



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE
RESIDUOS ALIMENTICIOS Y SU FACTIBILIDAD PARA SUPLIR LA CARGA DE
REFRIGERACIÓN DE UN SUPERMERCADO DE CADENA EN CALI,
COLOMBIA**

JUAN MANUEL VALENCIA GARCIA

CRISTIAN CAMILO SANDOVAL SERNA

Programa de Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Pontificia Universidad Javeriana

Santiago de Cali, Colombia

2026

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE
RESIDUOS ALIMENTICIOS Y SU FACTIBILIDAD PARA SUPLIR LA CARGA DE
REFRIGERACIÓN DE UN SUPERMERCADO DE CADENA EN CALI,
COLOMBIA**

JUAN MANUEL VALENCIA GARCIA

CRISTIAN CAMILO SANDOVAL SERNA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Mecánico

Director:

PhD, Ingeniero, Jose Luis Gerardo Ramírez Duque

Codirector:

Ingeniero, Juan Camilo Acosta Sanchez

Programa de Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Pontificia Universidad Javeriana

Santiago de Cali, Colombia

2026

DECLARACION DE OBRA ORIGINAL

Nosotros declaramos lo siguiente:

Hemos leído el Acuerdo 535 de 2010 del Consejo Directivo de la Pontifica Universidad Javeriana. «Política de Propiedad Intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Este anteproyecto representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en este anteproyecto, hemos realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

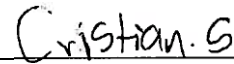
Hemos obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, hemos sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Juan Manuel Valencia

Fecha 20/01/2026



Cristian Camilo Sandoval

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra más profunda gratitud a las personas e instituciones que acompañaron y fortalecieron este proceso académico y personal.

En primer lugar, a nuestros padres, pilares fundamentales de nuestras vidas. Su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios han sido el motor que nos impulsó a perseverar en los momentos de mayor desafío; este logro es, ante todo, el fruto de su confianza.

Un agradecimiento especial a la empresa Surtifamiliar, por recibirnos con generosidad y permitirnos desarrollar esta investigación en un entorno real. Valoramos profundamente el tiempo, los recursos y el conocimiento compartido, elementos esenciales para el éxito de este trabajo.

Asimismo, manifestamos nuestro reconocimiento a los docentes de la Pontificia Universidad Javeriana, seccional Cali. Su dedicación y sabiduría guiaron nuestro camino; gracias por la paciencia en la corrección y por exigirnos siempre la excelencia. Cada lección fue determinante en nuestra formación integral.

De igual manera, agradecemos al Laboratorio de Investigaciones Ambientales (LIA) por el respaldo técnico y el acceso a sus instalaciones. Su apoyo fue decisivo para alcanzar la rigurosidad y calidad que esta investigación demandaba.

Finalmente, agradecemos a quienes, de manera directa o indirecta, nos brindaron una palabra de aliento o compartieron su experiencia. Este logro es compartido y refleja el esfuerzo colectivo de todos aquellos que creyeron en nosotros.

RESUMEN

Colombia ha enfrentado serios desafíos relacionados con el desperdicio de alimentos, la emisión de gases de efecto invernadero y problemas sanitarios derivados de la acumulación de residuos alimenticios, especialmente provenientes del comercio minorista. En respuesta a esta problemática, el país ha iniciado la búsqueda de fuentes de energía renovables y sostenibles que contribuyan a mitigar estos impactos ambientales y sociales.

En este proyecto se diseñó un sistema de refrigeración por absorción, alimentado por biogás generado a partir de la biomasa de residuos alimenticios recolectados en un supermercado de cadena ubicado en la ciudad de Cali. El biogás, producido mediante un biodigestor, fue evaluado como fuente de energía renovable, considerando su potencial para reducir los costos asociados al manejo de desperdicios y su capacidad para sustituir fuentes convencionales de energía.

Durante el desarrollo del proyecto, se identificó que con los productos analizados se necesitan aproximadamente 133 kg de residuos orgánicos diarios para satisfacer la necesidad energética de una cava de refrigeración idéntica en tamaño y funcionalidad a la actualmente usada por la sede alameda del supermercado Surtifamiliar. Posteriormente, se seleccionó un chiller de refrigeración por absorción, y finalmente se determinó que la capacidad de refrigeración alcanzada puede llegar a ser mayor a 6,8 kW de refrigeración utilizando el biogás como fuente energética principal. Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad técnica del sistema propuesto y su contribución a la valorización de residuos orgánicos, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: Refrigeración por absorción, biogás, valorización de residuos sólidos, gestión de residuos sólidos, gases de efecto invernadero, Energías renovables.

ABSTRACT

Colombia has faced significant challenges concerning food waste, greenhouse gas emissions, and sanitary issues arising from the accumulation of food residues, particularly within the retail sector. In response to these problems, the country has begun exploring renewable and sustainable energy sources to mitigate these environmental and social impacts.

This project involves the design of an absorption refrigeration system powered by biogas, which is generated from food waste biomass collected from a retail supermarket chain in Cali. The biogas, produced through a biodigester, was evaluated as a renewable energy source, considering its potential to reduce waste management costs and its capacity to replace conventional energy sources.

During the development of the project, it was identified that approximately 133 kg of daily organic waste is required to meet the energy demands of a cold storage room identical in size and functionality to the one currently used by the Alameda branch of the Surtifamiliar supermarket. Subsequently, an absorption chiller was selected, and it was determined that the cooling capacity achieved can exceed 6.8 kW using biogas as the primary energy source. The results demonstrated the technical feasibility of the proposed system and its contribution to organic waste recovery, energy efficiency, and environmental sustainability.

