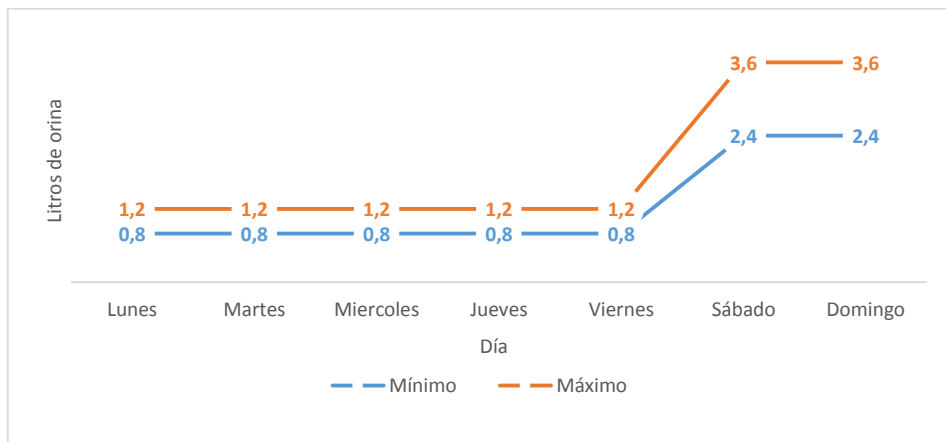
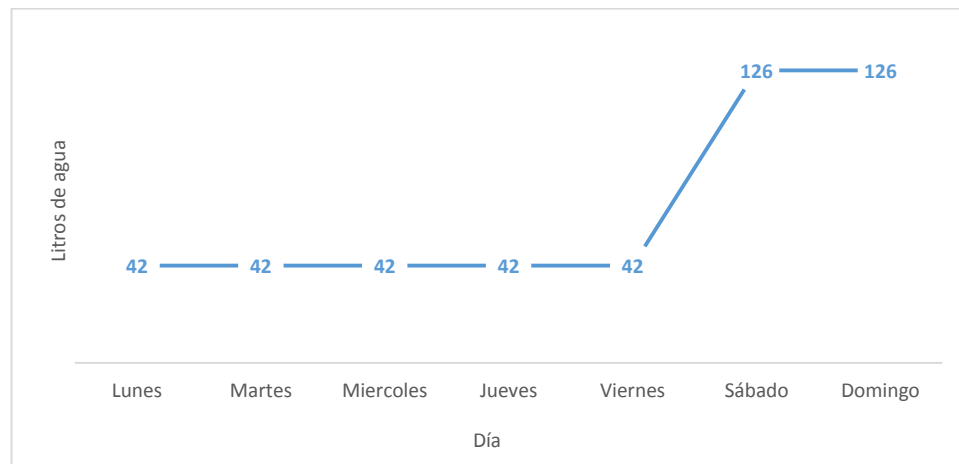


Figura 37. Producción semanal de heces fecales humanas



Figura 38. Gasto semanal de agua para saneamiento



**6.2.2 Elementos del sanitario seco.** Los elementos que harán parte integral en el funcionamiento del sanitario son los siguientes (ver Anexo B2).

- Inodoro seco: presenta un diseño que evita la mezcla de orina y heces fecales desviándolas hacia compartimientos diferentes (Figura 39).
- Cámaras de recolección de orina y heces: almacenan la orina y las heces provenientes del inodoro seco durante el tiempo de destrucción de los patógenos.
- Empujador manual de heces: lleva las heces desde la base del inodoro hasta las cámaras de recolección (Figura 40).
- Tubos extractores de humedad y olores.
- Canal y tanque para recolección de agua lluvia (Figura 41).
- Mangueras para transporte de agua lluvia y orina.

Figura 39. Inodoro seco



Figura 40. Empujador de heces

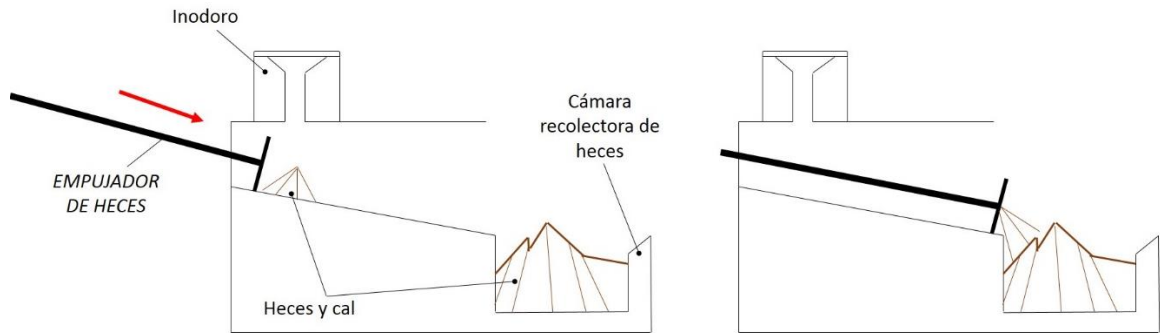
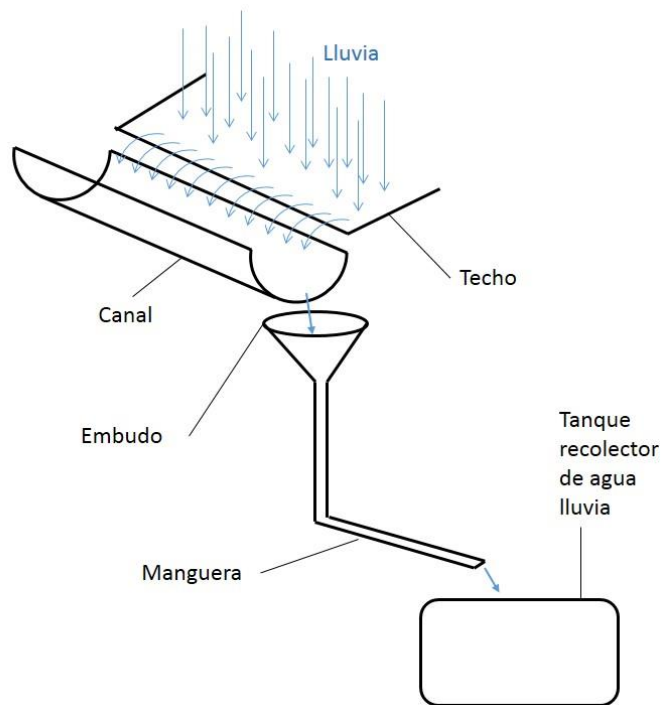


Figura 41. Sistema recolector de agua lluvia



**6.2.3 Materiales estructurales.** El sanitario seco fue desarrollado como una alternativa ecológicamente sostenible, siguiendo esta línea, se seleccionarán para la construcción de su estructura en la medida de lo posible materiales reciclables y del entorno que minimicen impacto ambiental y costo (ver Anexo B3).

- Paredes y piso de bahareque:

Ésta técnica de construcción consiste en realizar una trama de madera sobre la cual se aplica tierra formando un muro. El bahareque es económico y presenta muy buen aislamiento térmico.

Las paredes y piso del sanitario seco se realizarán en bahareque, para ello se empleará guadua que ha sido desechada (Figura 42), la tierra se obtendrá de los alrededores.

Figura 42. Material vegetal para bahareque



- Techo verde:

El sanitario tendrá un techo verde, se busca de esta manera la compatibilidad de la estructura con la vegetación del entorno, además, junto con el bahareque poseen buen aislamiento térmico que se traerá confort para el usuario.

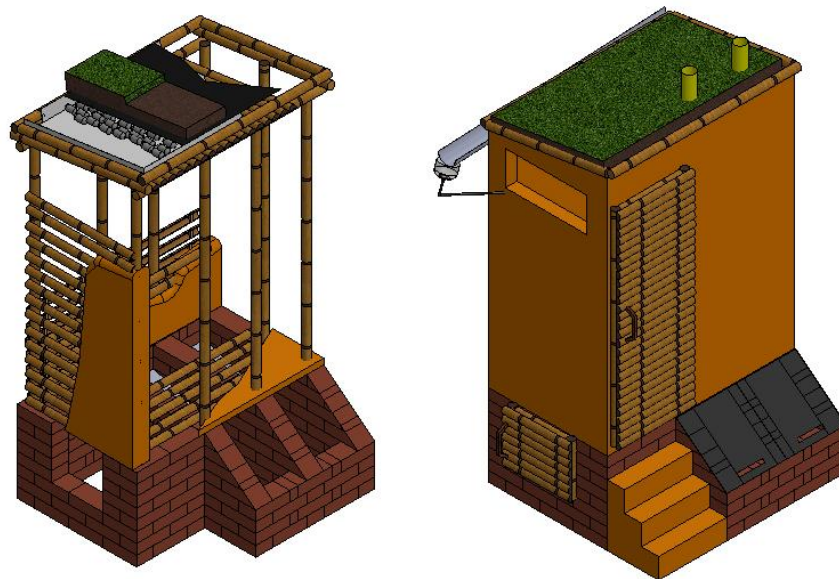
Para la construcción del techo verde se empleará guadua, piedras, tierra, plántulas de maní forrajero y como único material no orgánico geomembrana de PVC reciclada.

- Cámaras recolectoras de ladrillo temosa

La decisión de seleccionar estos materiales para la construcción de las cámaras está motivada por la necesidad de conseguir impermeabilidad, de esta manera no se afectará al entorno ni al material en deshidratación.

En la Figura 43 se muestra la estructura del sanitario y su apariencia final.

Figura 43. Sanitario seco



**6.2.4 Dimensionamiento de la cámara de recolección y almacenamiento de orina.** La orina se recolectará y almacenará en recipientes plásticos los cuales estarán integrados al sanitario, en la Tabla 5 se propone un tiempo de almacenamiento de la orina ( $t_{alm\ orina}$ ) de 6 meses (24 semanas) para garantizar la mortandad de los patógenos y poder ser empleada para fertilizar cualquier cultivo sin presentar riesgo para la salud, teniendo en cuenta una producción semanal máxima ( $\dot{V}_{orina}$ ) de 13.2 litros (ver Figura 36) en la ecuación 11 se calcula el volumen requerido de la cámara:

$$V_{cám\ orina} = (\dot{V}_{orina})(t_{alm\ orina}) \quad (11)$$

$$V_{cám\ orina} = \left(13.2 \left[\frac{\text{litros}}{\text{semana}}\right]\right) (24[\text{semanas}]) = 317 [\text{litros}]$$

$$V_{cám\ orina} = 0.317 [m^3]$$

(Ver Anexos B5 y B6)

**6.2.5 Dimensionamiento de las cámaras de recolección, deshidratación y almacenamiento de heces.** El sanitario va a disponer de dos cámaras que se alternarán en la medida que sean llenadas, esto se hace para conseguir mejor deshidratación del material, para lograr buena destrucción de los agentes patógenos se recomienda un tiempo de almacenamiento de las heces ( $t_{alm\ heces}$ ) mínimo de 3 meses (ver Tabla 1).

Las cámaras deben tener tamaño suficiente para almacenar el material agregado durante el tiempo de transformación requerido; la Figura 37 muestra una producción semanal de 2.75 [Kg] de heces fecales, a las cuales se agregará igual cantidad de cal como material deshidratante, de esta manera, un flujo másico ( $\dot{m}_{heces-cal}$ ) de 5.5 Kg por semana se estará ingresando a la cámara. Para estimar el volumen que ocupará la mezcla (ecuación 12), se asume que el material luego de la

transformación tomará características similares a la tierra seca, densidad ( $\rho_{ts}$ ) igual a 960 [Kg/m<sup>3</sup>] [28]. Por lo tanto, el volumen mínimo que debe tener cada cámara es:

$$V_{cám\ heces} = \frac{(\dot{m}_{heces-cal})(t_{alm\ heces})}{\rho_{ts}} \quad (12)$$

$$V_{cám\ heces} = \frac{\left(5.5 \left[\frac{Kg}{semana}\right]\right)(12\ semanas)}{960 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]} = 0.06875[m^3]$$

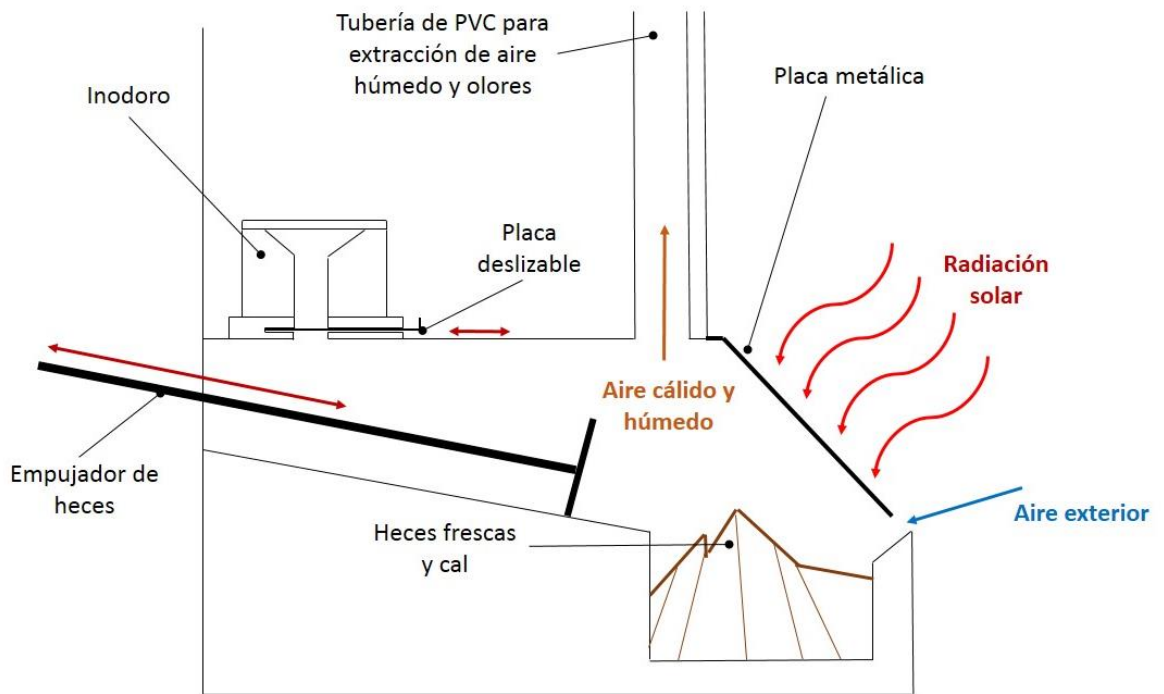
(Ver Anexos B5 y B6)

**6.2.6 Mecanismo para deshidratación de las heces.** La deshidratación de las heces se conseguirá mediante la aplicación de cal y el ingreso de corrientes de aire en forma natural, dicho proceso se acelerará al colocar una placa metálica pintada de negro que capture la radiación solar y transfiera calor a las cámaras. La mezcla de heces frescas y cal será arrastrada desde la parte inferior del inodoro, hasta la cámara de deshidratación por medio de un empujador que se operará manualmente desde el exterior del sanitario (ver Anexos B7 y B8).

Al ingresar a la cámara, el aire fresco del exterior descenderá, absorberá humedad de la mezcla y reemplazará al aire que había ingresado previamente y se encuentra a mayor temperatura; en la medida que va absorbiendo agua también va calentándose y ascenderá tras la llegada de nuevo aire del exterior, finalmente el aire caliente y húmedo se evacuará al exterior por tiro natural a través de tubería de PVC.

Por la tubería también se expulsarán los olores que puedan presentarse, estos son el resultado de procesos bacterianos, la cal tiene efecto antiséptico que actúa inhibiendo las bacterias, por lo tanto la emisión de olores está fuertemente controlada. Como medida adicional se instalará una placa deslizable en la base del inodoro para obstruir el paso entre éste y las cámaras (Figura 44).

Figura 44. Mecanismo para la deshidratación de las heces



### 6.3 DISEÑO DEL BIODIGESTOR

El biodigestor fundamentalmente está formado por una geomembrana flexible tubular, zanja excavada para montaje de la geomembrana y válvula de seguridad para limitar la presión; los demás elementos corresponden a los tanques y tuberías de alimentación y salida de material y a la tubería de extracción del biogás producido (ver Anexos B9 y B10).

**6.3.1 Dimensionamiento de la zanja y la geomembrana flexible tubular.** El volumen de la zanja será ocupado para la circulación de la mezcla de un extremo a otro mientras sufre su proceso de transformación en fertilizante, el volumen restante dentro de la geomembrana, quedará reservado para almacenar el biogás producido (Figura 45).

Figura 45. Geomembrana montada en la zanja



➤ **Materia prima**

El biodigestor tendrá la capacidad de procesar 20 Kg diarios de excrementos.

El material orgánico se mezcla con agua en proporciones másicas que suelen ser de 1:1 o 1:2 [2]. Debido a que el material a utilizar es fresco, con un porcentaje de humedad del 80% (ver Tabla 14), se selecciona la relación 1:1, por lo tanto, los 20 Kg de estiércol se mezclarán con 20 Kg de agua completando 40 Kg de mezcla líquida.

Por el alto contenido de humedad, la densidad del estiércol es cercana a la del agua\*. Así, el flujo volumétrico ( $\dot{V}$ ) será aproximadamente  $0.04 \left[ \frac{m^3}{día} \right]$

➤ **Tiempo de retención**

En la sección 3.3.2.2, se definió el tiempo de retención como el tiempo necesario para que la materia orgánica se degrade. La forma de estimarlo consiste en multiplicar 20 días (tiempo de retención para una temperatura óptima de 30 °C) por un factor de corrección, el factor de corrección depende de la temperatura media anual del sitio donde se ubica el sistema.

La zona de nuestro interés presenta una temperatura media anual de 19 °C (ver Tabla 20). Para esta temperatura corresponde un factor de corrección ( $fc$ ) de 2.5 (ver Figura 16), en la ecuación 13 se calcula el tiempo de retención ( $tr$ ) de la mezcla.

$$tr = 20(fc) = (20[días])(2.5) = 50[días] \quad (13)$$

➤ **Volumen requerido**

Al biodigestor ingresará diariamente un paquete de mezcla líquida de 40 litros (0.04 m<sup>3</sup>) el cual, producirá un “efecto pistón” sobre el material estancado y lo hará desplazarse progresivamente hacia el extremo de salida, la geomembrana debe tener la capacidad de almacenar cada paquete de mezcla durante el tiempo de

---

\* La densidad del agua dulce es cercana a 1000 [Kg/m<sup>3</sup>]

retención para que su tratamiento sea completo, de esta manera, en la ecuación 14 se calcula el volumen del que debe disponer la geomembrana para almacenar el material líquido.

$$V_{\text{líquido}} = (\dot{V})(tr) = \left(0.04 \left[\frac{m^3}{\text{día}}\right]\right) (50[\text{día}]) = 2[m^3] \quad (14)$$

➤ **Perfil transversal de la zanja**

El perímetro transversal de la geomembrana (Figura 46a) se debe adaptar a la geometría de la zanja (Figura 46b). En la ecuación 15 se presenta tal condición.

$$2\pi r = b + 2\sqrt{h^2 + x^2} + \theta r \quad (15)$$

Para tener estabilidad en la pared se excava el perfil en forma trapezoidal. La relación dada en la ecuación 16 especifica dicha característica. Las Ecuaciones 17 y 18 relacionan el ancho superior de la zanja con las demás dimensiones (Figura 46b)

$$\frac{x}{h} = 0.3 \quad (16)$$

$$a = 2r \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (17)$$

$$a = b + x \quad (18)$$

Las áreas trasversales del volumen trapezoidal (destinado para el depósito de la mezcla líquida) y circular (correspondiente al depósito de biogás producido) se expresan en las ecuaciones 19 y 20 respectivamente (Figura 46b y 46c).

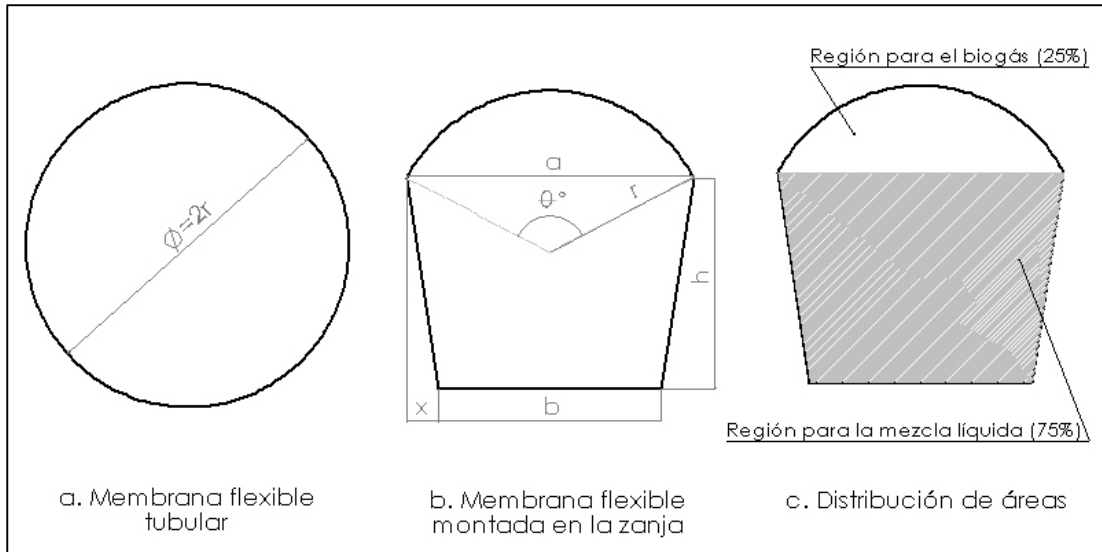
$$A_{\text{líquido}} = \frac{(b+a)}{2} h \quad (19)$$

$$A_{\text{gas}} = \pi r^2 \frac{\theta}{2\pi} - r^2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (20)$$

La relación entre dichas áreas (Figura 46c) se expresa en la ecuación 21.

$$\frac{A_{\text{líquido}}}{A_{\text{gas}}} = 3 \quad (21)$$

Figura 46. Perfil transversal de la geomembrana



➤ **Longitud**

La longitud de la geomembrana y la zanja se expresa en la ecuación 22.

$$L = \frac{V_{\text{liquido}}}{A_{\text{liquido}}} = \frac{2}{A_{\text{liquido}}} [m] \quad (22)$$

➤ **Diámetro de la geomembrana**

Las Ecuaciones 15 a 22, conforman un sistema de 8 ecuaciones con 9 incógnitas, para poder solucionar se debe seleccionar el valor del radio (r) de la geomembrana, en dicha selección se considerarán 2 aspectos, el primero de tipo operacional y el segundo de tipo económico:

- **Relación longitud/diámetro**

Para conseguir el volumen deseado se podrán utilizar diversas relaciones de longitud/diámetro. Como es de esperar, un mayor diámetro requerirá una menor longitud.

No conviene biodigestores demasiado largos ni cortos, una relación adecuada se encuentra entre 5 y 10 siendo mejor, en la medida que se acerque a 7 [29]

#### - **Área superficial**

A menor área superficial de la geomembrana, menores son las cantidades de material para su fabricación y consecuentemente menor su costo. El área superficial está dada por la ecuación 23.

$$A_{superficial} = A_{tapas} + A_{cilindro} = 2\pi r^2 + 2\pi rL \quad (23)$$

#### ➤ **Dimensiones de la zanja y la geomembrana**

En la Tabla 27 se presentan las relaciones longitud/diámetro y las áreas superficiales para distintos radios al solucionar el sistema de Ecuaciones 13-21.

De los radios ingresados, tan solo 2 cumplen con la condición de relación longitud/diámetro entre 5 y 10, al mirar el segundo aspecto relacionado con la menor cantidad de material requerido para la construcción, se decide seleccionar radio (r) igual a 0.45 [m].

De esta manera se obtienen las dimensiones de construcción de la geomembrana y la zanja presentadas en las Tablas 28 y 29 (ver Anexos B11 y B12).

**6.3.2 Características de la geomembrana flexible tubular.** La geomembrana suministrada por el fabricante, presenta las siguientes características:

- Bridas para unión de las tuberías con los orificios de carga de materia prima, descarga de fertilizante, vaciado y extracción de biogás. Los orificios de carga, descarga y vaciado se seleccionan con diámetros de 4 pulgadas buscando facilitar el flujo de material, para la extracción del biogás el orificio es de 2 pulgadas dado que este es el tamaño de brida estándar manejado del fabricante.

- Espesor de 1000 micras, según el fabricante no se debe presurizar por encima de los 15 cm de columna de agua\*.
- Forma tubular lograda mediante uniones termofusionadas de secciones del material.
- Color negro para aumentar la absorción de calor por radiación solar.

Tabla 27. Comportamiento de relación la relación L/D y área superficial al variar r

Radio (r) [m]	Diámetro (D=2r) [m]	Longitud (L) [m]	Relación L/D	Área superficial [m <sup>2</sup> ]
0.3	0.6	10.82	18.04	20.97
0.35	0.7	7.953	11.36	18.26
0.4	0.8	6.089	7.61	16.31
0.45	0.9	4.811	5.35	14.87
0.5	1	3.897	3.897	13.81
0.55	1.1	3.22	2.928	13.03
0.6	1.2	2.706	2.255	12.46

Tabla 28. Dimensiones de la geomembrana

Dimensión	Valor [m]
Diámetro (D)	0.9
Longitud (L)	4.8

\* El fabricante recomienda utilizar este límite de presión en la válvula de seguridad

Tabla 29. Dimensiones de la zanja

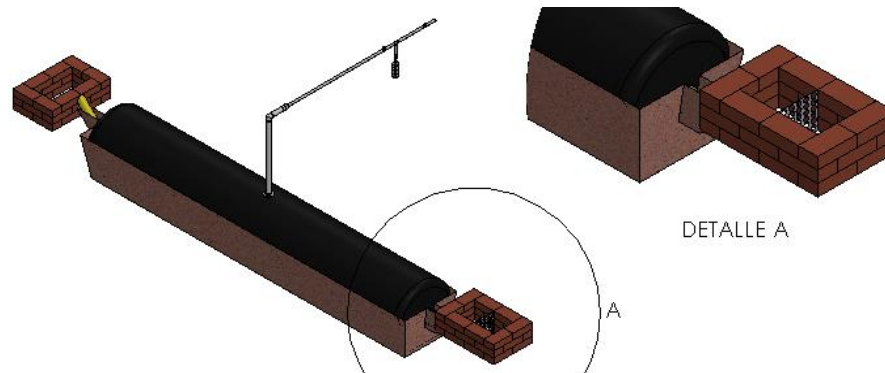
Dimensión	Valor [m]
Ancho superior (a)	0.8
Ancho inferior (b)	0.62
Profundidad (h)	0.58
Longitud (L)	4.8

**6.3.3 Tanques de carga y descarga.** El biodigestor requiere de dos tanques, uno de ellos se emplea para realizar la mezcla de estiércol y agua en las proporciones adecuadas previa alimentación de la geomembrana, va conectado mediante tubo de PVC a la brida del puerto de carga (ver Anexo B13); el otro tanque recoge el fertilizante líquido producido.

Los dos se fabricarán del mismo tamaño y deben tener la capacidad de contener al menos, el volumen diario de mezcla que cruza las fronteras de la geomembrana.