Keywords: Biogas, pH control, solid waste management, greenhouse gases, biofertilizers.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. ANTECEDENTES	1948
3.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO EN TIQUIPAYA, BOLIVIA	1948
3.2. PROPUESTA DE BIODIGESTOR ANAEROBIO PARA RESIDUOS ORGÁNICOS EN BUENAVENTURA, COLOMBIA.....	2048
4 MARCO TEÓRICO.....	2148
4.1 AREA DE ESTUDIO.....	2148
4.2 DIGESTIÓN ANAERÓBICA	2348
4.2.1 Hidrólisis	2348
4.2.2 Acidogénesis	2348
4.2.3 Acetogénesis	2448
4.2.4 Metanogénesis	2448
4.3 BIOGÁS.....	2448
4.4 PARÁMETROS	2548
4.4.1 Temperatura	2548
4.4.2 pH.....	2648
4.4.2.1 Ajuste mediante la alimentación del sistema.	2748
4.4.2.2 Ajuste mediante adición de compuestos químicos.....	2748
4.4.3 Relación Carbono Nitrógeno	2748
4.4.4 Tasa de carga orgánica	2948
4.4.5 Tiempo de retención hidráulico	2948
4.4.6 Ácidos volátiles	3048
4.4.7 Régimen de alimentación	3048
4.4.7.1 Régimen continuo.	3048
4.4.7.2 Régimen semicontinuo o fed-batch.....	3048
4.4.7.3 Régimen discontinuo o batch.....	3048
4.5 TIPOS DE BIODIGESTORES	3148
1.5.1. Biodigestor de dosel flotante.....	3148
1.5.2. Biodigestor de domo fijo	3248

1.5.3.	<i>Biodigestor Taiwanés</i>	3248
4.6	SISTEMAS DE PURIFICACIÓN	3348
4.6.1	<i>Purificación por adsorción por oscilación de presión</i>	3348
4.6.2	<i>Purificación por absorción con agua</i>	3448
4.6.3	<i>Purificación por absorción química</i>	3448
4.7	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	3548
4.7.1	<i>Conservación de alimentos por refrigeración</i>	3548
4.7.2	<i>Ciclo de refrigeración por absorción</i>	3648
4.7.3	<i>Partes esenciales del ciclo de absorción</i>	3748
4.7.3.1	Generador	3748
4.7.3.2	Absorbedor	3848
4.7.3.3	Condensador	3848
4.7.3.4	Válvula de expansión.....	3948
4.7.3.5	Evaporador.....	3948
4.7.3.6	Bomba.....	4048
4.7.4	<i>Tipos de refrigerante</i>	4048
4.7.4.1	Amoniaco – Agua (NH₃ – H₂O).....	4048
4.7.4.2	Agua – Bromuro de litio (H₂O – LiBr).....	4148
4.7.4.3	Agua – Cloruro de litio (H₂O – LiCl).....	4148
4.7.5	<i>Configuración Amoniaco-Agua (NH₃ – H₂O)</i>	4148
4.7.5.1	Ciclo absorbedor	4248
4.7.5.2	Ciclo refrigerante.....	4248
4.8	FERTILIZANTES.....	4348
4.8.1	<i>Tipos de fertilizantes</i>	4348
4.8.1.1	Fertilizantes inorgánicos o sintéticos	4348
4.8.1.2	Fertilizantes orgánicos	4448
4.8.1.3	Biofertilizantes.....	4448
4.8.1.4	Fertilizantes de liberación controlada	4448
4.8.2	<i>Digestato como fertilizante orgánico</i>	4548
4.8.2.1	Fracción líquida	4548
4.8.2.2	Fracción sólida.....	4548
5.	ESTADO DEL ARTE	4720
5.1.	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS ALIMENTICIOS	4720
5.2.	GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN HORAS DE PUNTA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DE CAMALOTE.....	4820

5.3.	EVALUACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON DESECHOS AVÍCOLAS Y BOVINOS PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA	4920
6.	MARCO LEGAL	5021
7.	OBJETIVOS	5526
7.1.	OBJETIVO GENERAL.....	5526
7.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5526
8.	METODOLOGIA.....	5627
8.1.	ESTABLECER TEÓRICAMENTE LA COMPOSICIÓN OPTIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS DESECHOS ALIMENTICIOS DISPONIBLES.....	5627
8.1.1.	<i>Cuantificación de biomasa.....</i>	<i>5627</i>
8.1.2.	<i>Recolección de datos y estimación del potencial de generación de biogás</i>	<i>5627</i>
8.1.3.	<i>Análisis y discusión de resultados.....</i>	<i>5728</i>
8.2.	DEFINIR LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN ALIMENTADO MEDIANTE EL CALOR SUMINISTRADO POR EL BIORREACTOR	5728
8.2.1.	<i>Selección del sistema de refrigeración.....</i>	<i>5728</i>
8.3.	DETERMINAR LA CAPACIDAD DE REFRIGERACIÓN QUE SE PUEDE PRODUCIR POR MEDIO DEL BIOGÁS Y EVALUAR LA FACTIBILIDAD DEL DESARROLLO DEL DISEÑO.....	5829
8.3.1.	<i>Capacidad de producción</i>	<i>5829</i>
8.3.2.	<i>Factibilidad del desarrollo del diseño</i>	<i>5930</i>
9.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	6031
9.1.	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y METANO	6031
9.1.1.	<i>Cuantificación de la biomasa</i>	<i>6031</i>
9.1.2.	<i>Recolección y preparación de muestras.....</i>	<i>6334</i>
9.1.2.1.	Procedimiento de análisis de muestras.....	6435
9.1.2.2.	Determinación de humedad	6536
9.1.2.3.	Determinación de cenizas	6536
9.1.2.4.	Cuantificación de nutrientes	6536
9.1.2.5.	Determinación fosforo y azufre	6637
9.1.3.	<i>Caracterización de la biomasa</i>	<i>6839</i>
9.1.3.1.	Relación Carbono-Nitrógeno	7142
9.1.3.2.	Humedad general	7243
9.1.3.3.	pH	7546
9.1.4.	<i>Potencial teórico de producción de biogás y metano</i>	<i>7546</i>
9.1.4.1.	Producción teórica de biogás – Escenario 1.....	7647