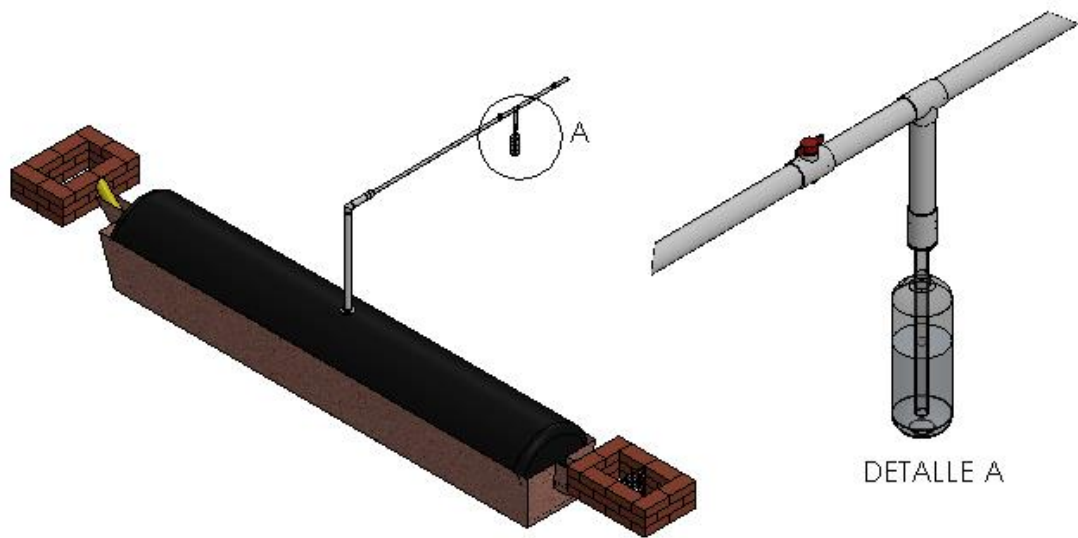
En el tanque de carga se instalará una malla para impedir el paso de algunos sólidos presentes en el estiércol que tienden a flotar y bloquear la salida del biogás que emergerá desde la mezcla (Figura 47).

Figura 47. Tanque de carga



**6.3.4 Válvula de seguridad.** La válvula de seguridad liberará el exceso de biogás evitando que la presión dentro de la geomembrana exceda los 15 cm de columna de agua recomendados. Sus accesorios, ensamble y llenado se muestran en el Anexo B14 (Figura 48).

Figura 48. Válvula de seguridad



#### 6.4 CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS PRODUCIDO

Tras la construcción y puesta en marcha del biodigestor se inició la producción regular de biogás, una muestra de éste fue obtenida, almacenada en bolsa Tedlar y llevada al laboratorio de cromatografía solicitando su análisis con miras a conocer la composición, el reporte del laboratorio se presenta en el Anexo C1.

Los resultados fueron entregados como concentración ppm en volumen (Tabla 30), el análisis se realizó tomando una muestra de 500 [µL] con una jeringa gas tight, e inyectándola al cromatógrafo a **presión atmosférica: 88542 [Pa]** (en la ciudad de Bucaramanga) **y temperatura del laboratorio: 20°C**.

Tabla 30. Resultados cromatografía del biogás producido

Componente	Ppm	Porcentaje volumétrico (%V)
Metano (CH <sub>4</sub> )	342600	34.26%
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	94316	9.43%
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	61717	6.17%
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	23066	2.31%
Otros*	478301	47.83%
<b>Total</b>	<b>1000000</b>	<b>100%</b>

---

\* En éste grupo se encuentran los componentes que quedaron por fuera de la capacidad de análisis del cromatógrafo, cruzando la información del reporte con la de la literatura disponible se establece que corresponde a vapor de agua saturado y sulfuro de hidrógeno, el análisis se realizó a temperatura de 20 C y presión atmosférica por lo tanto la presencia de vapor de agua no es elevada; quedando entonces el sulfuro de hidrógeno como componente dominante, la muestra de biogás recogida presentaba un fuerte olor a huevo descompuesto lo cual es característico de este componente.

La cromatografía proporcionó resultados inusuales ya que el metano representa el 34.26% del biogás, lo cual no corresponde con las fuentes consultadas [9] [11] [12] donde dicho componente no se encuentra por debajo del 40%.

Inicialmente se pensó que la muestra había sido tomada prematuramente estando aún “biche”<sup>\*</sup> el biogás, sin embargo esto se descarta debido a que la presencia de oxígeno tan solo es del 2% estando cerca de los niveles usuales en el biogás (ver Tabla 8); además, las etapas iniciales de la puesta en marcha de biodigestores se caracterizan por la presencia dominante de dióxido de carbono [30], éste tampoco es el caso.

La mayoría de las fuentes consultadas corresponden a trabajos de investigación desarrollados en laboratorio, las condiciones de temperatura, pH, agitación mecánica, presencia de inhibidores y promotores, son monitoreadas y estabilizadas, esto da como resultado biogás de muy buena calidad con alto contenido de metano. En contraste, el biodigestor que se ha instalado se encuentra sujeto a las condiciones ambientales del sitio, la variación de temperatura entre el día y la noche puede alcanzar los 15 °C (la temperatura es el factor más influyente tal como se describe en la sección 3.1.2) y la monitorización y control de los demás factores descritos se encuentran fuera del alcance del presente trabajo.

Con base a la información de la Tabla 30, se estiman algunas propiedades del biogás necesarias para continuar con el proceso de diseño del sistema, los resultados son presentados en la Tabla 31:

La ley de Amagat de volúmenes aditivos: El volumen de una mezcla ( $V_B$ ) de gases es igual a la suma de los volúmenes que cada gas ( $V_i$ ) ocuparía si existiera sólo a la temperatura y presión de la mezcla [31].

---

\* El biogás “biche” es aquel inicialmente se encuentra muy diluido con aire dentro del biodigestor.

La masa de los componentes ( $m_i$ ) por metro cúbico de biogás se puede obtener mediante la ecuación de estado (ecuación 24) a volumen del componente ( $V_i$ ) temperatura del biogás ( $T_B = 293 K$ ) y presión del biogás ( $P_B = 88.542 [KPa]$ ).

$$m_i = \frac{P_B V_i}{Z_i R_i T_B} [\text{Kg}] \quad (24)$$

El factor de compresibilidad de cada componente ( $Z_i$ ) se obtiene de la Figura 49, para ello se requiere calcular previamente su temperatura reducida ( $T_{R,i}$ ) y presión reducida ( $P_{R,i}$ ) (ecuaciones 25 y 26).

$$T_{R,i} = \frac{T_B}{T_{cr,i}} \quad (25)$$

$$P_{R,i} = \frac{P_B}{P_{cr,i}} \quad (26)$$

Donde  $T_{cr,i}$  y  $P_{cr,i}$  son la temperatura y presión críticas del componente.

Sumando las masas de cada componente obtiene la masa de biogás (ecuación 27).

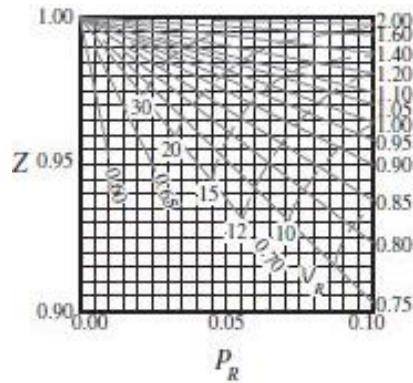
$$m_B = m_{CH_4} + m_{CO_2} + m_{CO} + m_{H_2} + m_{O_2} + m_{N_2} \quad (27)$$

La densidad del biogás queda entonces definida en la ecuación 28.

$$\rho_B = \frac{m_B}{1[m^3]} \quad (28)$$

Las fracciones másicas ( $f_m$ ) de los componentes, la masa molar ( $M_B$ ) del biogás y fracciones molares ( $y$ ) se obtienen con las ecuaciones 29, 30 y 31 respectivamente.

Figura 49. Gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert



Fuente: CENGEL, Yunes A. y BOLES, Michael A. Termodinámica, Séptima edición. México DF: Mc Graw Hill. 2012. p. 932.

$$f m_i = \frac{m_i}{m_B} \quad (29)$$

$$M_B = \frac{1}{\sum \frac{f m_i}{M_i}} \left[ \frac{Kg}{Kmol} \right] \quad (30)$$

$$y_i = f m_i \left( \frac{M_B}{M_i} \right) \quad (31)$$

La constante de gas ( $R_B$ ) y el factor de compresibilidad ( $Z_B$ ) del biogás se obtienen con las ecuaciones 32 y 33 respectivamente.

$$R_B = \frac{R_u}{M_B} \left[ \frac{KJ}{Kg \cdot K} \right] \quad (32)$$

$$Z_B = \sum y_i Z_i \quad (33)$$

Finalmente los poderes caloríficos del biogás se obtienen con la ecuación 34.

$$PCS_B = \sum PCS_i f m_i \quad (34)$$

Tabla 31. Propiedades de los componentes del biogás producido\*

	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Otros<sup>†</sup></b>	<b>BIOGAS<sup>‡</sup></b>
Fracción volumétrica	0.343	0.094	0.023	0.062	0.478	1.000
Constante de gas $R$ [ $\frac{KJ}{Kg \cdot K}$ ]	<b>0.518</b>	<b>0.189</b>	<b>0.260</b>	<b>0.297</b>	<b>0.244</b>	0.292
Masa molar $M$ [ $\frac{Kg}{Kmol}$ ]	<b>16.04</b>	<b>44.01</b>	<b>32.00</b>	<b>28.01</b>	<b>34.08</b>	28.44
Temperatura crítica $T_{cr}$ [K]	<b>191.1</b>	<b>304.2</b>	<b>154.8</b>	<b>126.2</b>	<b>374.0</b>	
Temperatura reducida $T_r$	1.53	0.96	1.89	2.32	0.78	
Presión crítica $P_{cr}$ [KPa]	<b>4640</b>	<b>7390</b>	<b>5080</b>	<b>3390</b>	<b>9000</b>	
Presión reducida $P_r$	0.019	0.012	0.017	0.026	0.010	
Factor de compresibilidad $Z$	<b>0.999</b>	<b>0.997</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>0.990</b>	0.995
[Kg] de componente por [m <sup>3</sup> ] de biogás	0.200	0.151	0.027	0.063	0.599	1.040
Fracción másica $fm$	0.192	0.146	0.026	0.060	0.576	1.000
Fracción molar $y$	0.341	0.094	0.023	0.061	0.481	1.000
PCI [ $\frac{KJ}{Kg}$ ]	<b>50050</b>					9628
PCS [ $\frac{KJ}{Kg}$ ]	<b>55530</b>					10682

\* Los datos en cursiva han sido suministrados por [31], a partir de ellos se han obtenido los demás valores resultado del proceso de cálculo con las Ecuaciones 24-34.

<sup>†</sup> Se usan las propiedades del sulfuro de hidrógeno teniendo en cuenta su presencia dominante.

<sup>‡</sup> Propiedades del biogás derivadas de los resultados de la cromatografía y calculadas en base a las condiciones del laboratorio (T=20 [°C] y P=88542 [Pa]).

## 6.5 SELECCIÓN DE LA TUBERÍA PARA TRANSPORTE DEL BIOGÁS

Los Anexos B15 y B16 corresponden al plano de la instalación para transportar el biogás desde el biodigestor hasta la vivienda.

**6.5.1 Material.** Siguiendo las recomendaciones del Biogas Utilization Handbook [17] se selecciona tubería de PVC como medio para transporte del biogás desde el biodigestor hasta el quemador domiciliario, la razón, son las ventajas que presenta este material desde el punto de vista económico y facilidad de instalación frente a otros materiales también utilizados en dicho propósito (ver Tabla 18).

Buscando proteger la tubería del daño por radiación ultravioleta y animales se instalará dentro de la tierra, recubriéndola con tubería de hierro galvanizado en los tramos sobre los cuales halla circulación pesada.

**6.5.2 Longitud.** Para determinar la caída de presión en la tubería conductora del biogás, se debe establecer su longitud total, la longitud total corresponde a la longitud real de la tubería más la longitud equivalente de los accesorios.

**6.5.2.1 Longitud real.** 39 m de tubería se requerirán para llevar el biogás desde el biodigestor hasta el quemador dentro de la vivienda.

**6.5.2.2 Longitud equivalente de accesorios.** En la Tabla 32 se describen los accesorios que harán parte integral de la instalación desde el biodigestor (inmediatamente después de la válvula de seguridad) hasta la vivienda, dado que aún no es posible definir el diámetro interno ( $D_i$ ) de la tubería, se calculan las longitudes equivalentes ( $L_e$ ) para 3 diámetros diferentes, posteriormente uno de ellos será seleccionado.

De esta manera la longitud total (L) queda definida en la ecuación 35.

$$L = L_r + L_e \left( \frac{0.0254 [m]}{1 [in]} \right) [m] \quad (35)$$

Tabla 32. Longitud equivalente de los accesorios de la tubería para 3 diámetros

Accesorio	Cantidad	Rel. L/D*	Le [in]		
			$D_i = 0.5 [in]$	$D_i = 0.75 [in]$	$D_i = 1 [in]$
Válvula bola 1"	1	10	5	7.5	10
Unión 1"	3	35	52.5	78.75	No requerido
Reducción 1" a Di	3	35	52.5	78.75	No requerido
Codo 45° (Di)	2	25	25	37.5	50
Tee 90° (Di)	1	25	12.5	18.75	25
Unión (Di)	4	35	70	105	140
Codo 90° (Di)	5	35	87.5	131.25	175
Válvula bola (Di)	1	10	5	7.5	10
			310	465	410

**6.5.3 Diámetro interno.** El diámetro interno se selecciona buscando que la caída de presión en la tubería no afecte significativamente el transporte del biogás (ver Ecuación 1). Para ello se someterán a prueba los diámetros de ½", ¾" y 1" evaluándolos en la ecuación 36.

\* Tomado de Anexo A4

$$\Delta P = \frac{Q_B^2 G_B L}{(3.04 \cdot 10^{-3})^2 C^2 D_i^5} \quad (36)$$

Donde:

- $\Delta P$ : Caída de presión [mbar]
- $Q_B$ : Caudal de biogás en  $\left[\frac{m^3}{h}\right]$

Para un consumo de potencia ( $Pot_{consumo}$ ) igual a 1 [KW] se requerirá el flujo másico de biogás dado por la ecuación 37:

$$\dot{m}_B = \frac{Pot_{consumo}}{PCS_B} \left( \frac{3600 [s]}{1 [h]} \right) = \frac{1 \left[ \frac{KJ}{s} \right]}{10682 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]} \left( \frac{3600 [s]}{1 [h]} \right) = 0.337 \left[ \frac{Kg}{h} \right] \quad (37)$$

En la Ecuación 28 se definió la densidad del biogás a presión atmosférica y 20 [°C] de temperatura, por lo tanto para estas condiciones el caudal de biogás requerido se expresa en la ecuación 38.

$$Q_B = \frac{\dot{m}_B}{\rho_B} = \frac{0.337 \left[ \frac{Kg}{h} \right]}{1.040 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]} = 0.324 \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (38)$$

- $G_B$ : Gravedad específica del biogás

La gravedad específica del biogás corresponde al cociente entre la densidad del biogás y la densidad del aire para las mismas condiciones de presión y temperatura.

Para estimar la densidad del aire ( $\rho_{aire}$ ) se usa la ecuación 39 correspondiente a la de estado de los gases ideales. La constante de aire ( $R_{aire}$ ) tiene un valor de  $0.2870 \left[ \frac{KJ}{Kg \cdot K} \right]$  [30].

$$\rho_{aire} = \frac{P_B}{R_{aire} T_B} = \frac{88.542 \left[ \frac{KJ}{m^3} \right]}{0.2870 \left[ \frac{KJ}{Kg \cdot K} \right] 293 [K]} = 1.053 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \quad (39)$$

La gravedad específica del biogás queda establecida con la ecuación 40.

$$G_B = \frac{\rho_B}{\rho_{aire}} = \frac{1.040 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]}{1.053 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]} = 0.988 \quad (40)$$

- $L$ : Longitud total del tramo [m], se expresó en la ecuación 35
- $C$ : Constante de Pole, para  $D_i = \frac{1}{2}$   $C = 1.65$  , para  $D_i = \frac{3}{4}$  ,  $C = 1.80$  (ver Tabla 16)
- $D_i$ : Diámetro interno de la tubería [mm]

En la Tabla 33 se presentan los resultados de la ecuación 36 al ser evaluada para los 3 diámetros internos preseleccionados. La menor caída de presión se dará usando tubería de 1", sin embargo los accesorios de  $\frac{3}{4}$ " son más económicos y la diferencia entre las caídas de presión no es significativa, por lo tanto se selecciona el diámetro de  $\frac{3}{4}$ " para la presente aplicación.

Tabla 33. Pérdidas de presión para 3 diámetros de tubería

	$D_i = \frac{1}{2}$ (12.7 mm)	$D_i = \frac{3}{4}$ (19.05 mm)	$D_i = 1$ " (25.4 mm)
$Q_B \left[ \frac{m^3}{h} \right]$	0.324	0.324	0.324
$G_B$	0.988	0.988	0.988
$L$ [m]	47	51	50
$C$	1.65	1.80	1.80
$\Delta P$ [mbar]	0.585	0.070	0.016
$\Delta P$ [cmH2O]	0.597	0.072	0.017

**6.5.4 Espesor.** La presión máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) que alcanza la tubería está limitada por la válvula de seguridad, dicha presión es de 15 centímetros de columna de agua (1472 pascales), la ecuación 3 establece un factor de seguridad mínimo de 1.5; la tubería de PVC disponible comercialmente indica una presión admisible ( $P_{adm}$ ) de hasta 2.17 [MPa].

El factor de seguridad ( $FS$ ) conseguido al emplear dicha tubería lo proporciona la ecuación 41.

$$FS = \frac{P_{adm}}{P_{m\acute{a}x}} = \frac{2170000}{1472} = 1474 \quad (41)$$

El espesor disponible excede con creces al requerido, por lo tanto la integridad de la tubería no será comprometida por las pequeñas presiones del biogás.

### **6.5.5 Acondicionadores del biogás**

**6.5.5.1 Trampa de agua.** La trampa de agua a implementar será de purga manual (Figura 50) sus elementos y construcción se indican en el Anexo B17.

**6.5.5.2 Filtro para sulfuro de Hidrógeno.** El sulfuro de Hidrógeno ( $H_2S$ ) presente en el biogás producirá corrosión en componentes metálicos de la estufa, además es contaminante y perjudicial para la salud, por ello es importante disminuir su contenido en el biogás final; para ello se instalará un filtro al final de la tubería (Figura 51), se elaborará usando sección de tubería de 1" buscando facilitar la disposición de los hilos metálicos, para la apertura y cierre sencillo de la válvula se

usará una unión universal, sus elementos y construcción se indican en el Anexo B18.

Figura 50. Trampa de agua

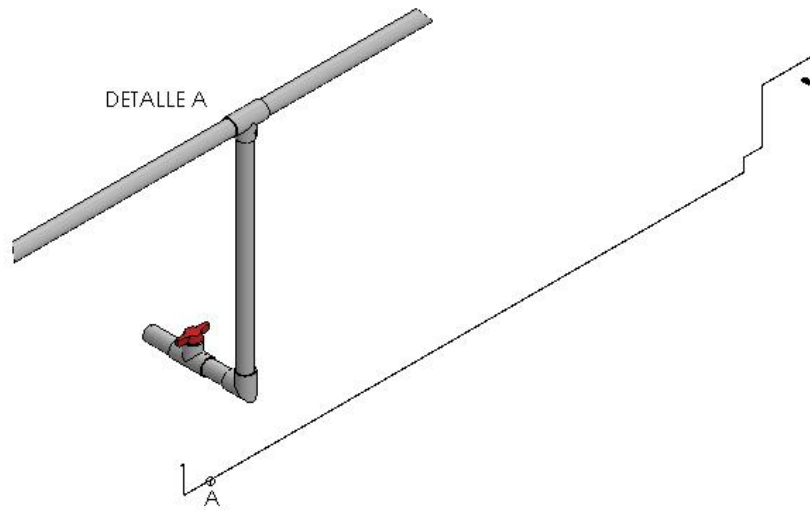


Figura 51. Filtro para sulfuro de hidrógeno



## 6.6 ADAPTACIÓN DEL QUEMADOR

Debido a que la producción y utilización del biogás está poco extendida en nuestro medio, aún no se comercializan estufas con quemadores diseñados para este combustible, por lo tanto es necesario adaptar un equipo utilizado para gas natural o propano.

En primera instancia, mediante la ecuación 42 se evaluará el índice de Wobbe ( $W_S$ ):

$$W_S = \frac{PCS_B \rho_B}{\sqrt{G_B}} = \frac{(10682 \frac{KJ}{Kg})(1.040 \frac{Kg}{m^3})}{\sqrt{0.988}} = 11177 \frac{KJ}{m^3} \quad (42)$$

Donde el poder calorífico superior ( $PCS$ ), la densidad ( $\rho_B$ ) y la gravedad específica ( $G_B$ ) del biogás fueron calculadas con las ecuaciones 28, 34 y 40 respectivamente.

Revisando la Tabla 19, se puede verificar que el biogás producido no pertenece a la segunda ni tercera familia de los gases, por lo tanto no hay intercambiabilidad con el gas natural, ni el GLP y los equipos deben sufrir alguna transformación para usarse con biogás.

Siguiendo la recomendación de la Tabla 22 y extrapolando para una composición de metano del 34.26% (ver Tabla 30), se debe ampliar el orificio del inyector de gas natural multiplicándolo por un factor ( $F_{iny}$ ) de 1.9.

Para un consumo de potencia igual a 1 KW (860 Kcal/h) el inyector para gas natural domiciliario debe tener un diámetro ( $D_{iny.gn}$ ) de 0.77 mm (ver Anexo A5), adaptándolo para usar con el biogás producido se debe llevar al diámetro ( $D_{iny.bio}$ ) calculado en la ecuación 43.

$$D_{iny.bio} = F_{iny} D_{iny.gn} = (1.9)(0.77[mm]) = 1.46 [mm] \quad (43)$$



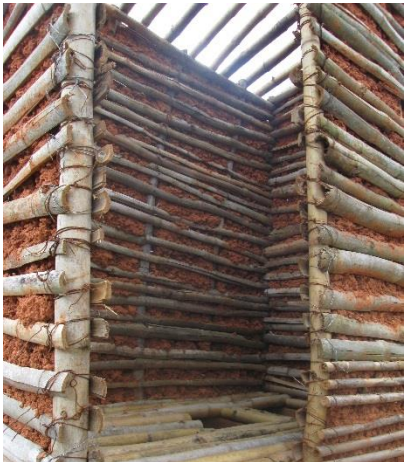
## 7. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

Las actividades llevadas a cabo, cantidades de material utilizado, y horas de trabajo para la construcción del sistema se detallan en la Tabla 34.




Tabla 34. Construcción del sistema

<b>SANITARIO SECO</b>		
<b>Actividad</b>	<b>Materiales</b>	<b>Horas mano de obra</b>
Excavación para los cimientos 	-	5
Cimentación 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 carretilladas de tierra</li> </ul>	3





Continuación Tabla 34

Actividad	Materiales	Horas mano de obra
<p>Construcción de las cámaras de heces y orina</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 170 ladrillos temosa</li> <li>• 2 bultos de cemento</li> <li>• 6 carretilladas de arena</li> </ul>	<p>16</p>
<p>Montaje de las columnas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guadua</li> </ul>	<p>4</p>
<p>Construcción de las paredes, piso y estructura del techo</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guadua</li> <li>• 3 Kg de alambre galvanizado</li> <li>• 20 carretilladas de tierra</li> </ul>	<p>24</p>




Continuación Tabla 34

Actividad	Materiales	Horas mano de obra
<p>Fabricación del techo verde</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teja reciclada</li> <li>• Guadua</li> <li>• Plástico reciclado</li> <li>• Piedras</li> <li>• Tierra</li> </ul>	<p>4</p>
<p>Frisado de la pared, el piso y las cámaras</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 carretilladas de tierra</li> <li>• Estiércol equino</li> <li>• ½ bulto de cemento</li> <li>• 1 carretillada de arena</li> <li>• Impermeabilizante</li> <li>• 5 metros tubo PVC 2"</li> <li>• 2 metros tubo PVC ½"</li> <li>• 1 tapón PVC ½"</li> <li>• 1 Tee PVC ½"</li> <li>• 1 codo PVC ½"</li> </ul>	<p>12</p>
<p>Instalación del inodoro seco, sistema deshidratador de heces y elementos de operación</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inodoro seco</li> <li>• 2 puertas</li> <li>• 2 tapas para las cámaras</li> <li>• 2 bujes</li> <li>• 2 empujadores de heces</li> <li>• Recipientes</li> </ul>	<p>4</p>




Continuación Tabla 34

<b>BIODIGESTOR</b>		
<b>Actividad</b>	<b>Materiales</b>	<b>Horas mano de obra</b>
Levantamiento de la capa vegetal 	-	4
Demarcación y excavación de la zanja 	-	16
Recubrimiento de la superficie de la zanja 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impermeabilizante</li> </ul>	4
Montaje de la geomembrana en la zanja 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geomembrana tubular</li> </ul>	1

Continuación Tabla 34

Actividad	Materiales	Horas mano de obra
<p>Instalación de los elementos del biodigestor</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 metro de tubo PVC 4"</li> <li>• 2 semicodos PVC 4"</li> <li>• 1 metro de tubo PVC 2"</li> <li>• 1 codo PVC 2"</li> <li>• 1 unión PVC 2"</li> <li>• 1 reducción PVC 2" a 1"</li> <li>• 3 metros de tubo PVC 1"</li> <li>• 1 Tee PVC 1"</li> <li>• 2 válvulas bola PVC 1"</li> <li>• Limpiador para PVC</li> <li>• Soldadura para PVC</li> </ul>	<p>6</p>
<p>Fabricación de los tanques de carga y descarga</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 48 ladrillos temosa</li> <li>• ½ bulto de cemento</li> <li>• 1 ½ carretilladas de arena</li> </ul>	<p>8</p>
<b>LÍNEA PARA TRANSPORTE DE BIOGÁS</b>		
Actividad	Materiales	Horas mano de obra
<p>Excavación para montaje de la tubería</p> 	<p>-</p>	<p>8</p>

Continuación Tabla 34

Actividad	Materiales	Horas mano de obra
<p>Montaje de la tubería</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 unión PVC de 1"</li> <li>• 1 reducción PVC 1" a 3/4"</li> <li>• 40 metros tubo PVC 3/4"</li> <li>• 6 uniones PVC de 3/4"</li> <li>• 6 codos PVC 3/4"</li> <li>• 2 semicodos PVC 3/4"</li> <li>• Limpiador para PVC</li> <li>• Soldadura para PVC</li> </ul>	<p>8</p>
<p>Construcción y montaje de la trampa de agua y filtro de H<sub>2</sub>S</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 uniones PVC de 1"</li> <li>• 2 reducciones PVC 1" a 3/4"</li> <li>• 1 Tee PVC 3/4"</li> <li>• 1 válvula de bola PVC 3/4"</li> <li>• Unión universal PVC 1"</li> <li>• Limpiador para PVC</li> <li>• Soldadura para PVC</li> </ul>	<p>4</p>
<b>QUEMADOR</b>		
Actividad	Materiales	Horas mano de obra
<p>Instalación de la estufa y calibración de inyectores</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 estufa de dos quemadores</li> <li>• 2 inyectores de gas natural</li> </ul>	<p>4</p>

## 8. PUESTA EN MARCHA Y RESULTADOS DEL SISTEMA

### 8.1 PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR, LINEA DE TRANSPORTE Y ESTUFA PARA CONSUMO DEL BIOGÁS.

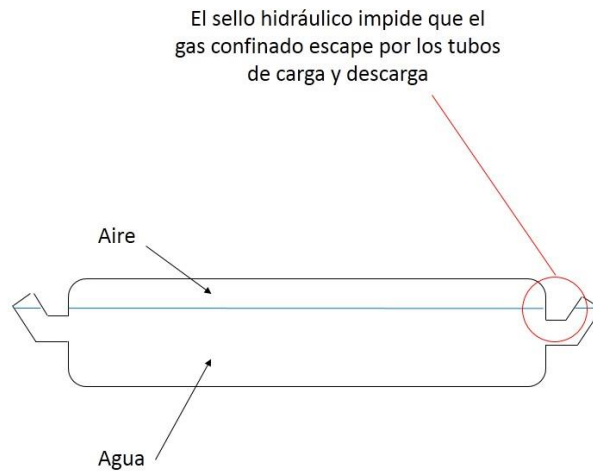
Una vez montado el biodigestor sobre la zanja e instalados sus elementos (ver Tabla 34) se preparó la geomembrana para recibir la primer carga de material, dicha preparación consistió en bloquear los puertos de alimentación y descarga previo ingreso de aire mediante compresor hasta conseguir su inflado (Figura 52), posteriormente se llenó con agua permitiendo el escape del aire por la válvula de seguridad hasta alcanzar el sello hidráulico (Figura 43).

La geomembrana se infló con aire para desplegarla y poder ocupar posteriormente todo su volumen, tras alcanzar el sello hidráulico se dejó salir por la tubería el aire atrapado, dejando libre el espacio para el almacenamiento del biogás, luego de realizar este procedimiento se pudo dar inicio a la alimentación del biodigestor.

Figura 52. Inflado de la geomembrana



Figura 53. Llenado de la geomembrana con agua



**8.1.1 Alimentación del biodigestor.** El biodigestor fue dimensionado con la capacidad de procesar 20 Kg diarios de estiércol fresco diluido en igual cantidad de agua, esto se realiza en el tanque de carga anteponiendo una malla al tubo de alimentación para evitar el paso de material vegetal grande que puedan tener las heces.

Por su disponibilidad actual se está usando heces de ganado bovino para alimentar el biodigestor, a futuro se empleará heces fecales porcinas; el sistema ofrece dicha versatilidad ya que los dos materiales requieren iguales condiciones de alimentación y tiempo de retención, la diferencia radica en la mayor productividad esperada al emplear las heces de los cerdos (ver Tabla 15).

**8.1.2 Producción de biogás.** Transcurridos 50 días desde el inicio de la producción de biogás, se tomó una muestra en bolsa tedlar (Figura 54) y se llevó al laboratorio donde fue realizado el análisis de composición por cromatografía de gases. La sección 6.4 estuvo dedicada a la estimación de las propiedades del biogás basándose en el reporte entregado por el laboratorio.

Figura 54. Toma de muestra de biogás para ser analizada



Tras la instalación de los equipos para transporte y acondicionamiento del biogás (trampa de agua y filtro de  $H_2S$ ), se adaptaron los inyectores de la estufa aumentando el diámetro del orificio según se calculó con la ecuación 43. Debido a que no existe herramienta para perforar en el inyector un agujero de diámetro 1.46 mm, se usó un tramo de alambre galvanizado calibre 17 (1.4 mm de diámetro normalizado) para ampliar el agujero del inyector, los inyectores son fabricados en bronce por lo tanto la remoción del material resultó sencilla.

La lumbrera del quemador se ajustó hasta conseguir llama azul (Figura 55), sin desprendimiento ni retroceso (características de buena combustión); finalmente quedó completamente cerrada - no se requirió aire primario para la combustión.

Figura 55. Llama conseguida tras el ajuste del inyector y la lumbrera



Durante 30 días se realizó seguimiento a la producción y consumo de biogás, para cuantificar la masa dentro de la geomembrana se usó la ecuación 44.

$$m_B = \frac{P_B V_B}{Z_B R_B T_B} \quad (44)$$

Donde:

$m_B$ : Masa de biogás [Kg]

$P_B$ : Presión absoluta en el biodigestor [Pa]

$V_B = 0.667 [m^3]$ : Volumen reservado en la geomembrana para almacenar el biogás.

$Z_B = 0.995$ : Factor de compresibilidad del biogás (Tabla 31).

$R_B = 292 \left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right]$ : Constante de gas del biogás (Tabla 31)

$T_B$ : Temperatura del biogás [K]

La medida de presión del biogás fue obtenida en la válvula de seguridad, se sumergió 15 cm un tramo de manguera transparente y rotulada longitudinalmente cada centímetro de 0 a 15, en la medida que aumenta la presión del sistema el nivel de líquido dentro de la manguera desciende y se puede leer la longitud de la columna en el rótulo (Figura 56). Para convertir los centímetros de columna de agua ( $cmH_2O$ ) a Pascales ( $Pa$ ) se usó la ecuación 45.

$$[Pa] = 98.1 * [cmH_2O] \quad (45)$$

La temperatura se midió con un termómetro de punzón introducido en la parte superior de la geomembrana anexo al puerto de extracción del biogás, el termómetro proporciona la temperatura en grados Celsius, la conversión a grados Kelvin se realizó con la ecuación 46.

$$[K] = [^{\circ}C] + 273 \quad (46)$$

En la Tabla 35 se presenta los resultados durante los 30 días de seguimiento.

Figura 56. Válvula de seguridad



Tabla 35. Cantidad de biogás en el tiempo

Día	Estado*	Presión manométrica dentro del biodigestor		Temperatura del biogás en el biodigestor [°C]	Masa de biogás en el biodigestor [Kg]	Consumo de biogás [Kg/día] <sup>†</sup>
		[cm H <sub>2</sub> O]	[Pa]			
1	1	<b>12.0</b>	1177	<b>34.0</b>	0.603	0.0135
	2	<b>0.1</b>	7	<b>36.5</b>	0.589	
2	1	<b>12.5</b>	1226	<b>32.5</b>	0.606	0.0130
	2	<b>0.1</b>	7	<b>34.5</b>	0.593	
3	1	<b>10.5</b>	1030	<b>30.0</b>	0.610	0.0156
	2	<b>0.1</b>	7	<b>34.0</b>	0.594	
4	1	<b>11.5</b>	1128	<b>31.0</b>	0.608	0.0143
	2	<b>0.1</b>	7	<b>34.0</b>	0.594	
5	1	<b>8.5</b>	834	<b>28.0</b>	0.612	0.0113
	2	<b>0.1</b>	7	<b>30.5</b>	0.601	
6	1	<b>7.0</b>	687	<b>25.0</b>	0.617	0.0143
	2	<b>0.1</b>	7	<b>29.5</b>	0.603	
7	1	<b>9.5</b>	932	<b>26.0</b>	0.617	0.0171
	2	<b>0.1</b>	7	<b>31.0</b>	0.600	
8	1	<b>8.5</b>	834	<b>27.5</b>	0.613	0.0162
	2	<b>0.1</b>	7	<b>32.5</b>	0.597	
9	1	<b>9.5</b>	932	<b>29.0</b>	0.611	0.0159
	2	<b>0.1</b>	7	<b>33.5</b>	0.595	
10	1	<b>13.0</b>	1275	<b>31.5</b>	0.608	0.0164
	2	<b>0.1</b>	7	<b>35.0</b>	0.592	
11	1	<b>12.0</b>	1177	<b>31.0</b>	0.609	0.0128
	2	<b>0.1</b>	7	<b>33.0</b>	0.596	
12	1	<b>12.5</b>	1226	<b>30.0</b>	0.611	0.0161
	2	<b>0.1</b>	7	<b>33.5</b>	0.595	
13	1	<b>13.0</b>	1275	<b>32.0</b>	0.607	0.0154
	2	<b>0.1</b>	7	<b>35.0</b>	0.592	
14	1	<b>10.0</b>	981	<b>30.5</b>	0.608	0.0132
	2	<b>0.1</b>	7	<b>33.5</b>	0.595	
15	1	<b>12.5</b>	1226	<b>31.0</b>	0.609	0.0170
	2	<b>0.1</b>	7	<b>35.0</b>	0.592	

\* Estado 1 previo consumo del biogás, estado 2 posterior al consumo del biogás.

† El consumo de biogás corresponde a la diferencia entre las masas de biogás en el biodigestor en el estado 1 y el estado 2, dicho consumo se realizó al medio día favorecido por el incremento de temperatura dentro de la geomembrana en esta hora del día.

Continuación Tabla 35

Día	Estado *	Presión manométrica dentro del biodigestor		Temperatura del biogás en el biodigestor [°C]	Masa de biogás en el biodigestor [Kg]	Consumo de biogás [Kg/día]†
		[cm H2O]	[Pa]			
16	1	12.0	1177	31.0	0.609	0.0118
	2	0.1	7	32.5	0.597	
17	1	11.0	1079	30.0	0.610	0.0179
	2	0.1	7	35.0	0.592	
18	1	11.0	1079	32.0	0.606	0.0110
	2	0.1	7	33.5	0.595	
19	1	10.5	1030	31.0	0.607	0.0174
	2	0.1	7	36.0	0.590	
20	1	12.5	1226	33.5	0.604	0.0120
	2	0.1	7	35.0	0.592	
21	1	9.0	883	30.0	0.608	0.0145
	2	0.1	7	34.0	0.594	
22	1	7.5	736	28.0	0.611	0.0155
	2	0.1	7	33.0	0.596	
23	1	8.5	834	28.0	0.612	0.0133
	2	0.1	7	31.5	0.599	
24	1	8.0	785	26.0	0.616	0.0140
	2	0.1	7	30.0	0.602	
25	1	10.0	981	25.0	0.619	0.0176
	2	0.1	7	30.0	0.602	
26	1	12.0	1177	26.5	0.618	0.0180
	2	0.1	7	31.0	0.600	
27	1	13.0	1275	29.5	0.612	0.0146
	2	0.1	7	32.0	0.598	
28	1	10.0	981	27.0	0.615	0.0115
	2	0.1	7	29.0	0.604	
29	1	8.5	834	26.0	0.616	0.0144
	2	0.1	7	30.0	0.602	
30	1	12.5	1226	28.0	0.615	0.0172
	2	0.1	7	32.0	0.598	
<b>Promedio:</b>						<b>0.0148</b>

\* Estado 1 previo consumo del biogás, estado 2 posterior al consumo del biogás.

† El consumo de biogás corresponde a la diferencia entre las masas de biogás en el biodigestor en el estado 1 y el estado 2, dicho consumo se realizó al medio día favorecido por el incremento de temperatura dentro de la geomembrana en esta hora del día.

El biogás producido entre días se estimó haciendo la diferencia entre el estado 1 del día inicial y el estado 2 del día final (Tabla 36)

Tabla 36. Producción de biogás entre días

<b>Franja</b>	<b>Días</b>	<b>Biogás producido [Kg/día]</b>
1	Día 1 - Día 2	0.0169
2	Día 2 - Día 3	0.0166
3	Día 3 - Día 4	0.0143
4	Día 4 - Día 5	0.0181
5	Día 5 - Día 6	0.0163
6	Día 6 - Día 7	0.0142
7	Día 7 - Día 8	0.0133
8	Día 8 - Día 9	0.0139
9	Día 9 - Día 10	0.0135
10	Día 10 - Día 11	0.0166
11	Día 11 - Día 12	0.0151
12	Día 12 - Día 13	0.0125
13	Día 13 - Día 14	0.0161
14	Día 14 - Día 15	0.0141
15	Día 15 - Día 16	0.0166
16	Día 16 - Día 17	0.0130
17	Día 17 - Día 18	0.0139
18	Día 18 - Día 19	0.0126
19	Día 19 - Día 20	0.0139
20	Día 20 - Día 21	0.0164
21	Día 21 - Día 22	0.0174
22	Día 22 - Día 23	0.0162
23	Día 23 - Día 24	0.0170
24	Día 24 - Día 25	0.0176
25	Día 25 - Día 26	0.0160
26	Día 26 - Día 27	0.0126
27	Día 27 - Día 28	0.0174
28	Día 28 - Día 29	0.0124
29	Día 29 - Día 30	0.0133
Promedio:		0.0151

En las Figuras 57 y 58 se representa el consumo y producción de biogás según la información de las Tablas 35 y 36.

Figura 57. Consumo diario de biogás

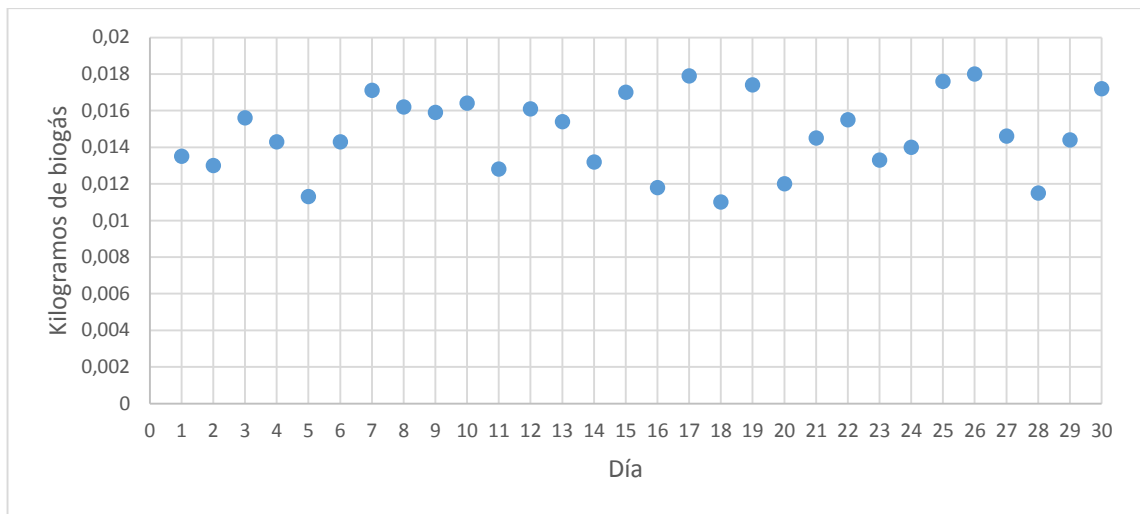
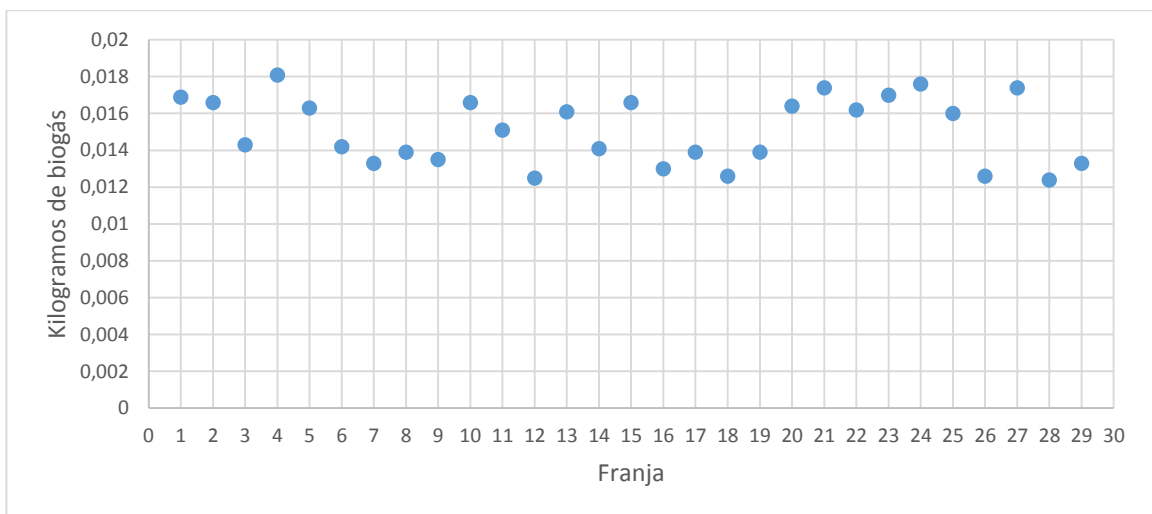


Figura 58. Producción de biogás



**8.1.3 Disponibilidad energética.** Para evaluar la disponibilidad energética, el primer día de seguimiento se calentó 1 litro de agua desde temperatura ambiente 24 °C hasta agotar el biogás disponible (Tabla 37), la temperatura que alcanzó el agua fue de 58 °C. Para ello se usó un recipiente con tapa y base plana del tamaño de la rejilla de la estufa buscando minimizar el escape de calor hacia el ambiente.

Tabla 37. Consumo de biogás durante el ensayo

Día	Estado*	Presión manométrica dentro del biodigestor		Temperatura del biogás en el biodigestor [°C]	Masa de biogás en el biodigestor [Kg]	Consumo de biogás [Kg/día]†
		[cm H2O]	[Pa]			
1	1	12.0	1177	34.0	0.603	0.0135
	2	0.1	7	36.5	0.589	

La energía requerida para llevar 1 [Kg] de agua desde 24 °C hasta 58 °C se expresa en la ecuación 47.

$$E = m_{\text{agua}} C_p (T_f - T_i) \quad (47)$$

$$E = (1[\text{Kg}]) \left( 4.18 \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{Kg.K}} \right] \right) (331[\text{K}] - 297[\text{K}]) = 142.1[\text{KJ}]$$

Donde:

$E$ : Energía requerida [KJ]

\* Estado 1 previo consumo del biogás, estado 2 posterior al consumo del biogás.

† El consumo de biogás corresponde a la diferencia entre las masas de biogás en el biodigestor en el estado 1 y el estado 2, dicho consumo se realizó al medio día favorecido por el incremento de temperatura dentro de la geomembrana en esta hora del día.

$m_{agua}$ : Masa de agua calentada [Kg]

$C_p$ : Calor específico del agua a presión constante  $\left[ \frac{KJ}{Kg.K} \right]$

$T_i$ : Temperatura inicial del agua [K]

$T_f$ : Temperatura final del agua [K]

La energía finalmente aprovechable por kilogramo de biogás ( $E_{aprov}$ ) entregada a los alimentos se expresa en la ecuación 48.

$$E_{aprov} = \frac{E}{C_{biogás}} = \frac{142.1[KJ]}{0.0135 [Kg]} = 10526 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] \quad (48)$$

Donde  $C_{biogás}$  representa el consumo de biogás durante el experimento (Tabla 37).

De esta manera la disponibilidad energética promedio diaria queda expresada en la ecuación 49.

$$E_{prom} = E_{aprov} C_{biogás.prom} = \left( 10526 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] \right) \left( 0.0148 \left[ \frac{Kg}{día} \right] \right) = 156 \left[ \frac{KJ}{día} \right] \quad (49)$$

Donde  $C_{biogás.prom}$  representa el consumo promedio de biogás durante el mes de seguimiento (Tabla 35).

**8.1.4 Producción de fertilizante.** Cumplidos los 50 días de retención de la mezcla líquida dentro del biodigestor, se extrae una muestra de 400 ml del fertilizante producido (Figura 59) solicitando su análisis con miras a conocer la proporción de nitrógeno, fósforo y potasio. El informe de resultados se presenta en el Anexo C2.

En la Tabla 38 se resumen los resultados y se estima la disponibilidad de componentes teniendo en cuenta una producción de fertilizante de aproximadamente 40 litros al día.

Figura 59. Fertilizante procesado por el biodigestor



Tabla 38. Composición NPK del fertilizante líquido

<b>Componente</b>	<b>[mg] por [litro] de fertilizante*</b>	<b>Producción diaria [g]</b>	<b>Producción anual [g]</b>
Nitrógeno (N)	439.53	17.58	6416
Fósforo (P)	203.76	8.15	2975
Potasio (K)	749.26	29.97	10939

\* Tomado de los resultados del análisis (Anexo C2)

## 8.2 PUESTA EN MARCHA DEL SANITARIO SECO

Tras la puesta en funcionamiento del sanitario seco, se lleva a cabo una producción diaria promedio de 0.4 Kg de heces y 1.9 litros de orina (ver Figuras 36 y 37).

Basándose en trabajos previamente realizados sobre el tema (ver Anexo D) en las Tablas 39 y 40 se estima la disponibilidad diaria de los macronutrientes nitrógeno, fósforo y potasio.

Tabla 39. NPK en heces humanas

<b>Componente</b>	<b>[g] por [Kg] de heces*</b>	<b>Producción anual [g]</b>
Nitrógeno (N)	18	2574
Fósforo (P)	3	429
Potasio (K)	44	6292

Tabla 40. NPK en orina humana

<b>Componente</b>	<b>[g] por [litro] de orina†</b>	<b>Producción anual [g]</b>
Nitrógeno (N)	14	6412
Fósforo (P)	1	458
Potasio (K)	5	2290

---

\* Tomado del Anexo D1

† Basado en el Anexo D2

### 8.3 RESUMEN DE RESULTADOS

En la Tabla 41 se presenta las generalidades del biogás que se produce, en la Tabla 42 se hace lo propio para el fertilizante teniendo en cuenta la información de las Tablas 38, 39 y 40.

Tabla 41. Generalidades del biogás producido

Producción diaria promedio:	0.0151 Kg
Energía promedio diaria aprovechable:	156 [KJ]

Tabla 42. Generalidades del fertilizante producido

Producción anual de nitrógeno:	15402 [g]
Producción anual de fósforo:	3862 [g]
Producción anual de potasio:	19521 [g]

### 8.4 ANALISIS DE RESULTADOS

#### 8.4.1 Biogás

**8.4.1.1 Disponibilidad y aprovechamiento.** La disponibilidad y aprovechamiento del biogás está condicionada a la temperatura del ambiente.

Cuando la temperatura es baja también lo es la presión, impidiendo el flujo desde el biodigestor, por ello solo se ha podido hacer uso del biogás en las horas más calurosas, particularmente se ha venido utilizando durante las horas cercanas al medio día.

Esta misma condición ha hecho que durante las primeras horas de sol (entre 7:30 y 9:00 am aproximadamente) la temperatura dentro de la geomembrana se incremente rápidamente y consecuentemente también la presión, al no haber consumo en esas horas el biogás supera los 15 cm de columna de agua y escapa parte de él hacia el ambiente por la válvula de seguridad, la geomembrana pierde carga y durante el día no vuelve a alcanzar la presión límite de seguridad.

El biogás perdido no ha sido cuantificado en la Tabla 37 correspondiente a la producción entre días.

**8.4.1.2 Combustión.** Durante el mes de seguimiento a la producción de biogás, se estimó una disponibilidad energética diaria promedio de 156 [KJ], en 6 meses representaría aproximadamente 28000 [KJ]; en este mismo lapso se venía consumiendo 1 cilindro de 40 libras de GLP que libera aproximadamente 800000 [KJ]\*.

El biogás suplirá el 3.5% de la necesidad actual de GLP.

---

\* 1 cilindro de 40 libras de GLP contiene 9.4809 galones y peso específico de 4.22 libras por galón [32], con la capacidad aproximada de liberar 800000 [KJ]

## 8.4.2 Fertilizante

**8.4.2.1 Concentración de nutrientes.** La orina entrega los nutrientes de forma muy asimilable por las plantas [7], representa la fuente con la concentración más alta de nitrógeno, obteniéndose de ella el 42% del total entregado por el sistema.

Las heces humanas y el fertilizante líquido del biodigestor producido con heces bovinas, presentan por su parte las mayores concentraciones de fósforo y potasio, siendo mejor asimilable el material extraído del biodigestor dado su proceso de fermentación y estado líquido [10].

**8.4.2.2 Disponibilidad.** Actualmente en el predio se emplean aproximadamente 110 Kg de urea\*, 11 Kg de fósforo y 22 Kg de potasio; al comparar tal necesidad con la producción esperada (Tabla 43) el sistema lograría suplir:

- 35% de nitrógeno.
- 35% de fósforo
- 89% de potasio

---

\* Urea comercial con 40% en peso de nitrógeno

## 9. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, se calculará la relación beneficio/costo del proyecto a 5 años.

El beneficio del proyecto corresponde a aquellas acciones que se venían realizando y ahora no tendrá que asumir el capitalista (Tabla 43). El costo del proyecto corresponde al monto por materiales (Tabla 44), mano de obra (Tabla 45) y análisis en laboratorio (Tabla 46), representando la inversión inicial (Tabla 47); adicional a ello los insumos para mantenimiento (Tabla 48) y productos que el sistema no logra cubrir (Tabla 49) anualmente (Tabla 50).

Tabla 43. Costo anual sin proyecto

Operación y mantenimiento anual	Und	Unidades	Costo unitario	Costo total
Agua para saneamiento	m <sup>3</sup>	24	\$ 2,000*	\$ 48,000
Succión, limpieza y desinfección de pozo séptico	Servicio	1	\$ 150,000	\$ 150,000
Limpieza del sanitario (detergente)	Kilogramo	3	\$ 6,000	\$ 18,000
Consumo de GLP para cocción	Cilindro 40 lb.	2	\$ 48,000	\$ 96,000
Compra de urea para fertilización (40% N) <sup>†</sup>	Kilogramo	110	\$ 600	\$ 66,000
Compra de fosfato para fertilización	Kilogramo	11	\$ 28,000	\$ 308,000
Compra de potasio para fertilización	Kilogramo	22	\$ 19,000	\$ 418,000
<b>Total</b>				<b>\$ 1,104,000</b>

\* Costo aproximado del metro cúbico de agua teniendo en cuenta perforación y mantenimiento de pozo subterráneo, mantenimiento y operación del sistema de bombeo y almacenamiento del líquido en la superficie.