9.1.4.2.	Producción teórica de biogás – Escenario 2.....	7647
9.1.4.3.	Producción teórica de biogás – Escenario 3.....	7748
9.1.4.4.	Energía disponible a partir del metano teórico.....	7849
9.2.	CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS	7849
9.2.1.	<i>Ganancia de calor por paredes.....</i>	7950
9.2.2.	<i>Ganancia de calor por el piso.....</i>	8354
9.2.3.	<i>Ganancia de calor por el techo.....</i>	8556
9.2.4.	<i>Ganancia de calor por cambio en el aire.....</i>	8657
9.2.5.	<i>Carga debida al producto</i>	8758
9.2.5.1.	Carga debido al cambio de temperatura	8758
9.2.5.2.	Carga debido al calor de respiración	9162
9.2.6.	<i>Cargas suplementarias.....</i>	9869
9.2.6.1.	Iluminación eléctrica.....	9869
9.2.6.2.	Motores eléctricos.....	9869
9.2.6.3.	Carga por personas.....	9970
9.2.7.	<i>Carga de refrigeración total</i>	10071
9.3.	ANÁLISIS TERMODINÁMICO	10172
9.3.1.	<i>Cálculo de metano</i>	10273
9.3.2.	<i>Cálculo de cantidad de amoniaco.....</i>	10374
9.4.	DISEÑO DEL BIODIGESTOR	10576
9.4.1.	<i>Criterios de diseño.....</i>	10576
9.4.2.	<i>Producción esperada de biogás</i>	10576
9.4.3.	<i>Parámetros operativos</i>	10677
9.4.4.	<i>Cálculo del caudal de alimentación.....</i>	10677
9.4.5.	<i>Estimación del volumen de mezcla</i>	10677
9.4.6.	<i>Volumen mínimo del biodigestor.....</i>	10778
9.4.7.	<i>Propuesta de biodigestor</i>	10778
10.	COMERCIALIZACIÓN DEL FERTILIZANTE	10879
10.1.	TIPOS DE DIGESTATO.....	10980
10.1.1.	<i>Digestato liquido.....</i>	10980
10.1.1.1.	Características.....	10980
10.1.1.2.	Usos	10980
10.1.2.	<i>Digestato solido</i>	10980
10.1.2.1.	Características.....	10980
10.1.2.2.	Usos	10980
10.2.	CALIDAD DEL FERTILIZANTE.....	11081

10.3.	PRODUCCIÓN DE DIGESTATO POR ESCENARIO	11182
10.4.	RIESGOS	11283
10.4.1.	<i>Riesgos en la producción del digestato</i>	11283
10.4.1.1.	Riesgos sanitarios asociados al digestato sin tratamiento adicional	11283
10.4.1.2.	Riesgos agronómicos por alta concentración de nitrógeno amoniacal en el digestato	11283
10.4.1.3.	Impactos ambientales y perceptivos por el mal manejo del digestato	11384
10.4.1.4.	Problemas de almacenamiento	11384
10.4.2.	<i>Riesgos en el uso agrícola</i>	11485
10.4.2.1.	Riesgos de salinización y contaminación por uso inadecuado del digestato	11485
10.4.2.2.	Compatibilidad con cultivos	11485
10.4.3.	<i>Riesgos comerciales</i>	11586
10.4.3.1.	Percepción del consumidor	11586
10.4.3.2.	Competencia con fertilizantes químicos	11586
10.4.3.3.	Logística y distribución	11586
11.	PLAN COMERCIAL	11687
11.1.	PRODUCTO, TIPOS Y PRESENTACIONES	11687
11.2.	PRODUCCIÓN Y LOGÍSTICA	11788
11.3.	ESTRATEGIA DE MARKETING EN SURTIFAMILIAR	11788
11.4.	PROYECCIÓN DE VENTAS POTENCIALES	11788
11.5.	DOCUMENTACIÓN Y LEGALIZACIÓN	11889
12.	RESERVORIO SURTIFAMILIAR	11990
12.1.	MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL RESERVORIO	12091
12.1.1.	<i>Digestato liquido</i>	12091
12.1.2.	<i>Digestato solido</i>	12091
12.1.3.	<i>Residuos del proceso y elementos</i>	12192
12.2.	CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO PARA GARANTIZAR LA VIDA ÚTIL DEL DIGESTATO	12192
12.2.1.	<i>Digestato liquido</i>	12192
12.2.2.	<i>Digestato solido</i>	12293
12.3.	TIEMPO DE CONSERVACIÓN Y CANTIDAD TOTAL PARA ALMACENAR	12293
12.3.1.	<i>Digestato liquido</i>	12293
12.3.2.	<i>Digestato solido</i>	12394
12.3.3.	<i>Cantidad total requerida para almacenamiento</i>	12394
12.3.3.1.	Digestato liquido	12394
12.3.3.2.	Digestato solido	12394
12.3.3.3.	Residuos del proceso y elementos operativos	12394
12.4.	CALIDAD DE LOS PRODUCTOS ALMACENADOS	12495

12.5.	COSTOS ESTIMADOS	12596
13.	PROPUESTA DE VALOR.....	12798
13.1.	FACTIBILIDAD DEL DISEÑO	12798
13.1.1.	<i>Factibilidad técnica</i>	12798
13.1.2.	<i>Caracterización de los residuos alimenticios.....</i>	12798
13.1.3.	<i>Producción del biogás.....</i>	12798
13.1.4.	<i>Conversión de energía térmica</i>	12899
13.1.5.	<i>Sistema completo</i>	12899
13.2.	FACTIBILIDAD ECONÓMICA	12899
13.2.1.	<i>Inversión inicial</i>	12899
13.2.2.	<i>Costos operativos y mantenimiento</i>	12899
13.2.3.	<i>Beneficios económicos</i>	129100
13.2.4.	<i>Análisis financieros</i>	129100
13.3.	FACTIBILIDAD AMBIENTAL	129100
13.3.1.	<i>Reducción de residuos orgánicos</i>	129100
13.3.2.	<i>Sustitución de fuentes de energía</i>	129100
13.3.3.	<i>Aprovechamiento del digestato</i>	129100
13.3.4.	<i>Impacto en la huella ecológica del supermercado</i>	129100
13.4.	MATRIZ COSTO-BENEFICIO	130101
13.4.1.	<i>Equipo propuesto</i>	130101
14.	CONCLUSIONES.....	139110
15.	RESTRICCIONES.....	141112
15.1.	ESPACIO.....	141112
15.2.	RECURSOS	141112
15.3.	CANTIDAD	141112
15.4.	COSTOS	141112
15.5.	CARACTERIZACIÓN.....	141112
15.6.	SEGURIDAD	141112
15.7.	MANTENIMIENTO	142113
15.8.	CALIDAD	142113
16.	BIBLIOGRAFÍA.....	143114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de localización de Cali en Colombia.	22
------------------	---	-----------

Figura 2. Biodigestor tipo dosel flotante.....	31
Figura 3. Biodigestor tipo domo fijo.....	32
Figura 4. Biodigestor tipo Taiwanés.	33
Figura 5. Diagrama del generador en el ciclo de absorción.....	37
Figura 6. Diagrama de absorbedor en el ciclo de absorción.	38
Figura 7. Diagrama de condensador en el ciclo de absorción.....	39
Figura 8. Refrigerantes comúnmente usados en un sistema de refrigeración por absorción.	40
Figura 9. Esquema del sistema amoniaco-agua.	42
Figura 10. Muestras de biomasa vegetal para análisis en laboratorio.....	64
Figura 11. Toma de muestras.	70
Figura 12. Medición de pH.	71
Figura 13. Diseño reservorio Surtifamiliar	126
Figura 14. Gas absorption Chiller (GA ACF TK-ROBUR).....	130

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores medios según el sustrato de alimentación del proceso	25
Tabla 2. Intervalos de temperatura según las bacterias que viven en estos rangos	26
Tabla 3. Rangos de temperatura recomendados para la conservación de alimentos	36
Tabla 4. Normativas, requisitos técnicos y de calidad que rigen el uso de biodigestores, sus productos y subproductos.....	51
Tabla 5. Cantidad anual de desechos orgánicos por producto.....	61
Tabla 6. Distribución mensual de desechos orgánicos	62
Tabla 7. Escenarios comparativos de generación mensual de desechos	63
Tabla 8. Resultados generales obtenidos del laboratorio	67
Tabla 9. Resumen caracterización de los productos.....	70
Tabla 10. Escenarios de producción estimada de biogas y metano según masa diaria	78
Tabla 11. Propiedades térmicas y espesores de las capas de material	84
Tabla 12. Propiedades térmicas y condiciones iniciales de frutas y verduras para cálculo de carga térmica	88

Tabla 13. Resultados cambio por temperatura	90
Tabla 14. Parámetros de respiración y energía térmica de frutas y verduras	92
Tabla 15. Calor de respiración frutas y verduras.....	97
Tabla 16. Carga de refrigeración total	101
Tabla 17. Calculo de la producción diaria de biogás y metano según masa y rendimiento de los sustratos.	105
Tabla 18. Masa, densidad y volumen diario de los componentes del sustrato para el biodigestor.	106
Tabla 19. Parámetros químicos para un sustrato o suelo optimo	110
Tabla 20. Balance de masa del digestato por escenario diario	111
Tabla 21. Estructura de precios por formato y presentación de fertilizantes	116
Tabla 22. Estimación de ingresos por comercialización de subproductos del biodigestor	118
Tabla 23. Estimación de costos de infraestructura complementaria para el sistema de biodigestión.....	125
Tabla 24. Datos relevantes de la ficha técnica.....	131
Tabla 25. Matriz costo de generación de frio	133
Tabla 26. Costo de producción de biogás.....	134
Tabla 27. Costos de producción de fertilizante y abono.....	135
Tabla 28. Costos operacionales del proyecto	136
Tabla 29. Resumen de costos primer año	137
Tabla 30. Beneficios económicos.....	137
Tabla 31. Matriz Costo/Beneficio	138

INTRODUCCIÓN

La pérdida y el desperdicio de alimentos representan una de las principales problemáticas ambientales a nivel global. Según el informe *Driven to Waste* de la World Wildlife Fund (WWF) de agosto del 2021, aproximadamente el 40% de los alimentos producidos en el mundo no son consumidos, lo que contribuye con cerca del 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Esta situación se traduce en más de 2.500 millones de toneladas de alimentos perdidos o desperdiciados cada año, afectando directamente la seguridad alimentaria, el uso de recursos naturales y el cambio climático [1].