<sup>†</sup> Urea comercial con 40% en peso de nitrógeno

Tabla 44. Costos materiales

Material	Und	Unidades	Costo unitario	Costo total
Inodoro seco	Unidad	1	\$ 142,800	\$ 142,800
Ladrillo temosa	Unidad	150	\$ 400	\$ 60,000
Cemento	Bulto	2.5	\$ 20,000	\$ 50,000
Arena	Carretillada	5	\$ 4,000	\$ 20,000
Impermeabilizante	Bulto	0.5	\$ 35,000	\$ 17,500
Alambre galvanizado cal. 12	Kilogramo	3	\$ 4,000	\$ 12,000
Tubo PVC 2"	Metro	5	\$ 6,500	\$ 32,500
Tubo PVC 1/2"	Metro	2	\$ 1,500	\$ 3,000
Tapón PVC 1/2"	Unidad	1	\$ 2,100	\$ 2,100
Tee PVC 1/2"	Unidad	1	\$ 350	\$ 350
Codo PVC 1/2"	Unidad	2	\$ 550	\$ 1,100
<b>Materiales sanitario seco</b>				<b>\$ 341,350</b>
Geomembrana tubular	Unidad	1	\$ 434,000	\$ 434,000
Ladrillo temosa	Unidad	36	\$ 400	\$ 14,400
Cemento	Bulto	0.5	\$ 20,000	\$ 10,000
Arena	Carretillada	1.5	\$ 4,000	\$ 6,000
Impermeabilizante	Bulto	0.5	\$ 35,000	\$ 17,500
Tubo PVC 4"	Metro	1	\$ 8,000	\$ 8,000
Semicodo PVC 4"	Unidad	2	\$ 5,200	\$ 10,400
Tubo PVC 2"	Metro	1	\$ 6,500	\$ 6,500
Codo PVC 2"	Unidad	1	\$ 6,200	\$ 6,200
Unión PVC 2"	Unidad	1	\$ 2,500	\$ 2,500
Reducción PVC 2" a 1"	Unidad	1	\$ 6,000	\$ 6,000
Tubo PVC 1"	Metro	3	\$ 4,000	\$ 12,000
Tee PVC 1"	Unidad	1	\$ 1,500	\$ 1,500
Válvula de bola PVC 1"	Unidad	2	\$ 6,700	\$ 13,400
Termómetro punzón	Unidad	1	\$ 11,000	\$ 11,000
<b>Materiales biodigestor</b>				<b>\$ 559,400</b>
Unión PVC 1"	Unidad	3	\$ 500	\$ 1,500
Reducción PVC 1" a 3/4"	Unidad	3	\$ 1,200	\$ 3,600
Tubo PVC 3/4"	Metro	40	\$ 1,500	\$ 60,000
Codo PVC 3/4"	Unidad	6	\$ 550	\$ 3,300
Tee PVC 3/4"	Unidad	1	\$ 350	\$ 350
Válvula de bola PVC 3/4"	Unidad	1	\$ 3,200	\$ 3,200
Unión PVC 3/4"	Unidad	6	\$ 150	\$ 900
Semicodo PVC 3/4"	Unidad	2	\$ 450	\$ 900
Unión universal PVC 1"	Unidad	1	\$ 3,000	\$ 3,000
Limpiador para PVC	Galón	0.0625	\$ 104,000	\$ 6,500
Soldadura para PVC	Galón	0.0625	\$ 216,000	\$ 13,500
<b>Materiales línea de transporte del biogás</b>				<b>\$ 96,750</b>
Estufa de dos puestos	Unidad	1	\$ 35,000	\$ 35,000
Manguera y accesorios	Unidad	1	\$ 8,000	\$ 8,000
Inyector gas natural	Unidad	1	\$ 3,000	\$ 3,000
<b>Materiales quemador de biogás</b>				<b>\$ 46,000</b>
				<b>\$ 1,043,500</b>

Tabla 45. Costo mano de obra

Mano de obra	Und	Unidades	Costo unitario	Costo total
Sanitario seco	Hora	72	\$ 4,000	\$ 288,000
Biodigestor	Hora	39	\$ 4,000	\$ 156,000
Línea de transporte de biogás	Hora	20	\$ 4,000	\$ 80,000
Adaptación de quemador	Hora	4	\$ 4,000	\$ 16,000
				<b>\$ 540,000</b>

Tabla 46. Costos análisis en laboratorio

Análisis en laboratorio	Und	Unidades	Costo unitario	Costo total
Composición NPK fertilizante	Muestra	1	\$ 86,000	\$ 86,000
Cromatografía del biogás	Muestra	1	\$ 96,000	\$ 96,000
				<b>\$ 182,000</b>

Tabla 47. Inversión inicial del proyecto

Inversión inicial	Costo
Materiales	\$ 1,043,500
Mano de obra	\$ 540,000
Análisis en laboratorio	\$ 182,000
Diseño e ingeniería del proyecto	\$ 300,000
	<b>\$ 2,065,500</b>

Tabla 48. Costo anual de insumos para mantenimiento

Insumo	Und	Unidades	Costo unitario	Costo total
Filtro de H2S (bombril)	Unidad	4	\$ 500	\$ 2,000
Vinagre para limpieza del inodoro seco	Litro	12	\$ 1,200	\$ 14,400
				<b>\$ 16,400</b>

Tabla 49. Costo anual de productos no cubiertos por el sistema

Producto	Und	Unidades	Costo unitario	Costo total
GLP	KJ	1544000	\$ 0.057	\$ 88,008
Nitrógeno	Kilogramo	28.598	\$ 1,500	\$ 42,897
Fosfato para fertilización	Kilogramo	7.138	\$ 28,000	\$ 199,864
Potasio para fertilización	Kilogramo	2.479	\$ 19,000	\$ 47,101
				<b>\$ 377,870</b>

Tabla 50. Costo anual con proyecto

Inversión anual	Costo
Insumos para mantenimiento	\$ 16,400
Productos no cubiertos por el sistema	\$ 377,870
	<b>\$ 394,270</b>

El beneficio del proyecto llevado a valor presente, evaluado a 5 años y con una tasa de interés efectiva anual del 10.8%\* se calcula en la ecuación 50.

$$B = \sum_{n=0}^N \frac{b_n}{(1+i)^n} = \sum_{n=0}^5 \frac{b_n}{(1+0.108)^n} = \$ 4100000 \quad (50)$$

Donde:

$B$ : Beneficio del proyecto (COP)

$N$ : Número de periodos considerados

$i$ : Interés efectivo

---

\* Para el mes de diciembre de 2014 la tasa de interés efectiva anual fue del 10.8%. Fuente: Banco de la República.

El costo del proyecto representa la inversión inicial más los montos anuales a 5 años se calcula en la ecuación 51.

$$C = CI + CA = CI + \sum_{n=0}^N \frac{ca_n}{(1+i)^n} = \$ 2065500 + \sum_{n=0}^5 \frac{ca_n}{(1+0.108)^n} = \$ 3530000 \quad (51)$$

Donde:

$C$ : Costo del proyecto (COP)

$CI$ : Inversión inicial (COP)

$CA$ : Costos anuales acumulados (COP)

La relación beneficio costo a 5 años queda definida con la ecuación 52.

$$\frac{B}{C} = \frac{4100000}{3530000} = 1.16 \quad (52)$$

La relación es mayor a 1, con lo cual se verifica que desde el plano económico el proyecto es satisfactorio.

## **10. IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DEL PROYECTO**

Previamente se evaluó la rentabilidad del proyecto obteniendo resultados favorables, sin embargo, la rentabilidad en sí misma no es garantía de sostenibilidad en el tiempo, particularmente el impacto ambiental y social suelen ser aspectos determinantes en la viabilidad de este tipo de proyectos orientados a la comunidad.

### **10.1 IMPACTO AMBIENTAL**

Teniendo en cuenta la condición del lugar, el cuidado del agua representa quizá el mayor logro del sistema; se dejarán de gastar anualmente 24 [m<sup>3</sup>] de agua quedando disponibles para otros usos más razonables, a su vez se evitará la producción de volumen semejante de aguas negras que se depositaban en una fosa séptica a escasos metros del pozo de agua subterránea representando un potencial riesgo de contaminación (ver Figura 5).

### **10.2 IMPACTO SOCIAL**

El principal desafío al que se enfrenta el proyecto representa la aceptación social de un medio alternativo de saneamiento, el sanitario seco brinda una metodología completamente novedosa en la recolección y manejo de las excretas. Los numerosos aspectos favorables que ofrece esta tecnología como seguridad y sostenibilidad ambiental y económica, pueden sobreponerse a los estigmas que inicialmente puedan existir.

Buscando llevar al usuario la información necesaria para la operación y mantenimiento eficiente del sistema, cuidando su seguridad y la del entorno, se ha elaborado una cartilla de orientación la cual es presentada en el Anexo E.

## 11. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un sanitario seco con la capacidad de atender los requerimientos de saneamiento en la vivienda, incluye sistema recolector de agua lluvia, almacenamiento de orina, deshidratación y almacenamiento de heces.

Se consiguió eliminar la dependencia al uso de pozo séptico en la vivienda, además se ahorrarán 24 m<sup>3</sup> de agua al año.

Se logró establecer que el sanitario seco implementado representará una rentable alternativa de saneamiento ya que entregará anualmente 450 litros de fertilizante líquido rico en nitrógeno y 280 Kg de acondicionador sólido de suelos rico en fósforo y potasio; su operación tan solo requiere cal agrícola que pasará posteriormente al suelo como sustrato regulador de pH.

Se diseñó e implementó un biodigestor tipo Taiwán o de membrana tubular con la capacidad de procesar 20 Kg diarios de heces frescas de animales domésticos, suplirá el 3.5% de los requerimientos de GLP para cocción y suministrará 20 litros diarios de fertilizante líquido de fácil absorción; al biogás producido se le realizó análisis por cromatografía de gases y al fertilizante análisis de composición NPK.

Se diseñó e implementó una línea para transporte del biogás desde el biodigestor hasta la vivienda, incluye trampa de agua y filtro de sulfuro de hidrógeno para limpiar el combustible antes del consumo.

Se adaptaron dos quemadores de gas natural para usarse con el biogás, se consiguió alcanzar características apropiadas de combustión usando como referencia el color y la estabilidad de la llama.

Se elaboró un manual de operación y mantenimiento para acercar el sistema al usuario e instruirlo en su operación segura y eficiente.

Se espera que a 5 años haya ocurrido el retorno de la inversión realizada.

Gracias a la fundamentación brindada en los últimos años por parte de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, se ha cumplido de manera favorable con los objetivos trazados para el presente trabajo.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Colaboradores de Wikipedia. *Saneamiento ambiental* [en línea]. Wikipedia. La enciclopedia libre, 2014 [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <[http://es.wikipedia.org/wiki/Saneamiento\\_ambiental](http://es.wikipedia.org/wiki/Saneamiento_ambiental)>.
2. Organización Mundial de la Salud. *Cobertura de agua y saneamiento de la Salud. Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud* [en línea]. Noviembre de 2004 [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/facts2004/es/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/facts2004/es/)>.
3. SREY, Steven, *et al.* SANEAMIENTO ECOLÓGICO. Estocolmo: Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo / Fundación Friedrich Ebert, 1999. 93 p.
4. UNICEF. *Cobertura de agua y saneamiento* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <[http://www.unicef.org/spanish/wash/index\\_statistics.html](http://www.unicef.org/spanish/wash/index_statistics.html)>.
5. COLOMBIA. PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN Y UNICEF. III El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. Capítulo 1: El estado del agua, el alcantarillado y los residuos sólidos en los municipios. 2006. 55 p.
6. MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). Transferencia de Tecnología y Divulgación sobre Técnicas para el Desarrollo Humano y Forestal Sustentable. Sanitario Seco. 2007. 26 p.
7. RICHERT, Anna, *et al.* Guía Práctica de Uso de la Orina en Producción Agrícola. Estocolmo: Stockholm Environment Institute. 2011. 56 p.
8. SANTANDER. CDMB. Sistema Séptico – SS & Sanitario Ecológico Seco – SES. 2011. 30 p.

9. GUEVARA, Antonio. FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES. Producción de gas y Saneamiento de Efluentes. Lima: OPS/CEPIS. 1996. 77 p.
10. INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA INDUSTRIAL (ICAITI). MANUAL DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN PLANTA DE BIOGÁS. 1983. (Proyecto de Leña y Fuentes Alternas de Energía). 71 p.
11. AL SEADI, Teodorita, *et al.* biogas HANDBOOK. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg. 2008. 125 p.
12. OLAYA ARBOLEDA, Yeison y GONZÁLEZ SALCEDO, Luis Octavio. FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES. Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 2009. 31 p.
13. CAMPERO RIVERO, Oliver. MONITORIZACIÓN Y EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA TECNOLOGÍA DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIA COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE EN DOS ÁMBITOS FAMILIAR E INDUSTRIAL EN BOLIVIA. Huelva: Universidad Internacional de Andalucía. 2011. 182 p.
14. Colaboradores de Wikipedia. *Biodigestor* [en línea]. Wikipedia. La enciclopedia libre, 2014 [fecha de consulta: octubre 6 de 2014]. Disponible en: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Biodigestor>>.
15. NARVÁEZ, Paulo César. Solución de Redes de Flujo para Gases Usando el Modelo de Balance de Nodos y el Método de Linealización de Ecuaciones. Diciembre de 1999. (Revista Ingeniería e Investigación, (44)). 7 p.
16. SÁNCHEZ JARAMILLO, Claudia Yaneth; PALACIO GALLEGO, Orlando y ÁLVAREZ Álvarez, Mauricio. Diseño de la red de gas natural para el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid con énfasis en la acometida hacia la Planta de Etanol, área de servicios. Medellín: Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. 2006. 14 p.

17. WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. 133 p.
18. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tubos y accesorios termoplásticos para conducción de gases a presión. Bogotá: ICONTEC, 1999. (NTC 1746)
19. FLOREZ ORREGO, Daniel A. Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de Gas Natural y Gas Natural Syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar: Una artículo de revisión. Medellín: Universidad de Antioquia.
20. CORTÉS TÓRRES, Jaime Hernán y HERNANDEZ VELEZ, Jaime Alberto. VALIDACIÓN DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN EL CONTEXTO COLOMBIANO. Medellín: Universidad de Antioquia. 2003. 111 p.
21. IAA y UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. MANUAL DE INSTALACIÓN DE UN BIODIGESTOR FAMILIAR TIPO MANGA PARA ZONAS ALTO-ANDINAS. 2007. 39 p.
22. HIDALGO BONILLA, José Alfredo; MARAVILLA CARRANZA, Víctor Arturo y RAMÍREZ CASTRO, William Omar. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS EN EL SALVADOR. Universidad “José Simeón Cañas”. 2010. 113 p.
23. NORMAS APLICABLES AL SERVICIO PÚBLICO DOMICILIARIO DE GAS COMBUSTIBLE CON BIOGÁS. Comisión de Regulación de Energía y Gas. Noviembre 16 de 2012. Documento CREG-079.
24. Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG. *Resolución No. 135 de 2012* [en línea]. Bogotá: Octubre 30 de 2013 [fecha de consulta: Octubre 14 de 2014]. Disponible en: <<http://www.creg.gov.co/index.php/regulacion/resoluciones>>.
25. Google Maps. *Vivero “la fuente”* [en línea]. 2014 [fecha de consulta: octubre 13 de 2014]. Disponible en: <<https://www.google.com/maps/@6.8151299,-73.0777132,227m/data=!3m1!1e3>>.

26. Eg-ingeniería. Biodigestores con desplazamiento horizontal [en línea]. [fecha de consulta: octubre 16 de 2014]. Disponible en: <<http://www.eg-ingenieria.com.ar/biodigestores-desplazamiento-horizontal.html>>.
27. Home Remedies for you. Com. *Micción Frecuente* [en línea]. 2014 [fecha de consulta: Octubre 14 de 2014]. Disponible en: <<http://www.home-remedies-for-you.com/es/remedy/Frequent-Urination.html>>.
28. STEMM EQUIPOS INDUSTRIALES, S.L. *TABLA DE DENSIDADES* [en línea]. [fecha de consulta: Octubre 15 de 2014]. Disponible en: <[http://www.stemm.com/espanol/pdf/tabla\\_densidades.pdf](http://www.stemm.com/espanol/pdf/tabla_densidades.pdf)>.
29. MARTÍ HERRERO, Jaime. BIODIGESTORES FAMILIARES GUÍA DE DISEÑO Y MANUAL DE INSTALACIÓN. La Paz: Cooperación Técnica Alemana y Programa de Desarrollo Agropecuario. 2008. 81 p.
30. COBOS BECERRA, Yazmin Lucero y SIERRA ORDOÑEZ, Raúl. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE VINAZAS EN UN BIODIGESTOR ANAEROBIO. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2007. 37 p.
31. CENGEL, Yunes A. y BOLES, Michael A. Termodinámica, Séptima edición. México DF: Mc Graw Hill. 2012. 1009 p.
32. Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG. *Resolución No. 010 de 2001* [en línea]. Bogotá: febrero 20 de 2001 [fecha de consulta: Enero 8 de 2015]. Disponible en: <<http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2001-CREG010-2001>>.

## BIBLIOGRAFÍA

AL SEADI, Teodorita, *et al.* biogas HANDBOOK. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg. 2008. 125 p.

BM Editores. *Biodigestores* [en línea]. Junio 14 de 2014 [fecha de consulta: octubre 6 de 2014]. Disponible en: <<http://bmeditores.com/biodigestores/>>.

CAMPERO RIVERO, Oliver. MONITORIZACIÓN Y EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA TECNOLOGÍA DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIA COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE EN DOS ÁMBITOS FAMILIAR E INDUSTRIAL EN BOLIVIA. Huelva: Universidad Internacional de Andalucía. 2011. 182 p.

CENGEL, Yunes A. y BOLES, Michael A. Termodinámica, Séptima edición. México DF: Mc Graw Hill. 2012. 1009 p.

COBOS BECERRA, Yazmin Lucero y SIERRA ORDOÑEZ, Raúl. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE VINAZAS EN UN BIODIGESTOR ANAEROBIO. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2007. 37 p.

Colaboradores de Wikipedia. *Saneamiento ambiental* [en línea]. Wikipedia. La enciclopedia libre, 2014 [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <[http://es.wikipedia.org/wiki/Saneamiento\\_ambiental](http://es.wikipedia.org/wiki/Saneamiento_ambiental)>.

Colaboradores de Wikipedia. *Biodigestor* [en línea]. Wikipedia. La enciclopedia libre, 2014 [fecha de consulta: octubre 6 de 2014]. Disponible en: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Biodigestor>>.

COLOMBIA. PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN Y UNICEF. III El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. Capítulo 1: El estado del agua, el alcantarillado y los residuos sólidos en los municipios. 2006. 55 p.

Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG. *Resolución No. 010 de 2001* [en línea]. Bogotá: febrero 20 de 2001 [fecha de consulta: Enero 8 de 2015]. Disponible en: < <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2001-CREG010-2001>>.

Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG. *Resolución No. 135 de 2012* [en línea]. Bogotá: Octubre 30 de 2013 [fecha de consulta: Octubre 14 de 2014]. Disponible en: <<http://www.creg.gov.co/index.php/regulacion/resoluciones>>.

CORTÉS TÓRRES, Jaime Hernán y HERNANDEZ VELEZ, Jaime Alberto. VALIDACIÓN DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN EL CONTEXTO COLOMBIANO. Medellín: Universidad de Antioquia. 2003. 111 p.

Eg-ingeniería. Biodigestores con desplazamiento horizontal [en línea]. [fecha de consulta: octubre 16 de 2014]. Disponible en: <<http://www.eg-ingenieria.com.ar/biodigestores-desplazamiento-horizontal.html>>.

ENCUESTA NACIONAL DE CALIDAD DE VIDA 2013 (ECV) [en línea]. DANE, marzo de 2014 [fecha de consulta: octubre 2 de 2014]. Disponible en: <<http://www.dane.gov.co/index.php/es/estadisticas-sociales/calidad-de-vidaecv/87-sociales/calidad-de-vida/5399-encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-2013>>.

FLOREZ ORREGO, Daniel A. Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de Gas Natural y Gas Natural Syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar: Una artículo de revisión. Medellín: Universidad de Antioquia.

Gas Natural Fenosa. *Gasodomésticos* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 7 de 2014]. Disponible en: <<http://www.gasnaturalfenosa.com.co/co/hogar/1297102458548/gasodomesticos.html>>.

Google Maps. *Vivero "la fuente"* [en línea]. 2014 [fecha de consulta: octubre 13 de 2014]. Disponible en: <<https://www.google.com/maps/@6.8151299,-73.0777132,227m/data=!3m1!1e3>>.

GUEVARA, Antonio. FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES. Producción de gas y Saneamiento de Efluentes. Lima: OPS/CEPIS. 1996. 77 p.

HIDALGO BONILLA, José Alfredo; MARAVILLA CARRANZA, Víctor Arturo y RAMÍREZ CASTRO, William Omar. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS EN EL SALVADOR. Universidad "José Simeón Cañas". 2010. 113 p.

Home Remedies for you. Com. *Micción Frecuente* [en línea]. 2014 [fecha de consulta: Octubre 14 de 2014]. Disponible en: <<http://www.home-remedies-for-you.com/es/remedy/Frequent-Urination.html>>.

IAA y UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. MANUAL DE INSTALACIÓN DE UN BIODIGESTOR FAMILIAR TIPO MANGA PARA ZONAS ALTO-ANDINAS. 2007. 39 p.

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA INDUSTRIAL (ICAITI). MANUAL DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN PLANTA DE BIOGÁS. 1983. (Proyecto de Leña y Fuentes Alternas de Energía). 71 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. GASES DE ENSAYO, PRESIONES DE ENSAYO Y CATEGORÍAS DE LOS ARTEFACTOS A GAS. Bogotá: ICONTEC, 2004. (NTC 3527).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tubos y accesorios termoplásticos para conducción de gases a presión. Bogotá: ICONTEC, 1999. (NTC 1746).

MARTÍ HERRERO, Jaime. BIODIGESTORES FAMILIARES GUÍA DE DISEÑO Y MANUAL DE INSTALACIÓN. La Paz: Cooperación Técnica Alemana y Programa de Desarrollo Agropecuario. 2008. 81 p.

MENDOZA FLORES, Alexi Antonio. *BIODIGESTOR DE FLUJO CONTINUO* [en línea]. 2004 [fecha de consulta: octubre 13 de 2014]. Disponible en: <<http://dc384.4shared.com/doc/kdXKKeTd/preview.html>>.

MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). Transferencia de Tecnología y Divulgación sobre Técnicas para el Desarrollo Humano y Forestal Sustentable. Sanitario Seco. 2007. 26 p.

Miliarium.com. *Contaminación de las aguas* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <<http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Nitratos/ContaminacionAgua.asp>>

NARVÁEZ, Paulo César. Solución de Redes de Flujo para Gases Usando el Modelo de Balance de Nodos y el Método de Linealización de Ecuaciones. Diciembre de 1999. (Revista Ingeniería e Investigación, (44)). 7 p.

NORMAS APLICABLES AL SERVICIO PÚBLICO DOMICILIARIO DE GAS COMBUSTIBLE CON BIOGÁS. Comisión de Regulación de Energía y Gas. Noviembre 16 de 2012. Documento CREG-079.

OBSERVATORIO DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESPAÑA (OSE). *El acceso al agua* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 2 de 2014]. Disponible en: <[http://193.146.56.6/Observatorio+Sostenibilidad/esp/plataformas/agua/escolar/acceso\\_agua/](http://193.146.56.6/Observatorio+Sostenibilidad/esp/plataformas/agua/escolar/acceso_agua/)>.

OLAYA ARBOLEDA, Yeison y GONZÁLEZ SALCEDO, Luis Octavio. FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES. Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 2009. 31 p.

Organización Mundial de la Salud. A Guide to the Development of on-site Sanitation. 1992.

Organización Mundial de la Salud. *Cobertura de agua y saneamiento de la Salud. Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud* [en línea]. Noviembre de 2004 [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/facts2004/es/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/facts2004/es/)>.

Organización Mundial de la Salud. *Trabajando juntos para derrotar al cólera* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <[http://www.who.int/features/2012/sierra\\_leone\\_cholera/photo\\_story/es/index1.html](http://www.who.int/features/2012/sierra_leone_cholera/photo_story/es/index1.html)>.

RICHERT, Anna, *et al.* Guía Práctica de Uso de la Orina en Producción Agrícola. Estocolmo: Stockholm Environment Institute. 2011. 56 p.

SÁNCHEZ JARAMILLO, Claudia Yaneth; PALACIO GALLEGO, Orlando y ÁLVAREZ Álvarez, Mauricio. Diseño de la red de gas natural para el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid con énfasis en la acometida hacia la Planta de Etanol, área de servicios. Medellín: Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. 2006. 14 p.

SANTANDER. CDMB. Sistema Séptico – SS & Sanitario Ecológico Seco – SES. 2011. 30 p.

SREY, Steven, *et al.* SANEAMIENTO ECOLÓGICO. Estocolmo: Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo / Fundación Friedrich Ebert, 1999. 93 p.

STEMM EQUIPOS INDUSTRIALES, S.L. *TABLA DE DENSIDADES* [en línea]. [fecha de consulta: Octubre 15 de 2014]. Disponible en: <[http://www.stemm.com/espanol/pdf/tabla\\_densidades.pdf](http://www.stemm.com/espanol/pdf/tabla_densidades.pdf)>.

UNICEF. *Cobertura de agua y saneamiento* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 1 de 2014]. Disponible en: <[http://www.unicef.org/spanish/wash/index\\_statistics.html](http://www.unicef.org/spanish/wash/index_statistics.html)>.

UNIÓN EUROPEA. Fondo Europeo de Desarrollo Regional. INFORME COMPLEMENTARIO SOBRE EL ESTUDIO DE SOLUCIONES VIABLES PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS EN EXTREMADURA. 2010.

WALSH, James, *et al.* Biogas Utilization Handbook. Muscle Shoals: U. S. Department of Energy. 1988. 133 p.

*What is NPK?* [en línea]. [fecha de consulta: octubre 2 de 2014]. Disponible en: <<http://crawleyhorticulturalsociety.org.uk/npk.php>>.

# ANEXOS

## ANEXOS A. COMPLEMENTO MARCO TEÓRICO

### Anexo A1. Digestión anaeróbica (AD)

#### 3.2 The biochemical process of AD

As previously stated, AD is a microbiological process of decomposition of organic matter in absence of oxygen. The main products of this process are biogas and digestate. Biogas is a combustible gas, consisting primarily of methane and carbon dioxide. Digestate is the decomposed substrate, resulted from the production of biogas.

During AD, very little heat is generated in contrast to aerobic decomposition (in presence of oxygen), like it is the case of composting. The energy, which is chemically bounded in the substrate, remains mainly in the produced biogas, in form of methane.

The process of biogas formation is a result of linked process steps, in which the initial material is continuously broken down into smaller units. Specific groups of micro-organisms are involved in each individual step. These organisms successively decompose the products of the previous steps. The simplified diagram of the AD process, shown in Figure 3.5, highlights the four main process steps: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis.

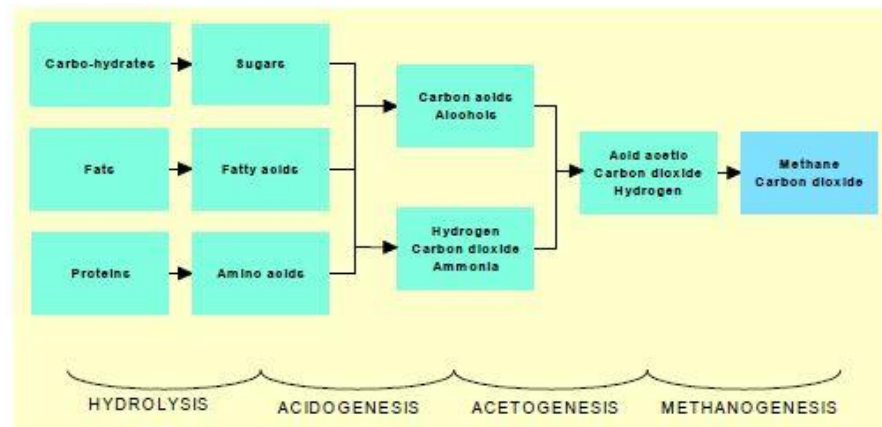
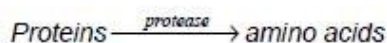
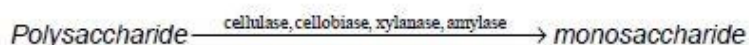
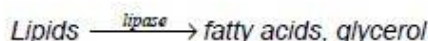


Figure 3.5 The main process steps of AD (AL SEADI 2001)

The process steps quoted in Figure 3.5 run parallel in time and space, in the digester tank. The speed of the total decomposition process is determined by the slowest reaction of the chain. In the case of biogas plants, processing vegetable substrates containing cellulose, hemi-cellulose and lignin, hydrolysis is the speed determining process. During hydrolysis, relatively small amounts of biogas are produced. Biogas production reaches its peak during methanogenesis.

### 3.2.1 Hydrolysis

Hydrolysis is theoretically the first step of AD, during which the complex organic matter (polymers) is decomposed into smaller units (mono- and oligomers). During hydrolysis, polymers like carbohydrates, lipids, nucleic acids and proteins are converted into glucose, glycerol, purines and pyridines. Hydrolytic microorganisms excrete hydrolytic enzymes, converting biopolymers into simpler and soluble compounds as it is shown below:



A variety of microorganisms is involved in hydrolysis, which is carried out by exoenzymes, produced by those microorganisms which decompose the undissolved particulate material. The products resulted from hydrolysis are further decomposed by the microorganisms involved and used for their own metabolic processes.