En Colombia, el sector del comercio minorista genera aproximadamente 90.000 toneladas de desperdicios alimenticios anuales, según el Censo de Mermas 2015 realizado por FENALCO [2]. En el Valle del Cauca, la gestión de residuos ha enfrentado serias deficiencias, evidenciadas por el cierre del basurero de Navarro, el cual superó su capacidad de almacenamiento y presentó bajos niveles de separación de residuos [3]. Actualmente, los residuos se disponen en el relleno sanitario Colomba–El Guabal, ubicado en el municipio de Yotoco, que recibe más de 3.200 toneladas diarias de residuos sólidos. Este vertedero ha sido objeto de múltiples sanciones por parte de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) debido a incumplimientos ambientales, como el manejo inadecuado de lixiviados y la afectación de cuerpos de agua cercanos [4].

Frente a esta problemática, se planteó la implementación de sistemas anaerobios mediante biodigestores como alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos. Estos sistemas permiten la producción de biogás —compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), así como fertilizantes líquidos y sólidos. La digestión anaerobia se desarrolla en ausencia de oxígeno y comprende cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [5]. Este proceso no solo contribuye a la valorización de residuos, sino que también reduce los costos asociados a su disposición final y las emisiones derivadas del transporte.

En este contexto, la cadena de supermercados Surtifamiliar patrocinó la presente investigación con el objetivo de encontrar una solución sostenible para el manejo de los

residuos orgánicos generados en su área de frutas y verduras, los cuales alcanzan un volumen aproximado de 23 toneladas mensuales en todas sus sedes. Dado el potencial energético del biogás producido a partir de estos residuos, se evaluó su uso como fuente de energía para la implementación de un sistema de refrigeración.

Para ello, se seleccionó el sistema de refrigeración por absorción, una tecnología desarrollada en la década de 1860, que opera mediante fenómenos de transferencia de calor y requiere un bajo trabajo mecánico. Está compuesto por elementos como generador, condensador y evaporador, cuya configuración puede variar según el diseño específico [6].

Durante el desarrollo del proyecto, se realizó la caracterización de los residuos alimenticios, agrupándolos según su pH interno, excluyendo aquellos con pH ácido para optimizar el funcionamiento del biodigestor. Con base en teorías y estudios previos, se definieron configuraciones que permitieran la mayor producción posible de biogás. Posteriormente, se diseñó el sistema de refrigeración, se calculó la producción de calor a partir del biogás, y finalmente se evaluó la viabilidad técnica y energética del sistema propuesto.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con el World Wildlife Fund (WWF), aproximadamente el 40 % de los alimentos producidos a nivel mundial no se consumen según lo reportado en el año 2021 Representando cerca del 10 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Esto equivale a 2.100 millones de toneladas de alimentos desperdiciados anualmente [7].

En Colombia, la Federación Nacional de Comerciantes (Fenalco) reportó en su décimo tercer censo nacional de mermas (2015) que el comercio minorista genera alrededor de 90.000 toneladas de desechos alimenticios cada año. Este fenómeno no solo implica pérdidas económicas, sino también problemas ambientales y sanitarios, debido a la generación de GEI y la acumulación de residuos en vertederos que incluyen desechos orgánicos, plásticos y metales [8]. En el Valle del Cauca, la situación se ha agravado desde el cierre del basurero de Navarro en 2008, que dio paso al uso del relleno sanitario en Yotoco. La falta de gestión eficiente ha incrementado los impactos negativos en las comunidades cercanas [9].

Una investigación patrocinada por la cadena de supermercados Surtifamiliar evidenció que, durante el año 2023, sus 13 sucursales generaron aproximadamente 23,06 toneladas mensuales de residuos orgánicos, principalmente asociados a alimentos no comercializados. El estudio también identificó que los sistemas de refrigeración representan cerca del 60 % del consumo energético total de las tiendas, lo que incrementa de manera significativa los costos operativos, especialmente si se considera que una fracción considerable de los productos refrigerados termina siendo desechada como residuo orgánico [10].

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible cubrir total o parcialmente la carga de refrigeración de un supermercado de cadena en Cali, Colombia, mediante el biogás producido a partir de residuos alimenticios, según su potencial de producción y factibilidad técnica?

2. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, el incremento de los desafíos ambientales asociados a la gestión inadecuada de residuos orgánicos y al alto consumo energético en el sector comercial ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles basadas en el aprovechamiento energético de residuos. A nivel global, aproximadamente un tercio de los alimentos producidos para consumo humano se pierde o desperdicia, generando impactos ambientales significativos, especialmente por la emisión de metano en rellenos sanitarios [11]. En este contexto, los supermercados representan un eslabón crítico dentro de la cadena de suministro, debido a su elevada generación de residuos alimenticios y su alta demanda energética.

El sector retail presenta una oportunidad estratégica para la implementación de sistemas de valorización energética, ya que la refrigeración constituye uno de los principales consumos eléctricos en supermercados, representando entre el 40 % y 60 % del consumo total de energía eléctrica [12]. Esta alta demanda energética, combinada con la generación constante de residuos orgánicos, configura un escenario propicio para la integración de tecnologías como la digestión anaerobia, la cual permite convertir residuos alimenticios en biogás con alto contenido de metano, utilizable como fuente de energía renovable [13].