### 3.2.2 Acidogenesis

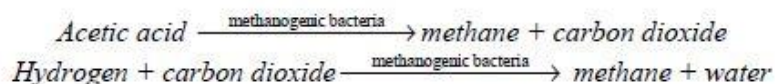
During acidogenesis, the products of hydrolysis are converted by acidogenic (fermentative) bacteria into methanogenic substrates. Simple sugars, amino acids and fatty acids are degraded into acetate, carbon dioxide and hydrogen (70%) as well as into volatile fatty acids (VFA) and alcohols (30%).

### 3.2.3 Acetogenesis

Products from acidogenesis, which can not be directly converted to methane by methanogenic bacteria, are converted into methanogenic substrates during acetogenesis. VFA and alcohols are oxidised into methanogenic substrates like acetate, hydrogen and carbon dioxide. VFA, with carbon chains longer than two units and alcohols, with carbon chains longer than one unit, are oxidized into acetate and hydrogen. The production of hydrogen increases the hydrogen partial pressure. This can be regarded as a „waste product“ of acetogenesis and inhibits the metabolism of the acetogenic bacteria. During methanogenesis, hydrogen is converted into methane. Acetogenesis and methanogenesis usually run parallel, as symbiosis of two groups of organisms.

### 3.2.4 Methanogenesis

The production of methane and carbon dioxide from intermediate products is carried out by methanogenic bacteria. 70% of the formed methane originates from acetate, while the remaining 30% is produced from conversion of hydrogen (H) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), according to the following equations:



Methanogenesis is a critical step in the entire anaerobic digestion process, as it is the slowest biochemical reaction of the process. Methanogenesis is severely influenced by operation conditions. Composition of feedstock, feeding rate, temperature, and pH are examples of factors influencing the methanogenesis process. Digester overloading, temperature changes or large entry of oxygen can result in termination of methane production.

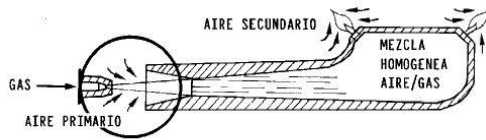
Fuente: AL SEADI, Teodorita, *et al.* biogas HANDBOOK. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg. 2008. p 21-23

## Anexo A2. Quemadores de mezcla previa

Los quemadores de mezcla previa son aquellos en que parte o la totalidad del aire necesario para la combustión completa, se mezcla con el gas a la entrada del quemador o inmediatamente antes de iniciarse la combustión.

Los sistemas de mezcla previa pueden ser:

- **Máquinas de mezcla o grupo de mezcla:** Es un recipiente donde existe una presión inferior a la atmosférica y posee dos orificios calibrados por donde se alimenta el gas y el aire, estando ambos regulados.
- **Cámara de mezcla:** Alimentada con aire y gas a presión por dos canalizaciones provistas de válvulas de regulación progresivas y de mando simultáneo
- **Mezclador de inducción:** Es el dispositivo por el cual la energía de un fluido aspira al otro, (generalmente un inyector y un Venturi) es el dispositivo mas frecuentemente empleado, se distinguen los siguientes casos.
  - **Mezcladores de inducción atmosférica:** El gas a la presión de la red o comprimido es el fluido inductor que aspira el aire ambiente.
  - **Mezcladores de aire inductor y gas despresurizado:** El aire comprimido aspira el gas, que es parcialmente despresurizado o reducido a presión atmosférica.
  - **Mezcladores el aire y el gas están ambos a presión.**



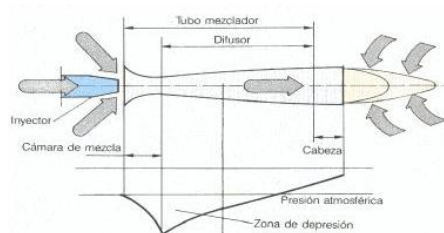
Mezclador de inducción atmosférica

### Comparación de ambos tipos de mezcladores de inducción

Mezclador de inducción atmosférica	Mezclador de aire inductor y gas despresurizado
Sencillez de construcción	Construcción más complicada (regulador de gas)
Utiliza sólo la presión del gas	Exige un compresor de aire
Precio de compra bajo	Precio de compra gravado por el del regulador de gas y el compresor de aire.
Presión de mezcla baja	Presión de mezcla elevada
Modulación 1 a 3 como máximo	Modulación pudiendo sobrepasar 1 a 5
Sensibilidad a las contrapresiones de las cámaras de combustión	Insensibilidad a las contrapresiones de las cámaras de combustión
Tamaño excesivo para los quemadores de gran caudal	Tamaño que no puede ser muy reducido para los quemadores de pequeño caudal
No necesita energía auxiliar	Consume energía auxiliar
Factor de aire casi siempre inferior a la unidad	Factor de aire primario elevado, pudiendo sobrepasar fácilmente la unidad
Regulación válvula de gas, no regula aire	Regulación válvula de aire y paso de gas

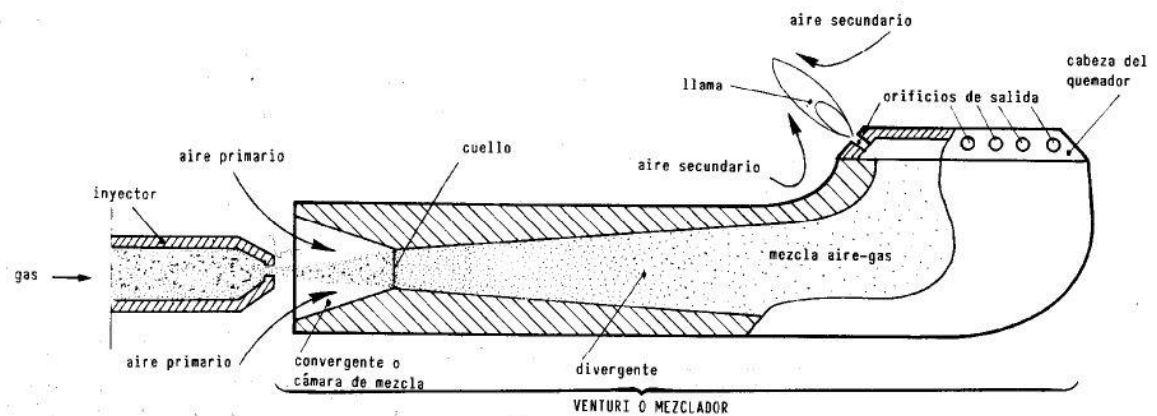
### Quemador de mezcla previa por inducción atmosférica

- Llamados popularmente quemadores atmosféricos, al entrar el aire al quemador por la presión atmosférica.
- El principio de funcionamiento es la inducción y el efecto Venturi
- Las principales características de este tipo de quemadores son:
  - No suele superar potencias de 250.000 kcal/h.
  - Es el quemador más simple y barato.
  - No puede trabajar con cámaras de combustión sobrepresionadas.
  - Tiene mucha sensibilidad el arrastre de aire con las variaciones de presión en el recinto donde se sitúe el quemador.



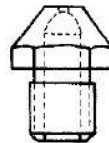
Las partes del quemador de mezcla previa por inducción atmosférica son:

- Inyector
- Cámara de mezcla (Efecto Venturi)
- Cabeza del quemador



## INYECTOR

Es el accesorio más delicado del quemador. Es importante conocer la influencia primordial que tiene sobre todo en lo que se refiere a suministrar el caudal preciso de gas.



## INYECTOR CALIBRADO

El caudal que atraviesa el inyector viene dado por:

- La sección o área libre de paso (S).
- La velocidad con que lo atraviesa el gas (V).
- La densidad relativa y, por tanto, el peso específico del gas ( $\rho$ )
- La temperatura de éste ( $T_1$ ).
- Diferencia de presión en el inyector ( $\Delta P$ ).

$$V = C_1 \times [(2 \times g \times \Delta P) / \rho]^{1/2}$$

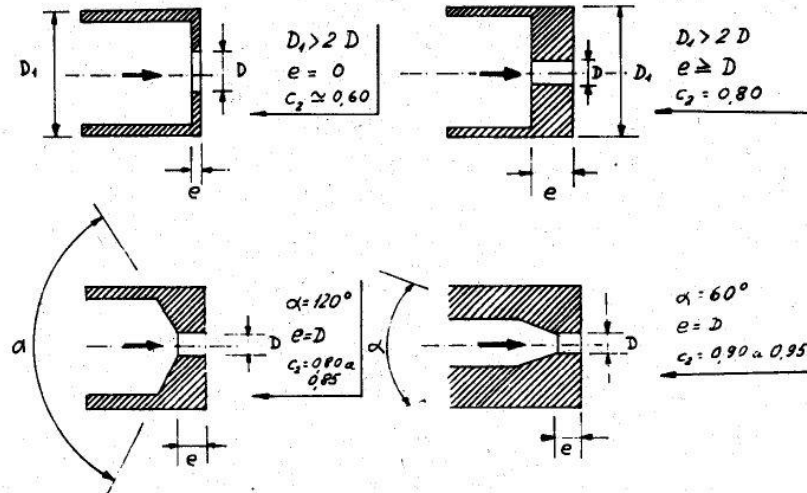
$$\text{Caudal} = C_2 \times S \times V$$

$C_1$ : Es el coeficiente de frotamiento, con valor de 0,7 a 0,9 sin dimensiones.

$C_2$ : Coeficiente de contracción cuyo valor oscila entre 0,5 y 0,95

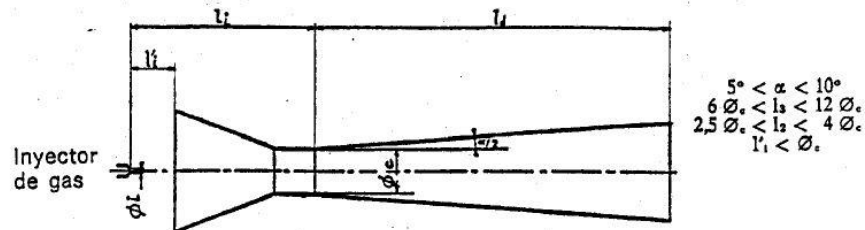
**Corrección por temperatura:** Si se trabaja a una temperatura diferente a  $T_0 = 273^\circ \text{K}$  ( $0^\circ \text{C}$ ) el caudal se debe corregir multiplicando por un factor, que se determina.

$$(T_0/T_1)^{1/2}$$



### CAMARA DE MEZCLA

La cámara de mezcla es el elemento encargado de realizar la mezcla del aire primario y el gas, el aire primario entra en la cámara por la misma tobera que el gas o a través de unos orificios practicados en la pared del tubo, los cuales se llaman lumbreras.



La regulación de aire primario en el quemador puede hacerse:

- Por obturación de la sección de entrada del aire.
- Por desplazamiento de la boquilla inyectora respecto al Venturi.
- Por estrangulamiento del cuello del venturi.

Fuente: DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA.  
 QUEMADORES PARA GASES. Valladolid: Universidad de Valladolid. p. 6-15

## Anexo A3. Temperatura media anual vivero “La Fuente”

### 1.2 TEMPERATURA

Para conocer la distribución espacial de la temperatura se emplea comúnmente la relación generalizada entre la temperatura media mensual y la elevación sobre el nivel del mar; este estudio para el área comprendida por el flanco occidental de la cordillera oriental y el Valle del Magdalena medio santandereano se realizó en el “ESTUDIO DE LA TEMPERATURA EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER” elaborado por el Ing Jaime Duarte del Area Operativa N° 8 del IDEAM y en el cual se establecieron las siguientes ecuaciones de regresión lineal, utilizando los datos de 24 años y 28 estaciones climatológicas localizadas en el departamento de Santander.

Documento de Diagnostico - Componente Físico - Biótico 7

#### ESQUEMA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL MUNICIPIO DE LOS SANTOS - SANTANDER



##### 1.2.1 TEMPERATURA MEDIA ANUAL:

ENERO	$Y = - 0.0062X + 29.4604$	- 0.974
FEBRERO	$Y = - 0.0062X + 29.6376$	- 0.975
MARZO	$Y = - 0.0061X + 29.6378$	- 0.974
ABRIL	$Y = - 0.0059X + 29.3214$	- 0.978
MAYO	$Y = - 0.0059X + 29.1435$	- 0.983
JUNIO	$Y = - 0.0060X + 29.2447$	- 0.985
JULIO	$Y = - 0.0062X + 29.3194$	- 0.984
AGOSTO	$Y = - 0.0061X + 29.3367$	- 0.985
SEPTIEMBRE	$Y = - 0.0059X + 29.9938$	- 0.983
OCTUBRE	$Y = - 0.0059X + 28.5934$	- 0.984
NOVIEMBRE	$Y = - 0.0059X + 28.6792$	- 0.981
DICIEMBRE	$Y = - 0.0060X + 29.0388$	- 0.977
ANUAL	$Y = - 0.0060X + 29.1890$	- 0.981

En donde Y es la temperatura y la variable independiente X es la elevación sobre el nivel del mar. Las regresiones lineales entre las dos variables presentan un alto coeficiente de correlación y la desviación media, debida entre otras causas a los efectos microclimáticos en el sitio de emplazamiento de las estaciones meteorológicas, está alrededor de tres décimas de grado centígrados; por lo cual las ecuaciones son muy confiables cuando se desea estimar la temperatura media anual o mensual con base en la elevación. La información sobre la temperatura en las estaciones meteorológicas empleadas en este estudio se encuentra en la tabla No. 3.

El gradiente de la temperatura media anual en la franja zonal del valle, piedemonte y flanco occidental de la cordillera oriental santandereana en donde se encuentra el municipio de LOS SANTOS es de 0.60 grados centígrados por cada 100 metros, este valor se obtuvo de la ecuación de regresión correspondiente.

También se observa que la oscilación anual de las temperaturas medias mensuales, es decir, la diferencia entre los meses con la temperatura media más alta y más baja se sitúa alrededor de 1.0 grado centígrado, característica típica de la zona ecuatorial.

Fuente: SANTANDER. MUNICIPIO DE LOS SANTOS. ESQUEMA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL. p. 7-8

El vivero “La Fuente” está a una altura de 1640 msnm (ver Tabla 23), se estima la temperatura media anual a partir de la ecuación 53 presentada en el esquema de ordenamiento territorial:

$$\bar{T} = -0.0060h + 29.1890 = -0.0060(1640) + 29.1890 = 19.349 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (53)$$

Dónde:  $h$  es la altura en metros del sitio sobre el nivel del mar y  $\bar{T}$  su temperatura media anual.

## Anexo A4. Relación longitud/diámetro para elementos de tubería

Skidmore, Owings + Merrill, LLP

Varkie C. Thomas, Ph.D., P.E.

IBM-AES Piping Software Ref-Data

### Dynamic Pressure Losses through Fittings

EL = L/D\* D (EL = Equivalent Length. L=Pipe Length, D = Pipe Diameter)

Velocity Pressure Factor (K) for Water :  $K = C*D**E$ : Pressure Drop (PD) = K\*VP

FITTING IDENTIFICATION			L/D Factors							K Factors	
ColRo	Description	Name	Water	Glycol	Brine	Diesel	Petrol	Steam	Gas	Coeff C	Expon E
A8	90 deg Elbow: Regular Screwed	EL90-RG-SC	45	53	61	45	36	30	35	1.5	-0.6092
A9	90 deg Elbow: Long Radius Screwed	EL90-LR-SC	25	29	34	25	20	15	20	0.75	-0.8787
A10	90 deg Elbow: Regular Flanged	EL90-RG-FL	45	53	61	45	36	30	35	0.45	-0.253
A11	90 deg Elbow: Long Radius Flanged	EL90-LR-FL	25	29	34	25	20	15	20	0.4	-0.463
A12	45 deg Elbow: Regular Screwed	EL45-RG-SC	25	29	34	25	20	20	25	0.35	-0.1365
A13	45 deg Elbow: Regular Flanged	EL45-RG-FL	15	18	20	15	12	15	20	0.22	-0.1414
A14	Return U-Bend: Regular Screwed	BEND-RG-SC	90	105	123	90	72	70	75	1.35	-0.5
A15	Return U-Bend: Regular Flanged	BEND-RG-FL	90	105	123	90	72	70	75	0.425	-0.255
A16	Return U-Bend: Long Radius	BEND-LR-SC	50	59	68	50	40	45	45	0.426	-0.5182
A17	Tee: Line Flow Screwed	TEE-LF-SC	20	24	27	20	16	20	25	0.9	0
A18	Tee: Branch Flow Screwed	TEE-BF-SC	65	76	89	65	52	65	70	1.85	-0.3747
A19	Tee: Line Flow Flanged	TEE-LF-FL	20	24	27	20	16	20	25	0.265	-0.4695
A20	Tee: Branch Flow Flanged	TEE-BF-FL	65	76	89	65	52	65	70	1	-0.2851
A21	Strainer: Basket	STRAINER	90	105	123	90	72	70	75	2.4	-0.5609
A22	Union / Coupling	UNION	45	53	61	45	36	30	35	0.083	-0.6644
A23	Inlet: Bell-Mouthed	INLET-BM	20	24	27	20	16	20	25	0.05	0
A24	Inlet: Square-Edged	INLET-SE	45	53	61	45	36	30	35	0.5	0
A25	Outlet: All Types	OUTLET	65	76	89	65	52	65	70	1	0

Pipe Fittings Data

Fittings

5 - Pipe-Sizing-Data.xls

**Dynamic Pressure Losses through Valves**

EL = L/D \* D (EL = Equivalent Length, L=Pipe Length, D = Pipe Diameter)

Velocity Pressure Factor (K) for Water :  $K = C * D^{**E}$  Pressure Drop (PD) = K\*VP

FITTING IDENTIFICATION				L/D Factors							K Factors	
ColRo	Description		Name	Water	Glycol	Brine	Diesel	Gasoline	Steam	Gas	Coeff C	Expon E
A8	Angle : Screwed		ANGLE-SC	175	205	238	175	140	150	200	4.5	4.5
A9	Angle : Flanged		ANGLE-FL	175	205	238	175	140	150	200	4.25	4.25
A10	Balancing		BALANCING	350	410	477	350	280	30	350	12.5	12.5
A11	Ball		BALL	10	12	14	10	8	10	10	0.24	0.24
A12	Butterfly		BUTTERFLY	50	59	68	50	40	0	0	12.5	12.5
A13	Check Swing : Screwed		CHECK-SC	150	176	204	150	120	75	100	3.5	3.5
A14	Check Swing : Flanged		CHECK-FL	150	176	204	150	120	75	100	2	2
A15	Gate : Screwed		GATE-SC	10	12	14	10	8	10	10	0.24	0.24
A16	Gate : Flanged		GATE-FL	10	12	14	10	8	10	10	1	1
A17	Gate : Electric Motor		GATE-EM	10	12	14	10	8	10	10	0.24	0.24
A18	Gate : Pneumatic Motor		GATE-PM	10	12	14	10	8	10	10	0.24	0.24
A19	Globe : Screwed		GLOBE-SC	350	410	477	350	280	300	350	12.5	12.5
A20	Globe : Flanged		GLOBE-FL	350	410	477	350	280	300	350	12.5	12.5
A21	Globe : Electric Motor		GLOBE-EM	350	410	477	350	280	300	350	12.5	12.5
A22	Globe : Pneumatic Motor		GLOBE-PM	350	410	477	350	280	300	350	12.5	12.5
A23	Lock Shield		LOCK-SHIELD	10	12	14	10	8	10	10	0.24	0.24
A24	Plug Cock		PLUG-COCK	150	176	204	150	120	130	150	12.5	12.5
A25	Pressure Reducing		PRV	10	12	14	10	8	10	10	0.24	0.24
A26	Quick Open		QUICKOPEN	350	410	477	350	280	300	350	12.5	12.5
A27	Pressure Regulator		PR-REG	10	12	14	10	8	10	10	0.24	0.24
A28	Relief / Safety		RELIEF	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A29	Solenoid		SOLENOID	350	410	477	350	280	300	350	12.5	12.5
A30	Foot Valve		FOOT	50	59	68	50	40	0	0	0.8	0.8

Fuente: Varkie C, Thomas. *IBM-AES Piping Software Ref-Data* [en línea]. Skidmore, Owings and Merrill. [Fecha de consulta: noviembre 17 de 2014]. Disponible en: <[http://bepan.info/yahoo\\_site\\_admin/assets/docs/Pipe-Sizing-Charts-Tables.12890822](http://bepan.info/yahoo_site_admin/assets/docs/Pipe-Sizing-Charts-Tables.12890822)>

## Anexo A5. Diámetros de orificios de inyectores

**Tecnomsm S.A.**

Aif. M. de Alegria 2494 B (B1618BGZ) El Talar Prov. de Bs. As. Argentina

T.E. (54-11) 4726-7772 L.R. FAX directo (54-11) 4726-7773

www.glama.com.ar E-MAIL info@glama.com.ar

**Glama** 

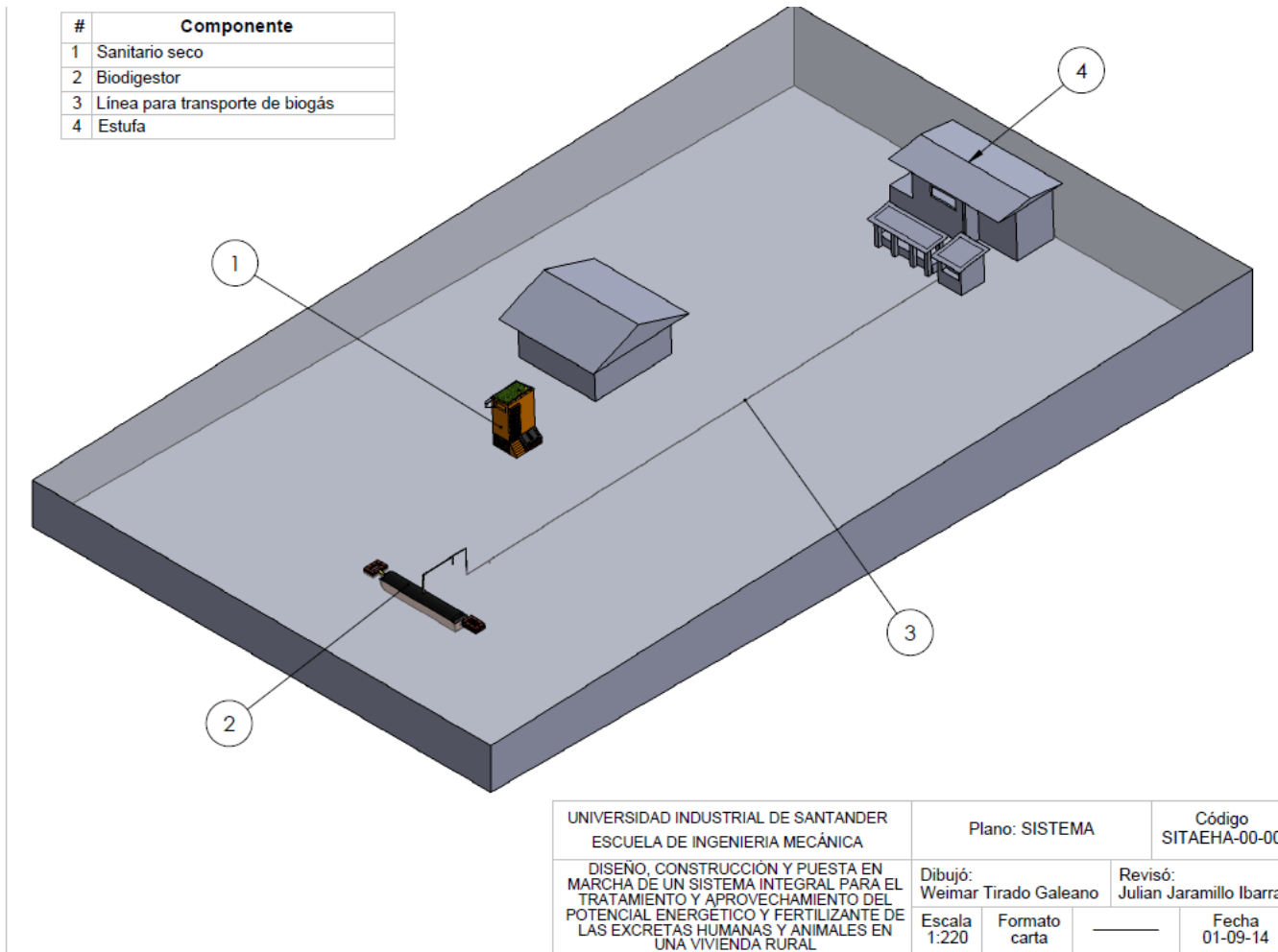
CALEFONES-CALEFACTORES-COCINAS

Diámetro Inyector	Kcal/h Gas Licuado	Kcal/h Gas Natural	Diámetro Inyector	Kcal/h Gas Licuado	Kcal/h Gas Natural
0,10	28	15	2,00	11290	5840
0,15	64	33	2,05	11861	6136
0,20	113	58	2,10	12447	6439
0,25	176	91	2,15	13047	6749
0,30	254	131	2,20	13660	7067
0,35	346	179	2,25	14288	7392
0,40	452	234	2,30	14930	7724
0,45	572	296	2,35	15587	8063
0,50	706	365	2,40	16257	8410
0,55	854	442	2,45	16941	8764
0,60	1016	526	2,50	17640	9126
0,65	1192	617	2,55	18353	9494
0,70	1383	715	2,60	19079	9870
0,75	1588	821	2,65	19820	10254
0,80	1806	934	2,70	20575	10644
0,85	2039	1055	2,75	21344	11042
0,90	2286	1183	2,80	22128	11447
0,95	2547	1318	2,85	22925	11860
1,00	2822	1460	2,90	23736	12279
1,05	3112	1610	2,95	24562	12707
1,10	3415	1767	3,00	25402	13141
1,15	3733	1931	3,05	26255	13583
1,20	4064	2103	3,10	27123	14032
1,25	4410	2281	3,15	28005	14488
1,30	4770	2468	3,20	28901	14951
1,35	5144	2661	3,25	29812	15422
1,40	5532	2862	3,30	30736	15900
1,45	5934	3070	3,35	31674	16386
1,50	6350	3285	3,40	32627	16879
1,55	6781	3508	3,45	33594	17379
1,60	7225	3738	3,50	34574	17886
1,65	7684	3975	3,55	35569	18401
1,70	8157	4220	3,60	36578	18923
1,75	8644	4472	3,65	37601	19452

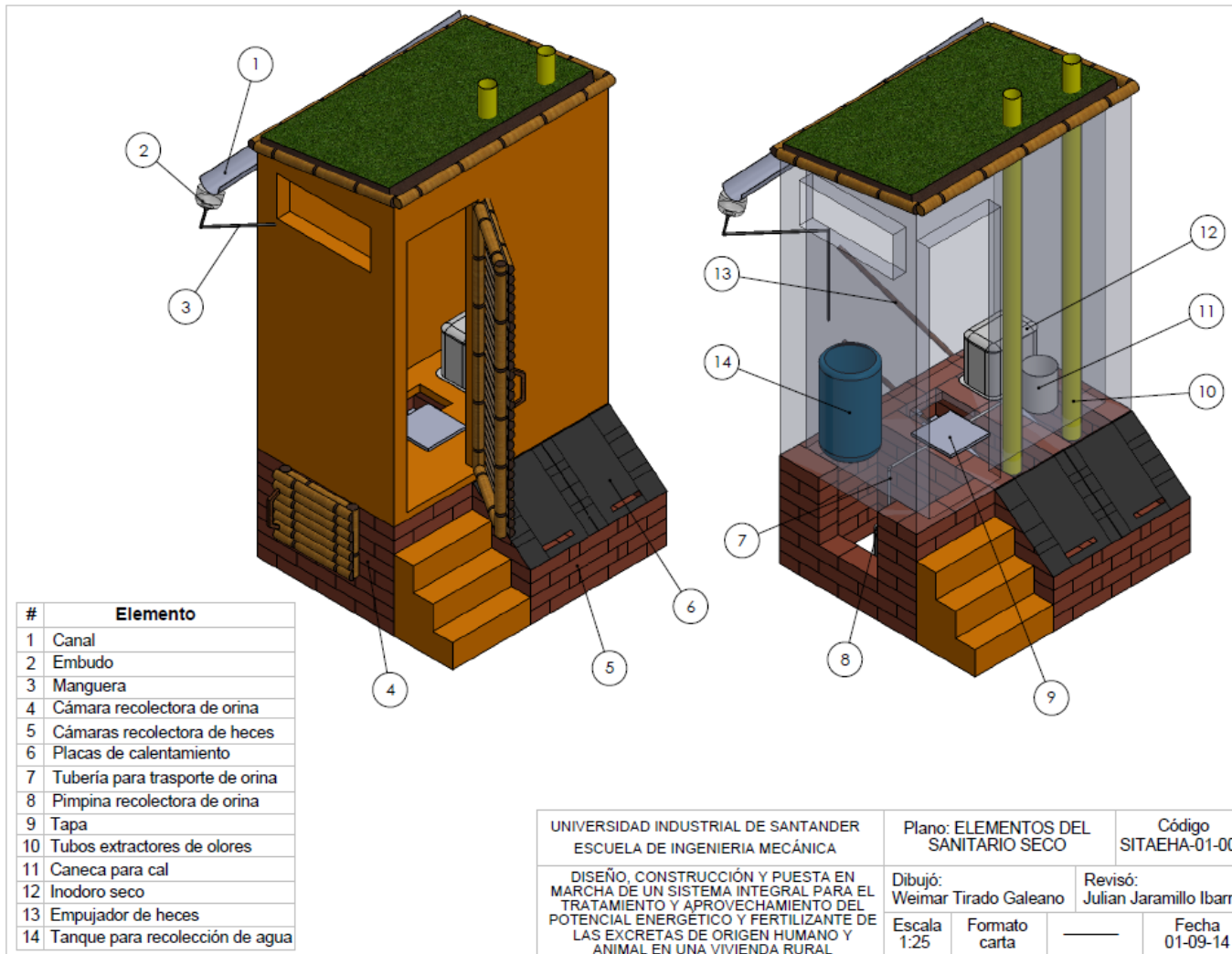
Fuente: Glama. *Diámetros de inyectores*. [Fecha de consulta: enero 24 de 2015].  
 Disponible en: < <http://www.glama.com.ar/downloads/Tabla%20de%20inyectores.pdf> > . Modificado por el autor.

## ANEXOS B. PLANOS

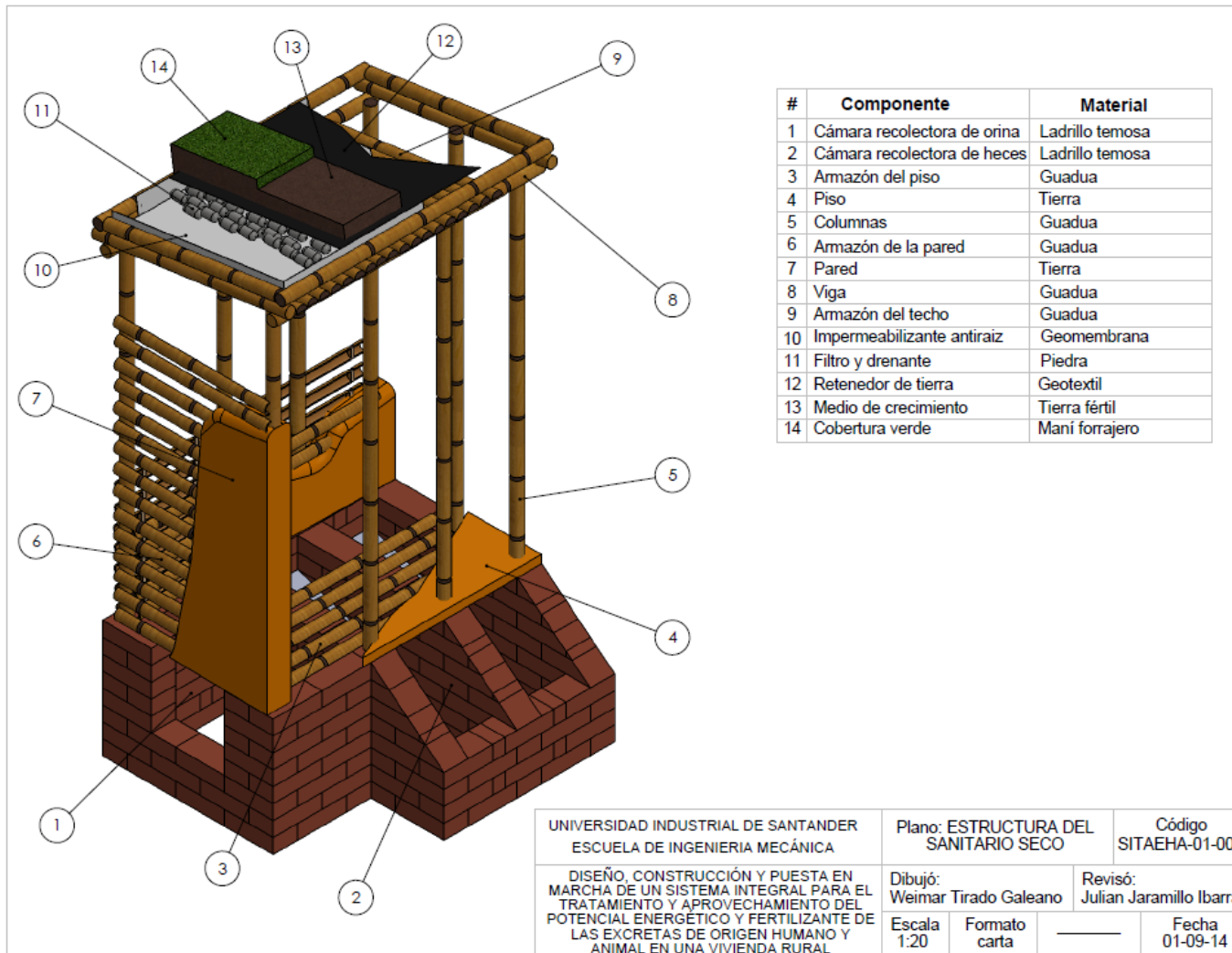
### Anexo B1. Sistema



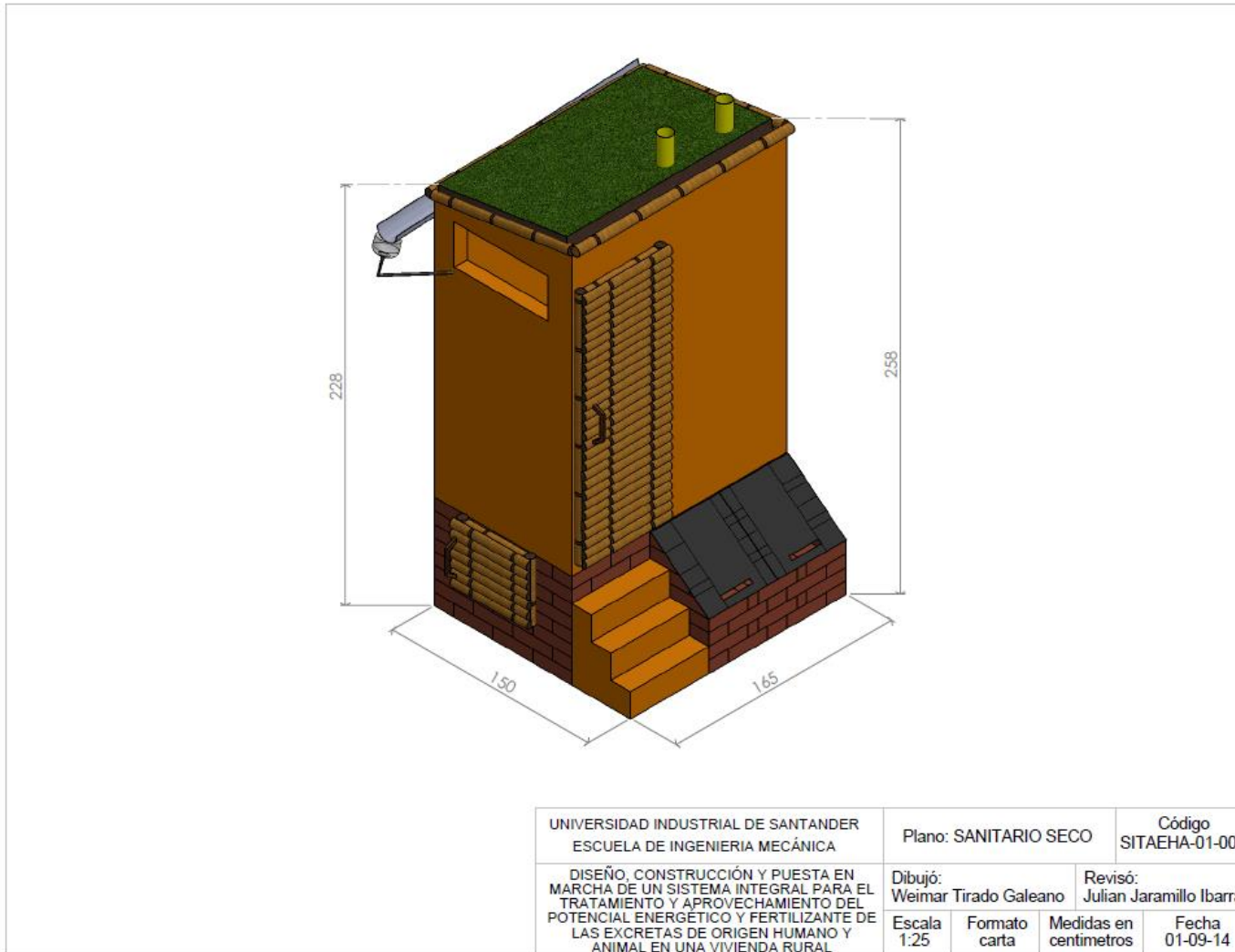
## Anexo B2. Elementos del sanitario seco



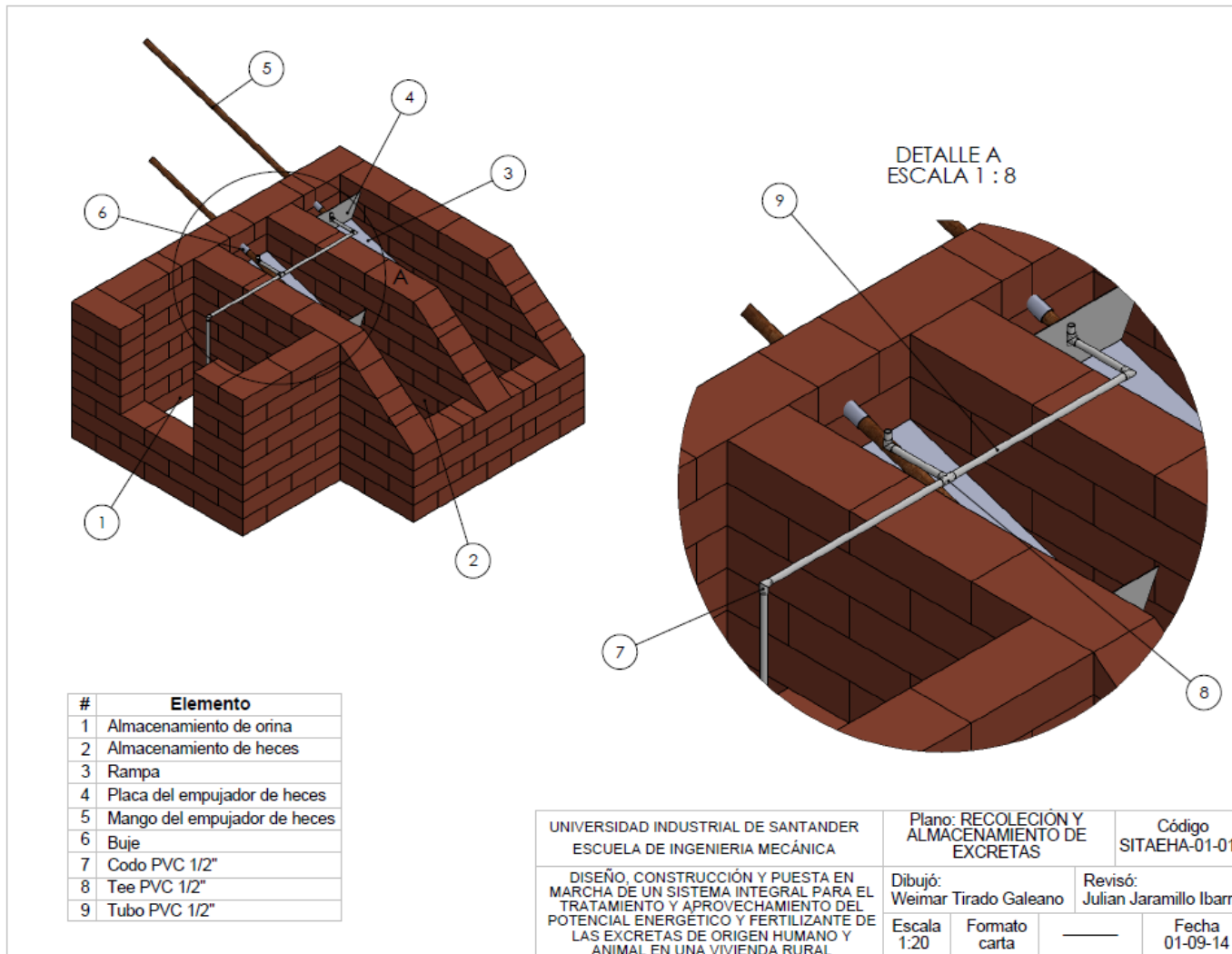
### Anexo B3. Estructura del sanitario seco



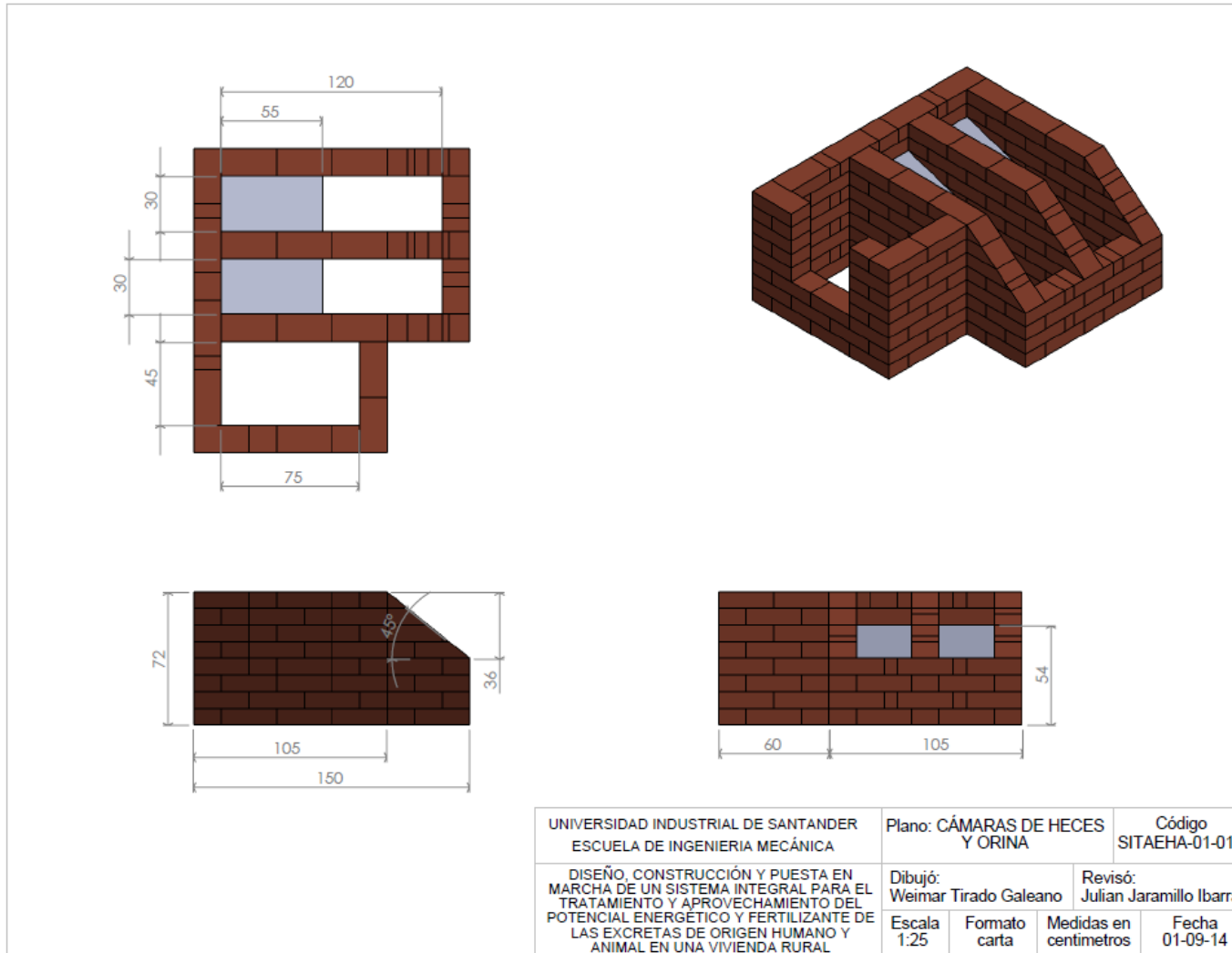
## Anexo B4. Sanitario seco



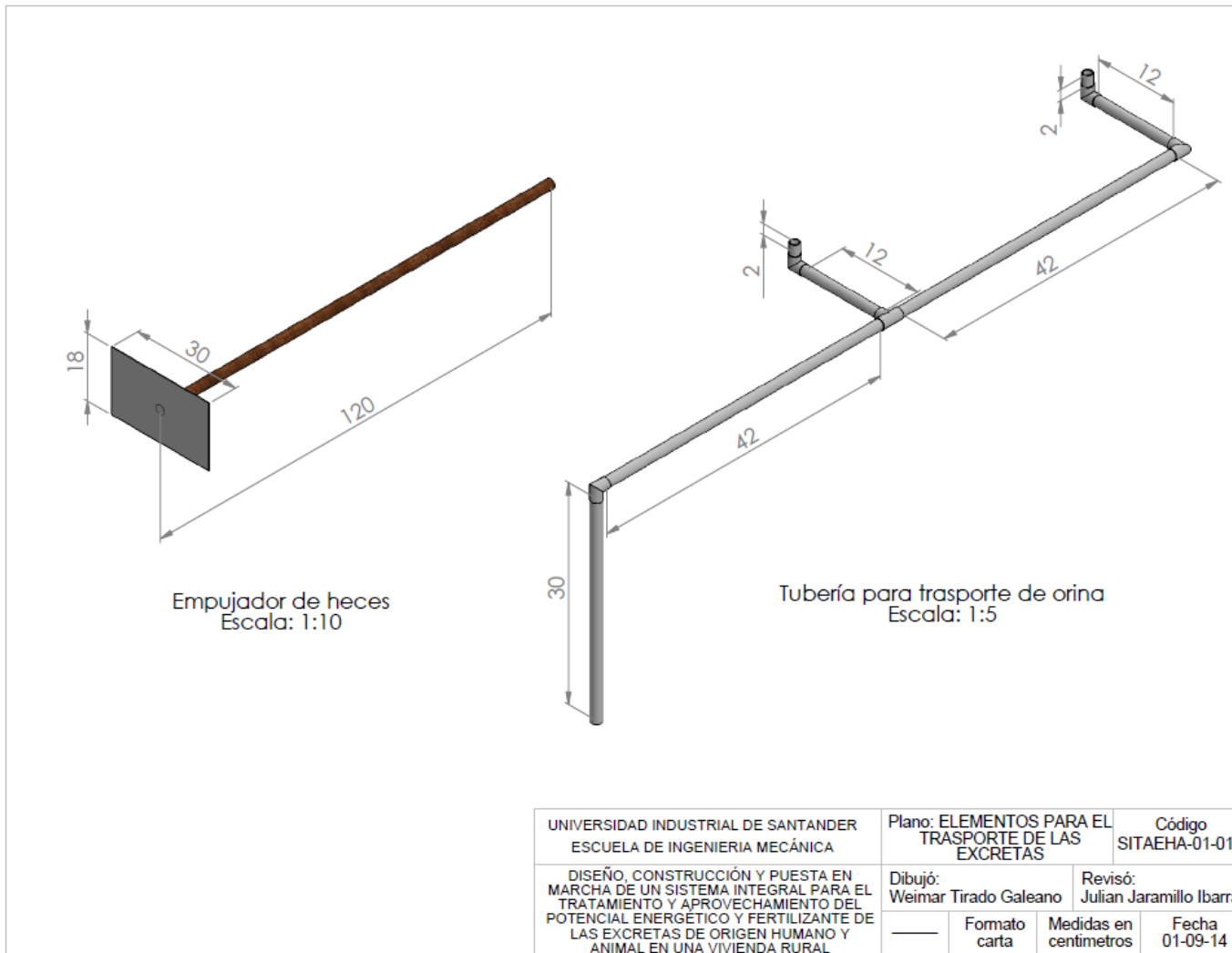
## Anexo B5. Recolección y almacenamiento de excretas



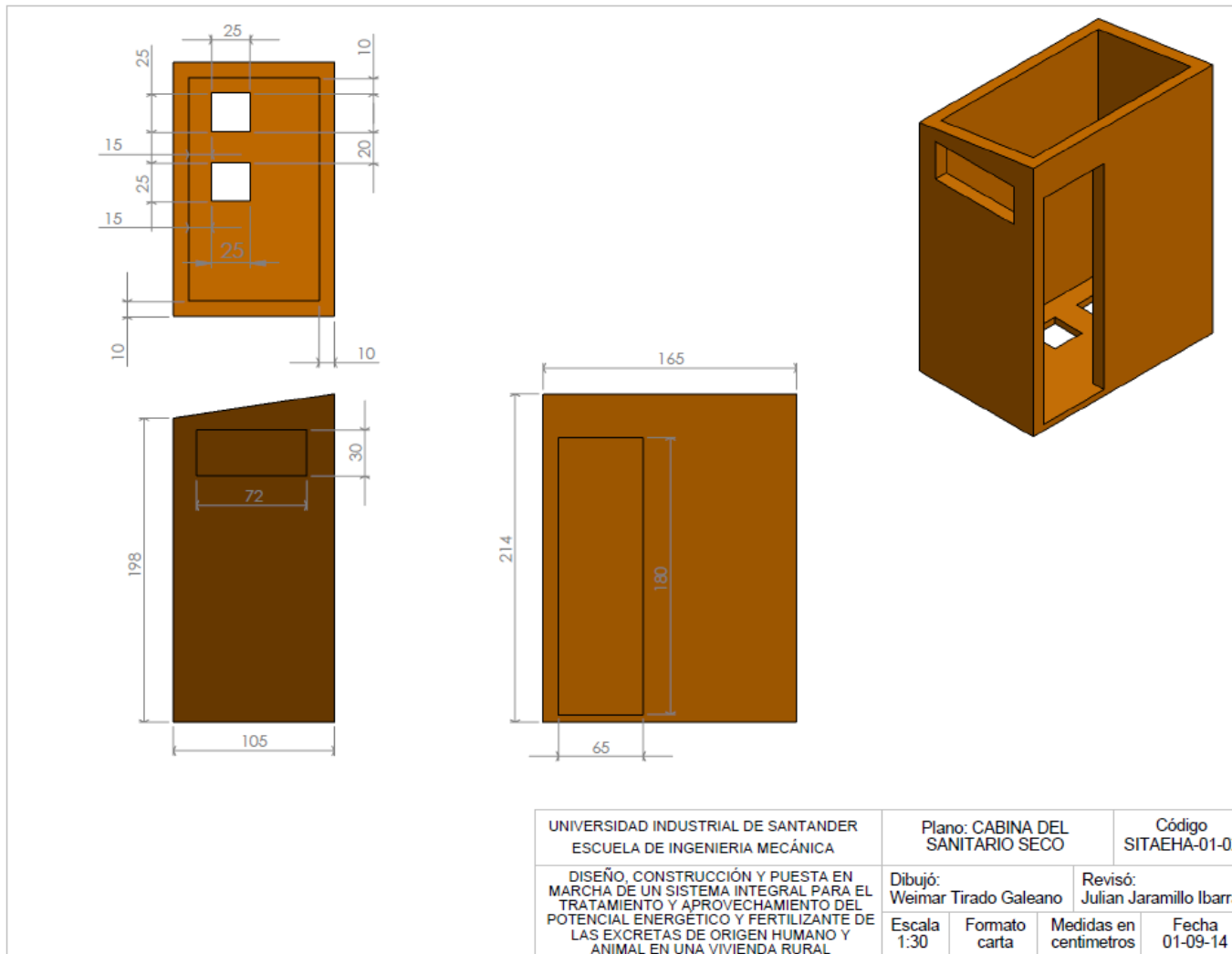
## Anexo B6. Cámaras de heces y orina



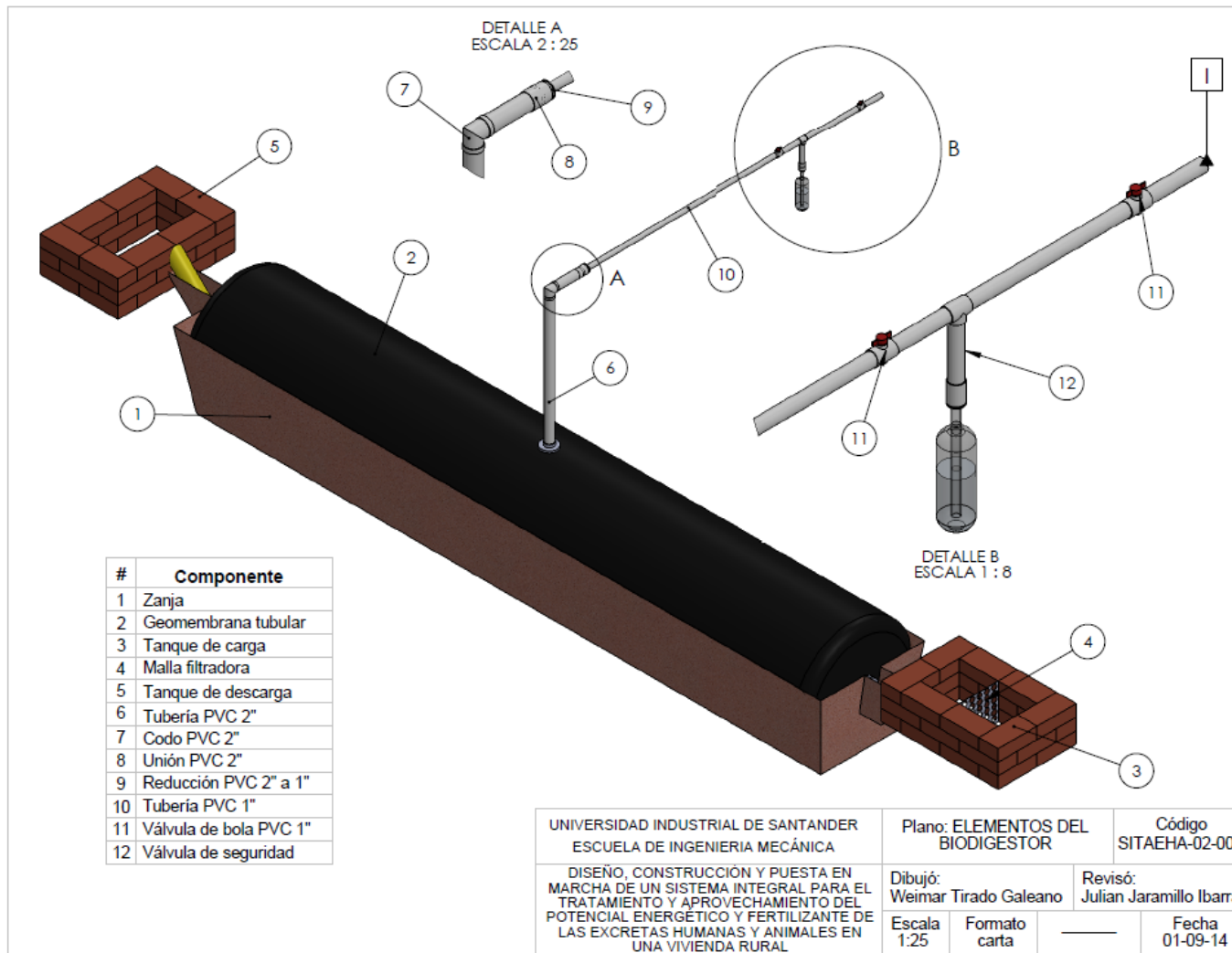
## Anexo B7. Elementos para el transporte de las excretas