En Colombia, y específicamente en ciudades como Cali, el crecimiento del sector comercial ha incrementado tanto la generación de residuos sólidos como la demanda energética. No obstante, gran parte de los residuos orgánicos continúan siendo dispuestos en rellenos sanitarios sin aprovechamiento energético, desaprovechando su potencial como recurso dentro de un modelo de economía circular. En este sentido, evaluar la viabilidad técnico-energética del aprovechamiento de residuos alimenticios para suplir parcialmente la carga de refrigeración de un supermercado de cadena representa una alternativa innovadora con potencial impacto ambiental, económico y social.

3. ANTECEDENTES

3.1. Diseño e implementación de un biodigestor anaerobio en Tiquipaya, Bolivia

En el estudio titulado “Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia)” se presenta el diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio en el mercado de Tiquipaya, Bolivia, con el objetivo de reducir la cantidad de residuos orgánicos generados y producir biogás para uso doméstico y comunitario.

La metodología empleada en este trabajo se dividió en tres fases principales: la caracterización del sustrato, el diseño y construcción del biodigestor, y la puesta en marcha y monitoreo del sistema. En la primera fase, se realizó una caracterización física, química y biológica del sustrato utilizado para alimentar el biodigestor. Se midió la densidad, la composición química y el potencial de producción de metano del sustrato, y se compararon los resultados con los valores de la literatura. En la segunda fase, se diseñó y construyó un biodigestor anaerobio de tipo tubular, utilizando materiales de bajo costo y fácil acceso en la región. Se realizaron pruebas de hermeticidad y se ajustaron los parámetros de diseño para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema. En la tercera fase, se puso en marcha el biodigestor y se monitoreó su desempeño durante un período de seis meses. Se midieron los parámetros de producción de biogás, la calidad del efluente y la estabilidad del proceso, y se realizaron ajustes y mejoras en el sistema según fuera necesario.

Para el monitoreo del biodigestor, se establecieron diferentes protocolos de medición y análisis. Se midió la producción diaria de biogás utilizando un medidor de flujo, y se registraron los valores de temperatura, pH y concentración de sólidos en el efluente. Se tomaron muestras periódicas del efluente para analizar la concentración de nutrientes y la presencia de patógenos. Además, se realizaron pruebas de carga orgánica y de choque térmico para evaluar la capacidad del sistema para adaptarse a diferentes condiciones de operación. Los resultados obtenidos se compararon con los valores de referencia de la literatura y se utilizaron para ajustar los parámetros de operación del biodigestor.

En conclusión, el presente trabajo demostró que la tecnología de biodigestores anaerobios de bajo costo es una opción viable y sostenible para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos en zonas rurales y periurbanas de Bolivia. La implementación del biodigestor Natural S4 Loop permitió reducir significativamente la cantidad de residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya y producir biogás de alta calidad para uso doméstico y comunitario.

Los resultados obtenidos en la caracterización del sustrato, el diseño y construcción del biodigestor, y la puesta en marcha y monitoreo del sistema, permitieron identificar los principales factores que influyen en el desempeño del sistema y mejorar su eficiencia y sostenibilidad. Además, se demostró que la tecnología de biodigestores anaerobios puede ser adaptada a diferentes contextos y necesidades, y contribuir a la reducción de la huella de carbono y la promoción de prácticas sostenibles de gestión de residuos [14].

3.2. Propuesta de biodigestor anaerobio para residuos orgánicos en Buenaventura, Colombia

En este proyecto de grado titulado “Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto “La Villa Solar” ubicado en la ciudad de Buenaventura- Colombia” se propone el diseño de un biodigestor anaerobio para aprovechar los residuos sólidos orgánicos. El objetivo es producir biogás para ser utilizado en actividades de cocción en zonas comunes, promoviendo la economía circular y la generación de energía sostenible.

El trabajo se divide en tres fases, en la primera se realizó un análisis detallado de los factores que influyen en el desarrollo del proyecto de la Villa Solar, como las características de la zona y la distribución de viviendas. También se identifican documentos importantes, como el plan de gestión de residuos sólidos de la región. En la segunda, se establecieron los lineamientos claros y precisos del proyecto, incluyendo los objetivos y el alcance de este. Se busca beneficiar a la población que habitará las viviendas de la Villa Solar. Y, por último, se plantea el diseño metodológico para aprovechar los residuos sólidos orgánicos generados por la población beneficiaria. Se realizan pruebas experimentales con diferentes mezclas de residuos y se evaluaron los resultados obtenidos, como la producción de biogás y la eficiencia del sistema.

El presente estudio tenía por objeto explorar la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, concretamente de cáscara de plátano, cáscara de yuca y cáscara de papa. Se realizaron tres pruebas diferentes, cada una con distintas composiciones de residuos orgánicos y un inóculo de estiércol de cerdo. Los resultados mostraron que la segunda prueba tuvo la mayor producción de biogás, lo que indica su eficiencia en el proceso de digestión anaerobia. Además, el análisis microbiológico reveló la presencia de bacilos Gram negativos, cocos Gram positivos y bacilos formadores de esporas en las muestras. Estos microorganismos desempeñan un papel crucial en la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás.

A partir de la evaluación de diversos parámetros, como el pH, la disponibilidad de insumos, la eficiencia y la temperatura, se determinó que la primera prueba era la óptima. Demostró un mejor rendimiento en términos de pH y disponibilidad de insumos en comparación con las otras pruebas [15].

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Area de estudio

El área de estudio está definida en el suroccidente colombiano en la ciudad de Cali, Valle del Cauca. Esta ciudad presenta un clima tropical con temperaturas estables durante todo el año. Tiene un promedio de 25°C durante el año con valores mínimo y máximo de 18°C y 33°C respectivamente, su ubicación geográfica como se muestra en la figura 1 y su rico entorno hídrico promueven las precipitaciones con un promedio anual de 890mm y un promedio diario de 5,3 horas de sol. Siendo un lugar óptimo para el desarrollo de la digestión anaerobia deseada, dado que una temperatura estable promoverá el correcto desarrollo de las poblaciones bacterianas de interés [16].