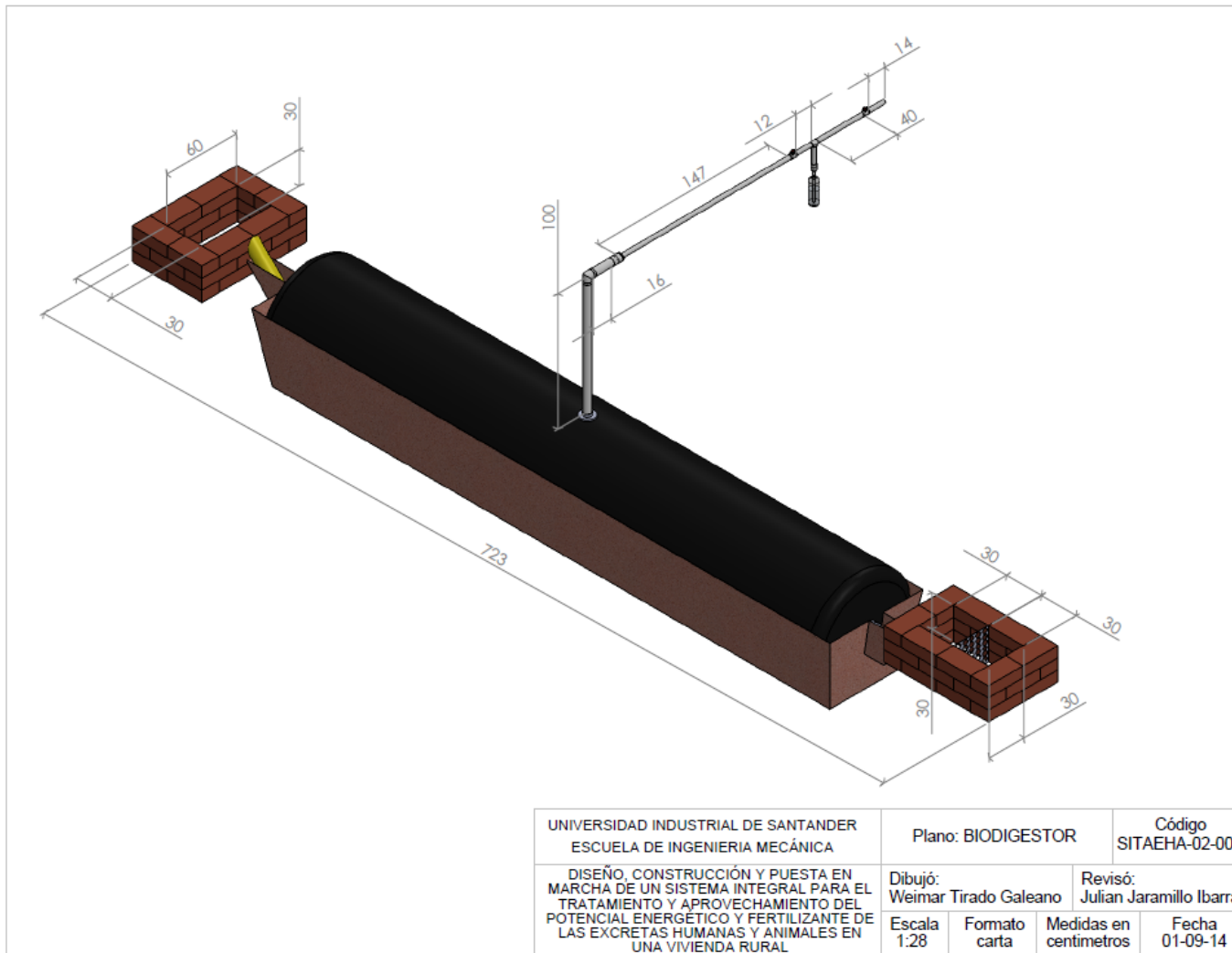
## Anexo B8. Cabina del sanitario seco



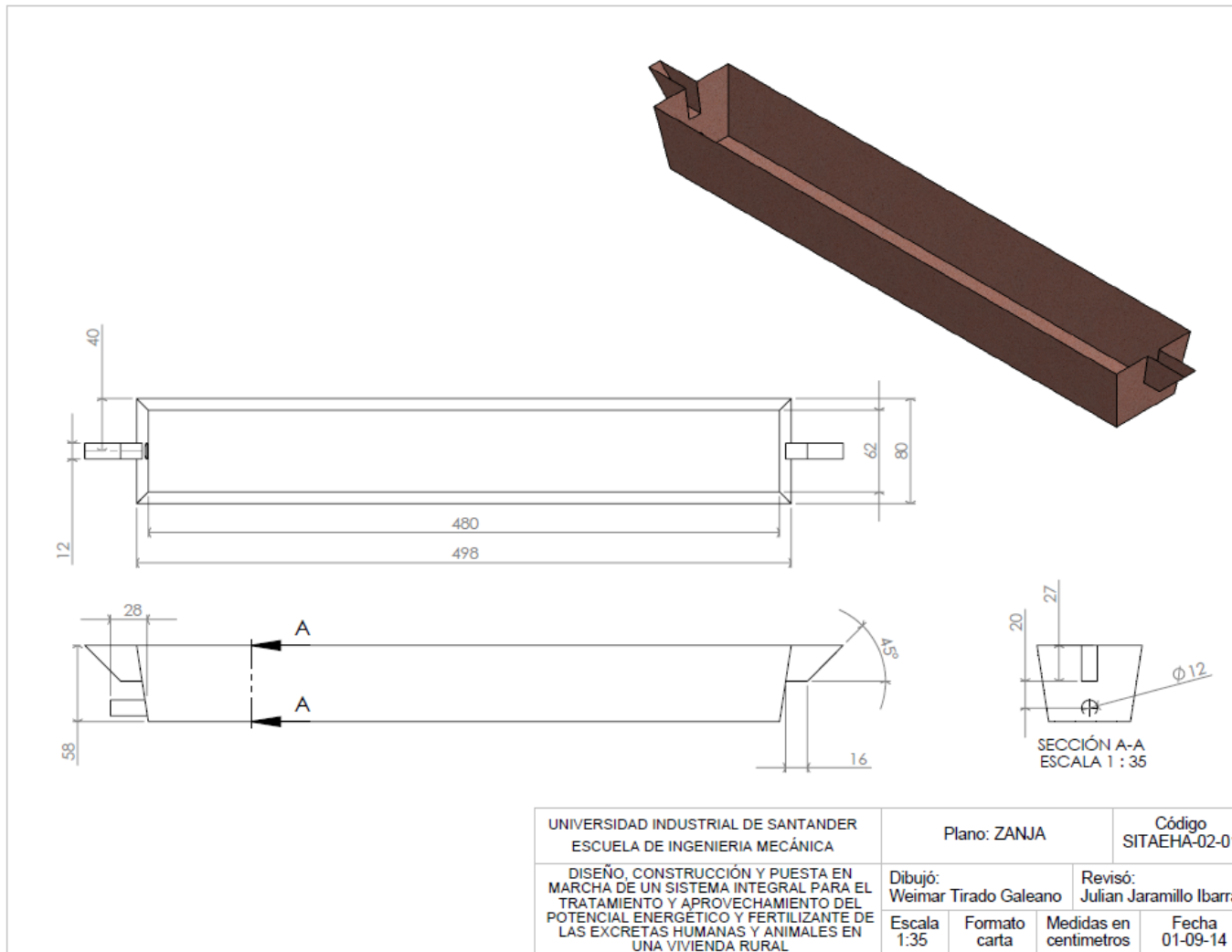
## Anexo B9. Elementos del biodigestor



## Anexo B10. Biodigestor

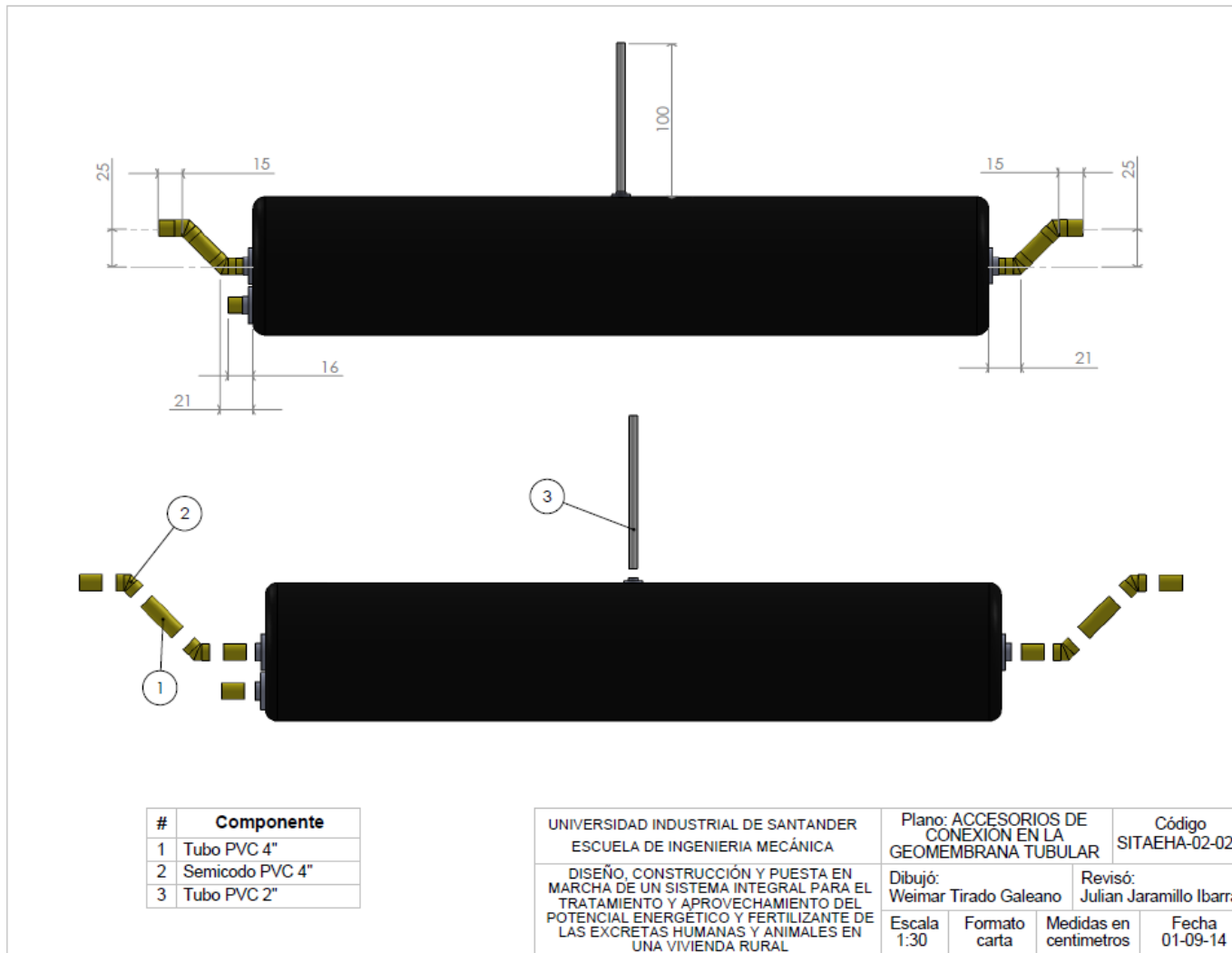


## Anexo B11. Zanja

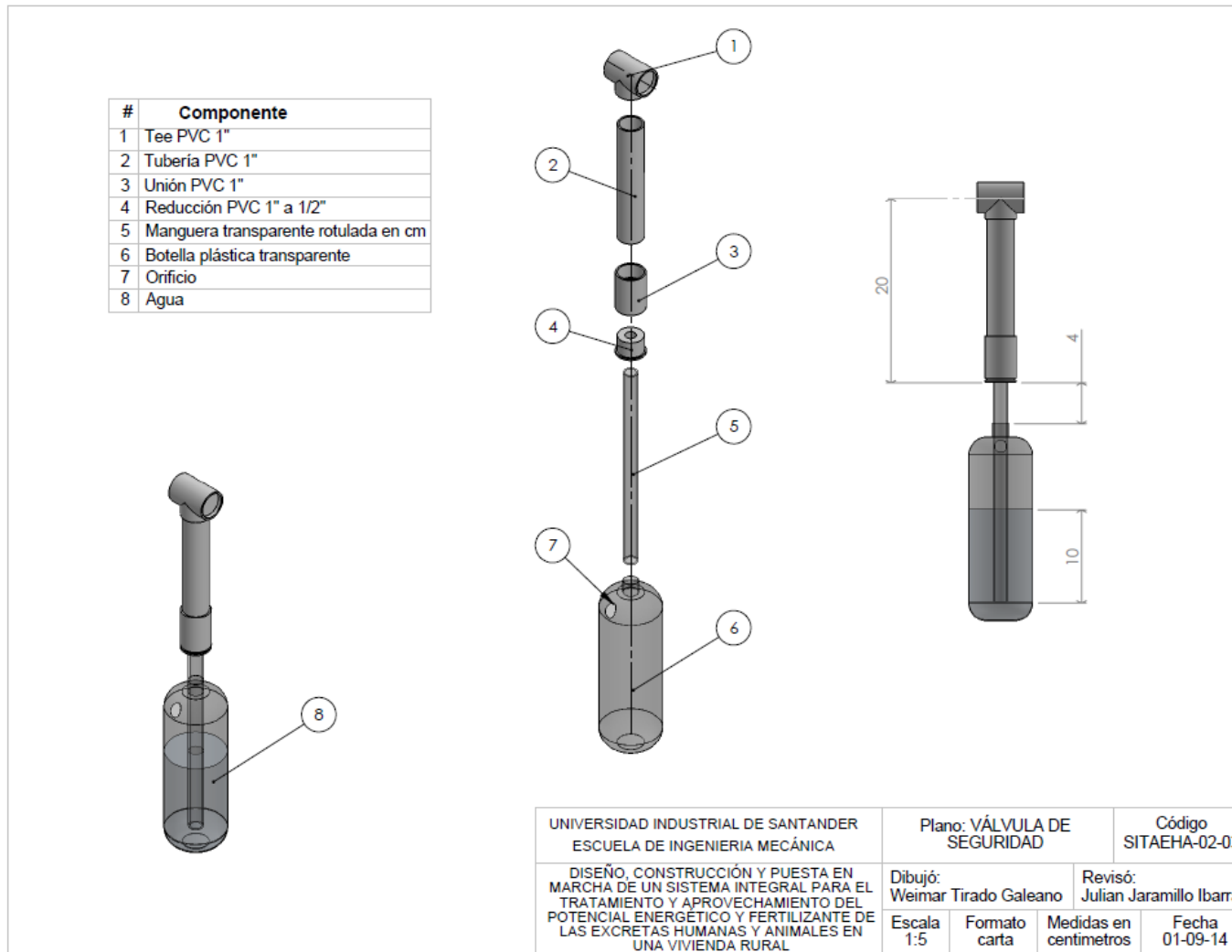




### Anexo B13. Accesorios de conexión en la geomembrana tubular

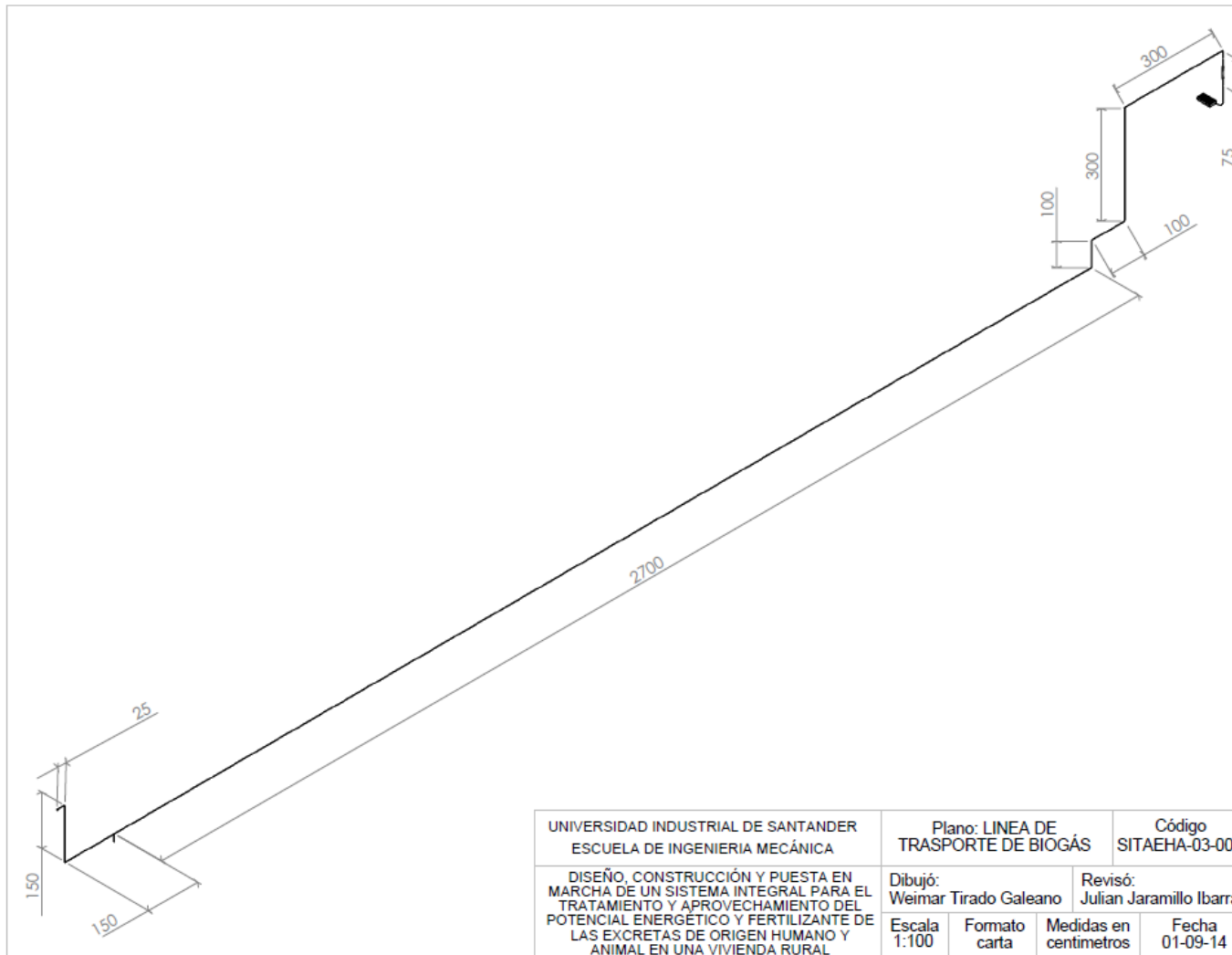


## Anexo B14. Válvula de seguridad

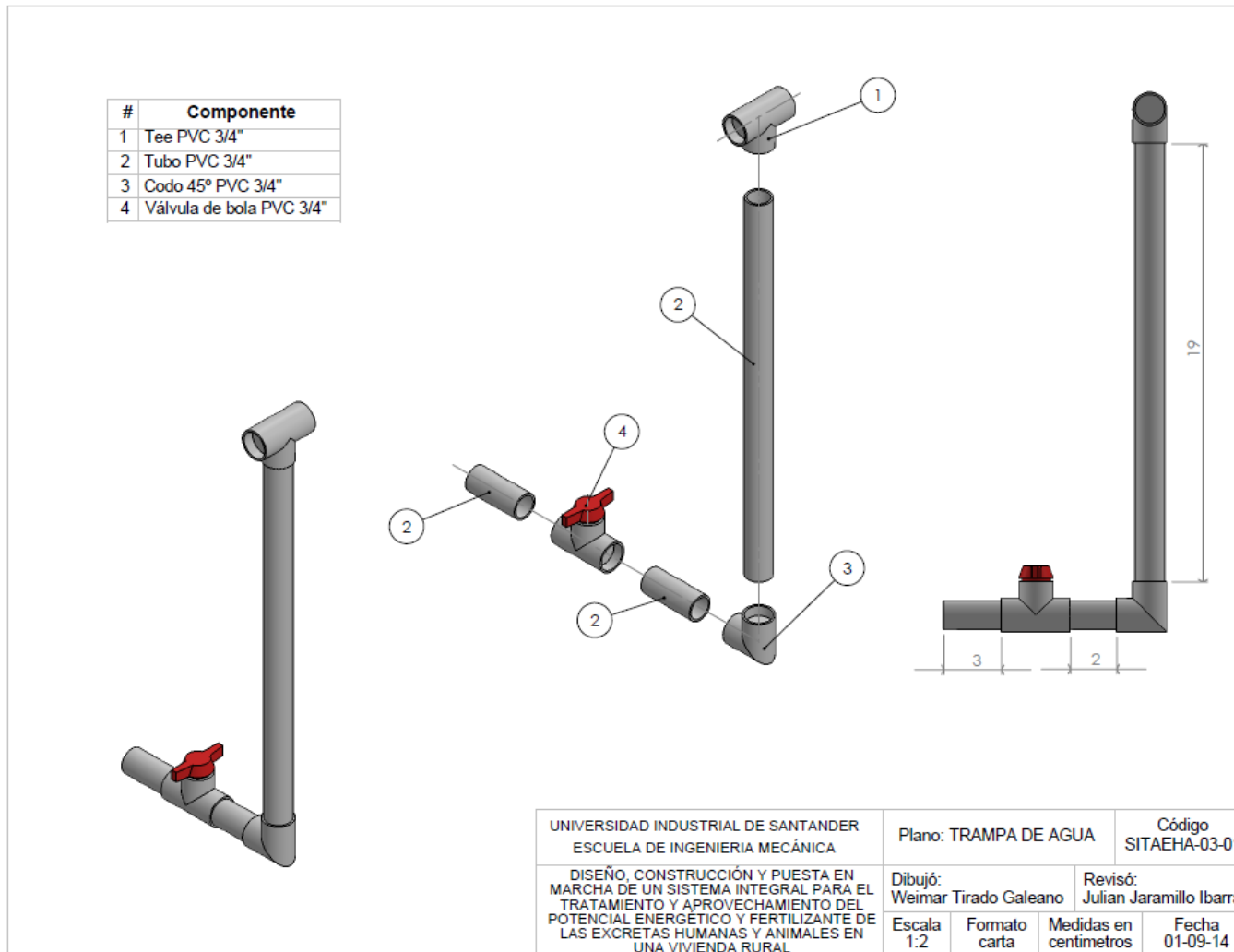




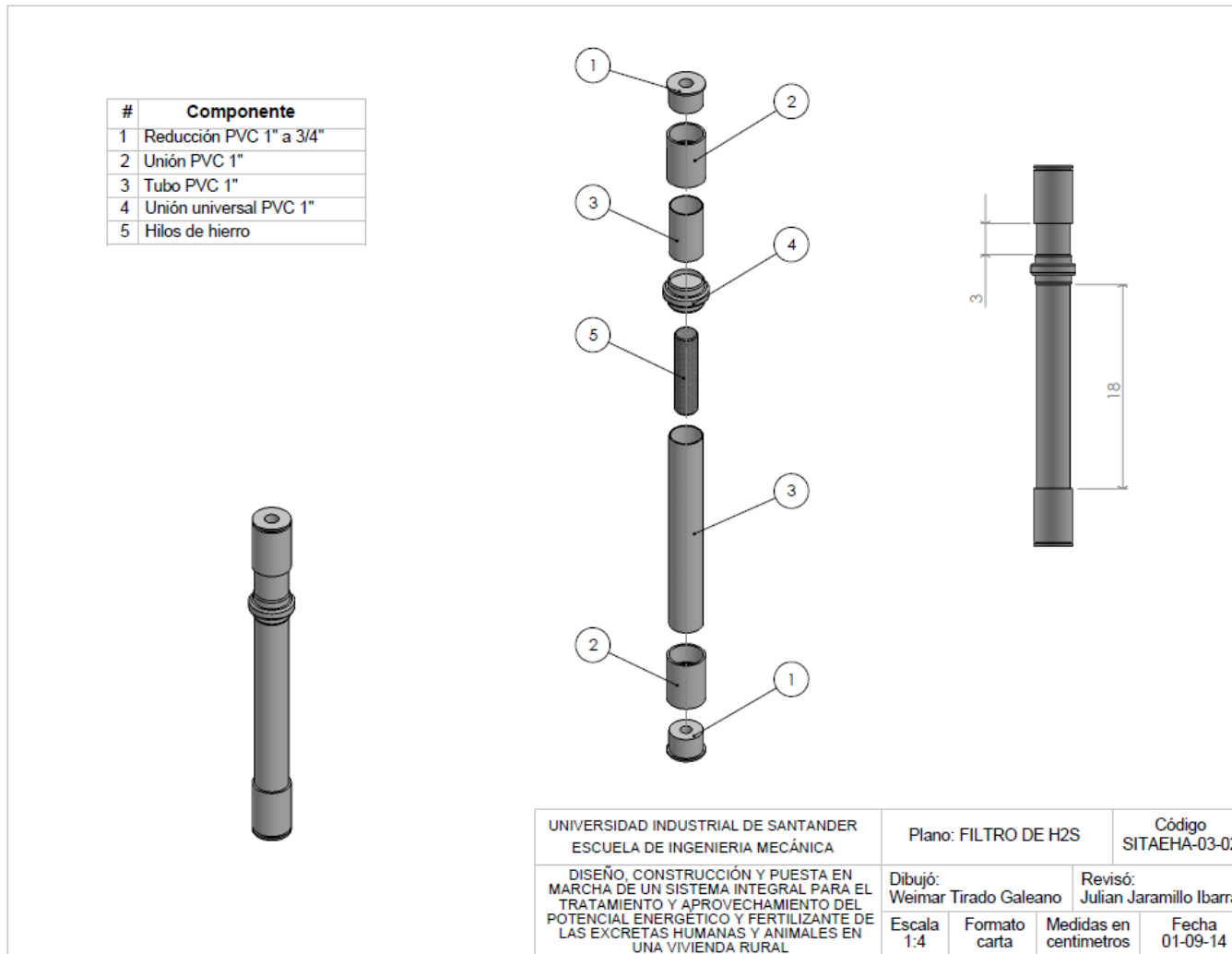
## Anexo B16. Línea de trasporte de biogás



## Anexo B17. Trampa de agua



## Anexo B18. Filtro de H<sub>2</sub>S



## ANEXOS C. ANÁLISIS EN LABORATORIO DEL BIOGÁS Y EL FERTILIZANTE

### Anexo C1. Informe de resultados de análisis de gases en la muestra de biogás

	LABORATORIO DE CROMATOGRAFÍA Y ESPECTROMETRÍA DE MASAS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	CÓDIGO: 985018-0K
	INFORME DE RESULTADOS	VERSIÓN: 01 Página 1 de 3 Vobc:

#### INFORME DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE GASES EN MUESTRAS DE GAS

##### 1. DATOS GENERALES

**ENTIDAD SOLICITANTE:** ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA – UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga - Santander)

**CÓDIGO DE LA(S) MUESTRA(S):** Veáse Tabla 1.

**DESCRIPCIÓN DE LA(S) MUESTRA(S):** Veáse Tabla 1.

**FECHA DE RECEPCIÓN DE LA(S) MUESTRA(S):** 2014-10-23

**ANÁLISIS SOLICITADO:** Determinación de gases en muestras de gas.

**FECHA DE REALIZACIÓN DEL ANÁLISIS:** 2013-12-05

##### 2. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS

La determinación de gases en la(s) muestra(s) se realizó empleando la técnica de *headspace* estático y análisis por cromatografía de gases con detector de conductividad térmica y detector de ionización en llama (S-HS/GC/TCD/FID). El análisis cromatográfico se realizó en un cromatógrafo de gases (GC) AT 6890A (*Agilent Technologies*, Palo Alto, California, EE.UU.), dotado con un detector de conductividad térmica (TCD) y detector de ionización en llama (FID). El análisis del gas se realizó en un equipo *headspace* estático HP 7694E (*Hewlett-Packard*, Palo Alto, California, EE.UU.). Las columnas empleadas en el análisis fueron: Gs-carbonplot (carbón monolítico, 30 m x 0.53 mm x 3 µm) y HP-PLOT *Molesieve* [zeolita (tamiz molecular 5 Å), 30 m x 0.53 mm x 50 µm]. La inyección se realizó en modo *splitless*. Como patrones de referencia se emplearon la mezcla de gases FF34402, FF34403, FF34235, O05218, CC116522 y CC83392 de Linde.

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS  
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA RECIBIDA.

Carrera 27 – Calle 8, Ciudad Universitaria, Edificio 45, Bloque A Entrada 2A, Piso 2. Teléfono: +57 314 4280 Ext. 1140.  
Línea directa: +57 545 6737. Fax +57 3358210. Celular (315) 879 3885. Bucaramanga, Colombia.  
e-mail: [alena@uis.edu.co](mailto:alena@uis.edu.co), [rima@uis.edu.co](mailto:rima@uis.edu.co)

	LABORATORIO DE CROMATOGRAFÍA Y ESPECTROMETRÍA DE MASAS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	CÓDIGO: 985018-0K VERSIÓN: 01
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Página 2 de 3 VoBo:

### 3. RESULTADOS

La(s) muestra(s) enviada(s) identificada(s), fue(ron) analizada(s) por duplicado. Para la cuantificación de gases en la(s) muestra(s), se empleó la técnica de estandarización externa. Para ello, se utilizó el factor de respuesta (Rf) establecido del análisis de la solución patrón de los gases.

En la **Tabla 1** se reporta la concentración de gases determinada por S-HS/GC/TCD/FID en la(s) muestra(s) analizada(s) y enviada(s) por la **ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**.

En el **Anexo 1** se adjuntan los cromatogramas por S-HS/GC/TCD/FID de gases, junto con la curva de calibración y los cromatogramas de la(s) muestra(s) analizadas por S-HS/GC/TCD/FID.

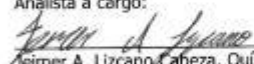
	LABORATORIO DE CROMATOGRFÍA Y ESPECTROMETRÍA DE MASAS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	CÓDIGO: 985018-DK VERSIÓN: 01
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Página 3 de 3 VoBo:

**Tabla 1.** Niveles mínimos de cuantificación (NMC=2NMD) del S-HS/GC/TCD/FID (S/N = 5); y concentración de gases presente en la(s) muestra(s) de gas, enviada(s) por la **ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA.**


Compuesto	NMC, ppm	Concentración en las muestras, ppm*	
		985018-01-DK	
		Muestra de biogás tomada a la salida del biogestor	
Dióxido de carbono	2	94318	
Acetileno	3	< 3	
Etileno	2	< 2	
Etano	2	< 2	
Metano	2	342800	
Monóxido de carbono	2	< 2	
Propano	4	< 4	
Hidrógeno	26	< 26	
Oxígeno	558	23066	
Nitrógeno	353	61717	

\*Promedio de dos mediciones

Analista a cargo:

  
 Jeimer A. Lizcano Cabeza, Químico  
 Analista

Elaboró:

  
 William Salgar Rangel, Químico M.Sc.  
 Subdirector Técnico



Revisó y autorizó:

Elena E. Stashenko, Química Ph.D.,  
 Directora Laboratorio de Cromatografía  
 y Espectrometría de masas,  
 Universidad Industrial de Santander

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS. LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA RECIBIDA.

Carrera 27 - Calle 9, Ciudad Universitaria, Edificio 45, Bloque A Entrada 2A, Piso 2. Teléfono: +7 634 4000 Ext. 1140.  
 Línea directa: +7 846 6737. Fax: +7 6386219. Celular (315) 679 3986. Bucaramanga, Colombia.  
 e-mail: [cdm@ucis.edu.co](mailto:cdm@ucis.edu.co), [info@ucis.edu.co](mailto:info@ucis.edu.co)

## Anexo C2. Informe de resultados del análisis NPK al fertilizante

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	<b>Código:</b> F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	<b>Versión:</b> 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>Fecha:</b> 2012/01/16 <b>Página</b> 1 de 2	



\*Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1659 de 2011, en los parámetros pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y compuestas\*





\*Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 4353 de 2013, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano\*

<b>Informe de resultados No.</b>	I-14-609	<b>Fecha de emisión:</b>	Diciembre 12 de 2014
<b>Cliente:</b>	WEIMAR TIRADO GALEANO		
<b>Dirección del cliente:</b>	Escuela de Ingeniería Química		
<b>Solicitud de servicio No.</b>	14-470	<b>No. de muestras:</b>	01
<b>Fecha de recepción de las muestras:</b>	Diciembre 01 de 2014		
<b>Muestras recibidas por:</b>	Amparo López		
<b>Fecha de análisis:</b>	Diciembre 01 de 2014 – Diciembre 12 de 2014		

### 1. ANALISIS FISICOQUIMICO

<b>Codificación de la Muestra:</b>	14-570-01	<b>Tipo de muestra:</b>	Puntual
<b>Identificación de la muestra:</b>	Fertilizante Líquido		
<b>Matriz de la muestra:</b>	Lixiviado		
<b>Muestreo realizado por:</b>	El Cliente		
<b>Lugar y punto de muestreo:</b>	Los Santos / Biodigestor		
<b>Fecha del muestreo:</b>	Noviembre 29 de 2014		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Nitrógeno (mg N/L)	439,53	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N <sub>T</sub>
Fósforo (mg P/L)	203,76	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Potasio (mg K/L)	749,26	Absorción Atómica / SM 3111B

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	<b>Código:</b> F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	<b>Versión:</b> 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>Fecha:</b> 2012/01/16 Página 2 de 2	

Informe de resultados No. I-14-609 Solicitud de servicio No. 14-570

Observaciones: *Ninguna*

**Nota 1:** Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

**Nota 2:** En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

**Estimado cliente:** Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:

  
**Luz Yolanda Vargas Fiallo**  
 Directora del Laboratorio  
 Química. M.Sc Química UIS  
 MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López Guerrero

PARAMETRO	RESULTADO
Nitrogeno (mg N/L)	103,22
Fósforo (mg P/L)	103,78
Potasio (mg K/L)	103,30

## ANEXOS D. MACRONUTRIENTES EN HECES Y ORINA HUMANA

### Anexo D1. Macronutrientes en heces

**TABLE 2**  
Chemical composition of the human manure and goat manure used in the study

Manure type	pH	EC (mS-cm <sup>-1</sup> )	C: N	C: P	Total elemental composition									
					(1.2.5 manure: water)									
					C	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn
Human manure	7.5	3.3	13	80	240	18	3	44	4	7.9	35	52	6.3	33
Goat manure	7.5	3.1	10	63	250	26	4	46	7	12.1	48	73	7.6	37

P and K treatment (Control B) was included to determine crop performance in the absence of nitrogen, but with adequate P and K. The P and K were broadcast just before transplanting, while N treatments as LAN were top-dressed 4 weeks after transplanting.

Members of the KwaSombaxda Community Garden Project were responsible for day-to-day maintenance of the plots with oversight from the researchers. The crop was grown under irrigation using a dragline sprinkler irrigation system with water pumped from the nearby Tyume River. Irrigation was managed by the host farmer, and generally consisted of two irrigation cycles of 3 h each per week. Harvesting was done on 19 November 2003 from a net plot area of 4 m<sup>2</sup> achieved by disregarding the outer (guard) rows in each plot. The harvested cabbage heads were weighed on site but were later transported to the laboratory where sub-samples were taken for dry matter determination and nutrient (N, P and K) analysis. Total N was determined by dry combustion using a LECO TRUSPEC C and N auto-analyser (LECO Corporation, 2003) while total P and K were determined following wet digestion with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as described by Okalebo et al., (2002). Total K in digested samples was determined by AAS while total P was determined by the molybdenum-blue method (Olsen and Sommers, 1982).

Soil samples were taken after harvest from the top 15 cm soil of each plot, air dried, and ground to pass through a 2 mm sieve, and analysed for total carbon, soil pH, electrical conductivity (EC), and selected macro- and micronutrients. Total C was determined by dry combustion using a LECO TRUSPEC C and N auto-analyser. Soil pH was measured in water at a soil: water ratio of 1:2.5 using a pH meter with a glass and reference calomel electrode (Model pH 330 SET-1, 82362, Weilheim, Germany) after the soil suspensions were shaken for 30 minutes and equilibrated for 1 h. Electrical conductivity was measured in water at a 1: 2.5 soil: water ratio using a conductivity meter (Model Cond.330i/SET 82362, Weilheim, Germany). The extractable cations Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cu<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> were extracted using the Ambic 1 procedure (Van der Merwe et al., 1984) and analysed by AAS. Soil-extractable P was also extracted using the Ambic-1 procedure and the P concentration in the extract determined by the molybdenum-blue method (Olsen and Sommers, 1982).

### Results and discussion

Goat and human manure had comparable pH and EC values (Table 2). The EC values were very low, suggesting that soil application of both amendments should not cause salinity problems. The pH of the manures was slightly alkaline, indicating that their application to acidic soils would have a liming effect. Human manure had lower concentrations of all macro and micro nutrients determined than goat manure (Table 2), suggesting that human manure would be a poorer source of nutrients. The C: N and C: P ratios of the two manures were well below the cut-off ranges for decomposition of organic materials and release of N and P. However, the C: N and C: P ratios of goat manure were lower than those of human manure, suggesting that the goat manure could decompose and release its N and P more readily.

Inorganic N fertiliser substantially increased cabbage yields above both control treatments (Controls A and B), as well as the goat manure treatment (Table 3, next page). The highest yield was obtained with the LAN application of 100 kg N/ha<sup>-1</sup> inorganic N and not the recommended rate of 200 kg N/ha<sup>-1</sup>. The 100 kg N/ha<sup>-1</sup> treatment was the only one that gave a statistically significantly higher yield than both controls, as well as being the only one to give a significantly higher yield than the lowest inorganic N treatment, the human manure and goat manure treatments.

Observations during the growing season showed that inorganic N application rates above 100 kg N/ha<sup>-1</sup> supported bigger plants but these failed to head properly as a result of the lush growth. In contrast to inorganic fertiliser, rates of human manure application equivalent to 50 - 200 kg N/ha<sup>-1</sup> increased yield only slightly and more or less to the same extent (Table 3). Only the highest rate of human manure application (400 kg N/ha<sup>-1</sup> = 21.6 t/ha<sup>-1</sup> of human manure) caused a substantial increase in yield. This could be explained by the fact that nutrients in inorganic fertiliser are immediately available to growing plants, whereas a large proportion of nutrients in both human and goat manures are organically bound in undigested food/feed remains and become only slowly available through mineralisation (Kirchman and Petterson, 1995). The results suggest that for human manure to have an effect on cabbage under our experimental conditions, at least 20 t/ha<sup>-1</sup> has to be applied.

Fuente: PNS, Mnkeni. y LM, Austin. Fertiliser value of human manure from pilot urine-diversion toilets. Sur África: University of For Hare. p. 135

### PARTE I: INFORMACIÓN GENERAL Y RECOMENDACIONES PARA EL USO DE LA ORINA EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

#### CARACTERÍSTICAS DE LA ORINA HUMANA

##### Guta práctica:

La orina es un fertilizante líquido bien equilibrado de acción rápida rico en nitrógeno. El contenido de nutrientes en la orina depende de la dieta alimenticia. Si se desconoce el contenido de nitrógeno en la orina, se puede esperar una concentración de 3 a 7 gramos de N por litro de orina. El fósforo en la orina se excreta en una forma asimilable para las plantas, produciendo la orina un fertilizante de fósforo eficiente también. La cantidad de orina producida por un adulto depende de la cantidad de líquido que bebe una persona, siendo generalmente de 0,8 a 1,5 litros por adulto por día.

El texto de la siguiente sección supone que la orina se maneja de acuerdo a las directrices de la OMS (2006) para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises en la agricultura y acuicultura.

Los nutrientes de las plantas ingeridos como alimentos abandonan el cuerpo humano con las excretas. Una vez que la persona ha llegado a su completo desarrollo existe un balance de masas entre lo consumido y lo excretado, véase el gráfico en el cuadro. Este tiene tres implicaciones importantes:

- La cantidad de nutrientes vegetales excretados puede ser calculada sobre la base de la ingesta alimenticia, para la cual se obtiene información más fácilmente y mejor que para las excretas.
- Si todas las excretas y residuos orgánicos, así como el estiércol animal y residuos de cultivos, se reciclaran, se podría mantener la fertilidad de las tierras de cultivo, ya que los productos reciclados contienen la misma cantidad de nutrientes para las plantas que fueron utilizados por los cultivos.
- Las diferencias en la composición de las excretas entre diversas regiones reflejan variaciones en la absorción de los cultivos consumidos, y por lo tanto en el suministro de nutrientes necesarios para la producción agrícola para mantener la fertilidad de cultivo en la región.

Una recomendación importante, independientemente de las cantidades y concentraciones de nutrientes en las excretas, es tratar de distribuir los fertilizantes de excretas en un área equivalente a la utilizada para el cultivo de la cosecha.

La orina es una solución acuosa formada por más de un 95% de agua, urea, creatinina, iones disueltos (cloruro, sodio, potasio, entre otros), compuestos orgánicos e inorgánicos o sales. La mayoría de estos permanecen en la solución, sin embargo, sustancias ricas en fósforo tienden a sedimentarse en los contenedores de almacenamiento e higienización. Esta sustancia tiene una textura semejante a la de un jarabe, y si la orina es recolectada en un sistema de tuberías, este "jarabe de orina" puede sedimentarse en los tubos, si la inclinación es insuficiente.

#### MACRONUTRIENTES – CANTIDADES Y DISPONIBILIDAD PARA LA PLANTA

La orina contiene cantidades significativas de los principales macronutrientes requeridos por las plantas; nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). El nitrógeno se produce en altas concentraciones (mayormente como urea), mientras que el fósforo y el potasio se encuentran en concentraciones comparativamente más bajas, en formas asimilables para las plantas.

La orina aplicada directamente o tras el almacenamiento es una alternativa de gran calidad y bajo costo a la utilización de fertilizantes minerales ricos en nitrógeno para la producción agrícola. Los nutrientes se encuentran en la orina en forma iónica y su disponibilidad para las plantas es comparable con la de fertilizantes químicos (Johansson et al. 2001; Kirchmann y Petersen, 1995; Simons y Clemens 2004). La orina contiene además grandes cantidades de fósforo, potasio, azufre y micronutrientes, pero debido a su alto contenido de N, sus relaciones P/N y K/N son más bajas que en muchos fertilizantes minerales utilizados en la producción de cultivos, e inferiores a lo que algunos cultivos necesitan de acuerdo a las recomendaciones de fertilización.

Tabla 2: Valores propuestos para la masa excretada y nutrientes

Vinnerås et al. 2006

Parámetro	Unidad	Orina	Heces	Papel higiénico	Agua residual (orina + heces)
Masa húmeda	kg/persona.año	550	51	8,9	610
Masa seca	kg/ persona.año	21	11	0,5	40,5
Nitrógeno	g/ persona.año	4.000	550		4.550
Fósforo	g/ persona.año	365	153		545

Una ventaja de la orina en comparación con los fertilizantes orgánicos es que el fósforo se encuentra en una forma asimilable para las plantas. Siendo la orina un fertilizante bastante eficiente en términos de fósforo, esto tiene implicaciones para el futuro en relación con el concepto del Pico del Fósforo y el hecho de que el fósforo es un recurso limitado.

Puesto que es difícil analizar el contenido de nutrientes de la orina humana, existe la necesidad de un método para calcular la composición de la orina partiendo de información de fácil acceso. Un método, que se basa en las estadísticas de la FAO (véase [www.fao.org](http://www.fao.org)) del suministro de alimentos disponibles en varios países, ha sido desarrollado por Jönsson & Vinnerås (2004). El método utiliza ecuaciones derivadas de las estadísticas de la FAO y una estimación de la excreción media de la población sueca (Tabla 1), donde se han realizado varias mediciones de las excretas.

Sobre la base de esta estimación de la excreción promedio, en los alimentos suministrados a la población sueca

de acuerdo a las estadísticas de la FAO y en el análisis estadístico de diferentes productos alimenticios, se han desarrollado relaciones (ecuaciones 1 y 2) entre el alimento suministrado de acuerdo a la FAO y las excreciones de N y P.

$$N = 0,13 * \text{Proteína total de los alimentos} \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

$$P = 0,011 * (\text{Proteína total de los alimentos} + \text{proteína vegetal de los alimentos}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

En las ecuaciones 1 y 2, las unidades de N y P son las mismas que las de la proteína alimentaria. Como se muestra en la ecuación 2, existe una correlación positiva significativa entre el contenido de proteínas y el fósforo en los productos alimenticios. Adicionalmente, los productos alimenticios de tipo vegetal contienen en promedio el doble de fósforo por gramo de proteína que los productos animales, por lo que la proteína vegetal se cuenta dos veces en la ecuación 2.

Tabla 3: Suministro de alimentos (cultivos de materia prima) en los distintos países en el año 2000 FAO 2003

País	Energía total kcal/cap. día	Energía vegetal kcal/cap. día	Proteína total g/ cap. día	Proteína vegetal g/ cap. día
China, Asia	3.029	2.446	56	56
Haití, Antillas	2.056	1.923	45	37
India, Asia	2.428	2.234	57	47
Sudáfrica, África	2.886	2.516	74	48
Uganda, África Oriental	2.359	2.215	55	45

Fuente: RICHERT, Anna, et al. Guía Práctica de Uso de la Orina en Producción Agrícola. Estocolmo: Stockholm Environment Institute. 2011. p. 1-2

## ANEXO E. CARTILLA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Sistema integral para el tratamiento y aprovechamiento del potencial energético y fertilizante de las excretas de origen humano y animal en una vivienda rural



Cartilla de operación y  
mantenimiento

# Presentación

El presente manual tiene como objetivo orientar al usuario en la operación y mantenimiento del sistema, buscando garantizar buenos niveles de productividad y vida útil de los elementos, en un ambiente donde prevalezca la seguridad de las personas y el entorno.

# Contenido

1. Elementos de protección
2. Operación del sistema
  - 2.1. Operación del sanitario seco
  - 2.2. Operación del biodigestor
3. Mantenimiento del sistema
4. Recomendaciones

## *1. Elementos de protección*

Antes de operar el biodigestor o hacer mantenimiento al sistema resulta indispensable proveerse de la indumentaria adecuada para no estar expuesto al contacto directo con las excretas, e impedir el ingreso al organismo de algún patógeno.

Es importante proteger las manos y brazos con guantes en látex manga larga (Figura 1) y los pies con bota larga de caucho (Figura 2).

Figura 1. Guante de látex



Figura 2. Bota de caucho

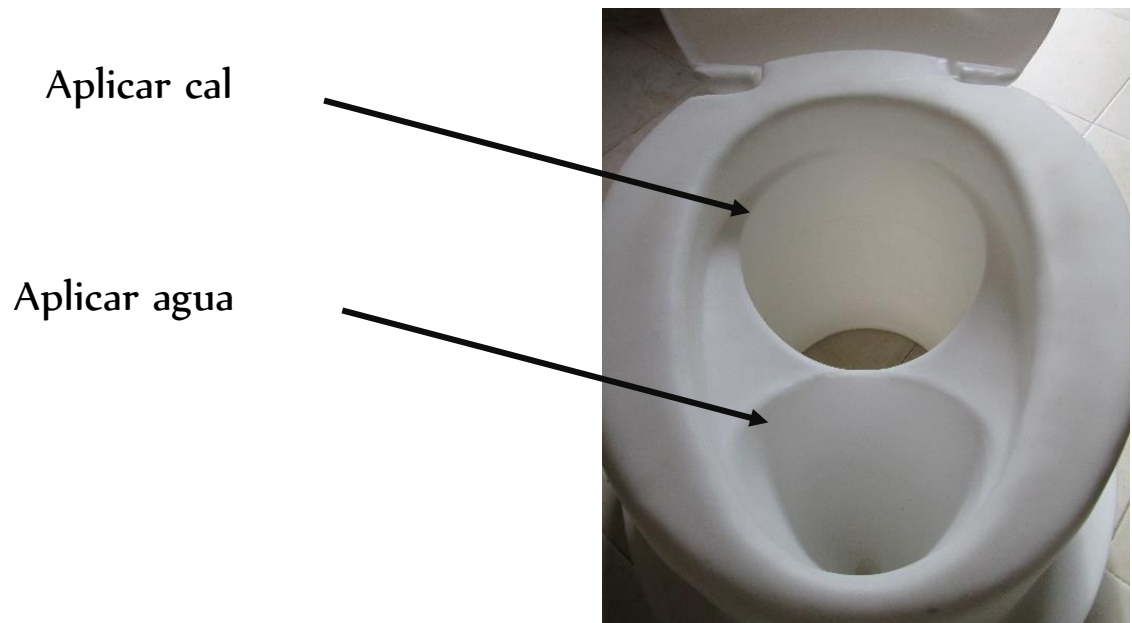


## *2. Operación del sistema*

### *2.1 Operación del sanitario seco*

La operación del sanitario seco es simple, consiste en aplicar una tasada de cal (250 g aproximadamente) a las heces cada que se depositen y agua lluvia recolectada al orificio de orina para limpiar el inodoro (Figura 3).

Figura 3. Compartimientos del inodoro seco



## 2.2 Operación del biodigestor

La alimentación del biodigestor se realiza diluyendo uniformemente 20 litros de heces frescas con igual cantidad de agua lluvia en el tanque de carga, es necesario bloquear con un tapón de bolsa plástica el orificio del tanque para poder realizar la mezcla de manera adecuada, posteriormente se retira para dejar pasar el material hacia la geomembrana (Figura 4).

Para mezclar se puede usar una pala, el agua y las heces se miden en un balde de capacidad conocida.

Figura 4. Preparación de material para el biodigestor



La extracción del fertilizante líquido (Figura 5) se va dando en la medida que es alimentado el biodigestor, se deposita en su

respectivo tanque y debe ser tapado para evitar la evaporación de nutrientes.

Figura 5. Extracción del fertilizante líquido



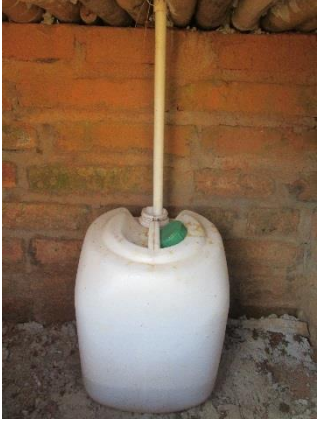


### *3. Mantenimiento del sistema*

En la Tabla 1 se describen las labores de mantenimiento del sistema y la frecuencia con la que se deben realizar.


Tabla 1. Mantenimiento del sistema

<p><b>Actividad:</b> limpieza de la cámara de heces</p> <p><b>Frecuencia:</b> cada 3 meses</p>	
<p><b>Actividad:</b> accionamiento del empujador de heces</p> <p><b>Frecuencia:</b> cada semana</p>	
<p><b>Actividad:</b> limpieza del empujador de heces</p> <p><b>Frecuencia:</b> cada vez que se limpie la cámara de heces</p>	

*Continúa Tabla 1*

<p><b>Actividad:</b> cambio del recipiente recolector de orina</p> <p><b>Frecuencia:</b> cada 2 semanas tapar y almacenar</p>	
<p><b>Actividad:</b> drenaje y limpieza de la geomembrana</p> <p><b>Frecuencia:</b> cada año</p>	
<p><b>Actividad:</b> apertura y drenaje de la trampa de agua</p> <p><b>Frecuencia:</b> cada mes</p>	

*Continúa Tabla 1*

<p><b>Actividad:</b> cambio de hilos de hierro en el filtro de H<sub>2</sub>S</p> <p><b>Frecuencia:</b> cada 3 meses</p>	
--	--

## *4. Recomendaciones*

### *4.1 Aprovechamiento de los productos*

#### *Consumo de biogás*

Para optimizar el biogás disponible se aconseja:

- Cocinar con poca agua, en ollas de base plana y tamaño similar al de la parrilla de la estufa
- Mantener la olla tapada durante la cocción

- Encender la estufa cuando la olla ya se encuentre sobre la parrilla

### *Consumo de fertilizante*

En la Tabla 2 se resume la composición aproximada en nitrógeno, fósforo y potasio de los fertilizantes.

Tabla 2. Fertilizantes

	<b>Nitrógeno</b>	<b>Fósforo</b>	<b>Potasio</b>
Fertilizante líquido (biodigestor)	0.440 g/l	0.204 g/l	0.749 g/l
Orina humana	14 g/l	1 g/l	5 g/l
Heces humanas deshidratadas	18 g/Kg	3 g/Kg	44 g/Kg

Adicional a la lombrinaza que se ha venido aplicando es necesario aplicar anualmente a cada árbol:

200 g de nitrógeno

50 g de fósforo

100 g de potasio

Para cubrir estos requerimientos por árbol, se sugiere aplicar lo siguiente:

100 litros de fertilizante líquido del biodigestor

12 litros de orina

6 Kg de heces deshidratadas (época de lluvia)

## 4.2 Seguridad

- Evite manipular los productos sin los elementos de protección recomendados
- Mantenga ventilado el lugar donde utiliza la estufa
- Evite inhalar el biogás
- Mantenga cerrada la válvula de bola previa al filtro de H<sub>2</sub>S y las perillas de la estufa cuando no se encuentren operando
- Evite excavar en la zona demarcada, se encuentra enterrada la línea de transporte del biogás
- No encienda fuego cerca de la geomembrana
- Mantenga siempre con agua limpia la válvula de seguridad
- Verifique que la válvula globo entre la geomembrana y la válvula de seguridad siempre esté abierta
- Aleje de la geomembrana objetos punzantes potencialmente peligrosos.
- Aleje los animales domésticos
- No permita que los niños jueguen con los elementos del sistema