Figura 1. Mapa de localización de Cali en Colombia.
Fuente: Tomada de [17].

4.2 Digestión anaeróbica

La digestión anaerobia (DA) es un proceso controlado que involucra la descomposición de materia orgánica mediante la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. Este proceso comprende una serie de reacciones bioquímicas complejas realizadas por diferentes grupos microbianos, cuyo principal producto es el biogás. El biogás generado está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además de pequeñas fracciones de sulfuro de hidrógeno (H_2S), nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2) y vapor de agua.

Adicionalmente, el proceso produce un subproducto denominado digestato, constituido por residuos líquidos y sólidos ricos en nutrientes, con potencial aplicación como fertilizante. La digestión anaerobia, mediante diversas tecnologías y adaptaciones, permite la transformación de estiércol animal, aguas residuales municipales, desechos de alimentos, residuos de cocina y otros residuos orgánicos en biogás [18].

La digestión anaerobia se desarrolla a través de cuatro etapas principales, descritas a continuación:

4.2.1 Hidrólisis

En esta etapa inicial, los compuestos orgánicos complejos, principalmente carbohidratos, proteínas y lípidos, son descompuestos por la acción de bacterias hidrolíticas. Dichos microorganismos solubilizan la materia orgánica, transformando las estructuras poliméricas en compuestos más simples, como monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga, los cuales pueden ser asimilados en etapas posteriores del proceso [18].

4.2.2 Acidogénesis

Durante la acidogénesis, las bacterias acidogénicas o fermentativas convierten los compuestos orgánicos solubles generados en la etapa anterior en ácidos orgánicos de cadena corta, tales como ácido acético, propiónico y butírico, además de hidrógeno y dióxido de carbono. El control de la concentración de hidrógeno en esta fase es fundamental, ya que influye directamente en el desempeño de las etapas posteriores y en la estabilidad del proceso [18].

4.2.3 Acetogénesis

En la tercera etapa intervienen bacterias acetogénicas, las cuales utilizan como sustrato los ácidos orgánicos y alcoholes provenientes de la acidogénesis para producir acetato, dióxido de carbono e hidrógeno, con pequeñas cantidades de metano. Este proceso requiere un aporte energético, por lo que el mantenimiento de condiciones operativas adecuadas, especialmente la temperatura, resulta determinante para su correcto desarrollo [18].

4.2.4 Metanogénesis

La metanogénesis constituye la etapa final del proceso y es llevada a cabo por bacterias metanogénicas, las cuales se clasifican en dos grupos principales: (1) bacterias metanogénicas acetoclásticas, encargadas de la degradación del ácido acético, y (2) bacterias metanogénicas hidrogenotróficas, responsables de la conversión del hidrógeno y dióxido de carbono en metano. Esta etapa es fundamental, ya que define la producción final de biogás y la eficiencia global de la digestión anaerobia [18].

4.3 Biogás

El biogás es una mezcla de gases formada por metano, en rangos del 40% al 70%, dióxido de carbono, en valores del 30% al 60%, y alrededor de un 1% a 5% de otros gases que incluyen hidrogeno, sulfuro de hidrogeno, oxígeno y nitrógeno molecular. Las características de la composición van a depender del material digerido y la calidad con la que se lleva a lograr el proceso de biodigestión. El potencial calórico inferior es de 5.250 Kcal/m³ para un biogás con 60% de metano, aproximadamente [19]. En la tabla 1 se ejemplifican los valores medios según el sustrato de alimentación del proceso.

Tabla 1. Valores medios según el sustrato de alimentación del proceso

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos municipales	Gas de vertedero
Metano	50 - 80%	50 – 80%	50 – 70%	45 – 60%
Dióxido de carbono	30 - 50%	30 – 50%	30 – 50%	40 – 60%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrogeno	0 – 2%	0 – 2 %	0 – 2%	0 – 0,2%
Sulfuro de hidrogeno	100 – 700 ppm	0 – 8%	0 – 8%	0 – 1%
Amoníaco	Trazas	Trazas	Trazas	0,1 – 1%
Monóxido de carbono	0 – 1%	0 – 1%	0 – 1%	0 – 0,2%
Nitrógeno	0 – 1%	0 – 1%	0 – 1%	2 – 5%
Oxígeno	0 – 1%	0 – 1%	0 – 1%	0,1 -1%

Fuente: Adaptada de [19] [20] [21].

4.4 Parámetros

La estabilidad de la digestión anaerobia y la calidad del biogás resultante están condicionadas por una serie de variables críticas que se detallan a continuación:

4.4.1 Temperatura

La temperatura cumple un rol fundamental en el desarrollo de las propiedades físicas y químicas del sustrato, esto se debe a que afecta directamente las reacciones cinéticas y termodinámicas dentro del reactor. La digestión puede realizarse en rangos de temperaturas que van desde 5°C hasta los 60°C, aunque la producción de metano puede verse afectada en los límites de estos rangos. En la tabla 2 se muestran los tres intervalos de temperatura: psicrófilico, mesófilico y termófilico. Estos adquieren su nombre debido las bacterias que pueden vivir en estos rangos de temperatura.

Tabla 2. Intervalos de temperatura según las bacterias que viven en estos rangos

Ambiente	Temperatura °C	Tiempo de retención (días)
Psicrofílico	<20	>40
Mesofílico	20-45	10-40
Termofílico	45-65	<10

Fuente: Adaptado de [22]

El rango de temperatura termofílica facilita principalmente las primeras dos etapas del proceso de digestión porque incrementa la hidrolización del sustrato haciéndolo más accesible a microorganismos, aumenta la reacción cinética y biológica del proceso, acortando el tiempo de retención del sustrato para la digestión, y mejorar las propiedades que determinan la solubilidad del sustrato. Por otro lado, en etapas posteriores del proceso, presenta efectos negativos debido a que incrementa la producción de gas de amonio, el cual inhibe el correcto desarrollo de los microorganismos y altera la calidad final de la composición, generando una alta acumulación de ácidos grasos de cadena corta, los cuales afectan la producción de metano.

Para el intervalo psicofílico se da la peor solubilización del sustrato inhibiendo el desarrollo de los microorganismos, aunque este rango puede generar metano no es recomendado debido a sus bajos y lentos niveles de producción.

El rango de temperatura mesofílico se considera el rango óptimo para las etapas metanogénicas, en términos de corta duración del proceso, debido al aumento cinético y termodinámico de las propiedades del sustrato, pero manteniendo la estabilidad del proceso. Se recomienda mantener el reactor en temperaturas entre 25°C y 30°C para lograr el desempeño que lleva a un mayor porcentaje de producción de gas metano [18].

4.4.2 pH

El nivel del pH dentro del reactor es importante, ya que se asocia a fenómenos de acidificación y puede afectar negativamente si sale del intervalo óptimo para el desarrollo del proceso, puede inhibir la fermentación e incluso detener su evolución. El intervalo recomendado para los niveles de pH oscila entre los valores de 6,5 y 7,5.

Los niveles de pH varían debido al nivel de concentración (VFA), bicarbonatos, alcalinidad del sistema y CO₂ de la composición. Cuando el valor pH es menor a 5,0, la cantidad de bacterias ácido-génicas aumenta considerablemente, inhibiendo el crecimiento de las deseadas bacterias metanogénicas; mientras que valores de pH mayores a 8,0 generan un entorno toxico para la gran mayoría de los microorganismos, imposibilitando la digestión anaeróbica [19].

Existen dos métodos principales para corregir un desequilibrio en el pH dentro de sistemas de digestión anaerobia.

4.4.2.1 Ajuste mediante la alimentación del sistema. Este método consiste en modificar los insumos orgánicos que ingresan al biodigestor. Para corregir niveles de pH elevados, se recomienda incorporar alimentos como café o materiales ricos en sodio y azúcares. Para elevar un pH bajo, se sugiere introducir vegetales frescos como pepino, espinaca, brócoli, apio y lechuga [23].

4.4.2.2 Ajuste mediante adición de compuestos químicos. Este método implica el uso de sustancias químicas que permiten estabilizar el pH del sistema de forma inmediata. La principal ventaja radica en la rapidez de acción, haciéndolo un método útil en situaciones donde se requiere una corrección urgente para evitar la inhibición del proceso biológico [24] [25].

4.4.3 Relación Carbono Nitrógeno

Toda materia orgánica fresca tiene potencial de generación de biogás ante una fermentación anaeróbica. La calidad y potencial de biogás producido dependerán de la composición química y los nutrientes del residuo utilizado.

El nitrógeno es una de las mayores fuentes de nutrientes para el crecimiento de microorganismos. Se requiere para la síntesis de aminoácidos y proteínas, que en su mayoría se convierten en amonio y dan estabilidad en el pH de la composición ante procesos de acidificación. Si el contenido de nitrógeno es bajo, los microorganismos no podrán desarrollarse del todo manteniendo una población baja, esto generará que requiera más

tiempo la digestión del carbono del sustrato. Para el caso opuesto, ante un alto contenido de nitrógeno, este exceso llevará a la producción de mucho amonio y de esta manera la inhibición del proceso anaeróbico.

La relación carbono/nitrógeno (C/N) es un parámetro fundamental en los procesos de digestión anaerobia, ya que influye directamente en la eficiencia de la actividad microbiana. El carbono actúa como fuente principal de energía para los microorganismos, mientras que el nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas y el crecimiento celular. Un desequilibrio en esta relación puede provocar acumulación de ácidos grasos volátiles o liberación excesiva de amoníaco, afectando negativamente la estabilidad del proceso [26].

Diversos estudios han establecido que una relación C/N óptima para la digestión anaerobia se encuentra generalmente en el rango de 20:1 a 30:1, dependiendo del tipo de sustrato utilizado y de las condiciones operativas del sistema. Una relación inferior a este rango puede generar toxicidad por amoníaco, mientras que una relación superior puede ralentizar la degradación de la materia orgánica debido a la deficiencia de nitrógeno, para la relación carbono nitrógeno que tiene una mezcla se hace uso de la siguiente ecuación [27]:

$$K = \frac{C_1 * Q_1 + C_2 * Q_2 + \dots C_n * Q_n}{N_1 * Q_1 + N_2 * Q_2 + \dots N_n * Q_n} \quad (1)$$

Donde:

- K = relación carbono/nitrógeno resultante de la mezcla.
- C = contenido de carbono orgánico en cada materia prima.
- N = contenido de nitrógeno orgánico en cada materia prima.
- Q = Masa de la materia prima (kg o t)

La aplicación de esta relación matemática permite ajustar las proporciones de carga en el biodigestor cuando se utilizan sustratos con composiciones heterogéneas. Al garantizar que

la mezcla final se aproxime al rango óptimo de 20:1 a 30:1, se asegura un equilibrio entre la biodisponibilidad de energía y la estabilidad del pH, minimizando el riesgo de fallas por acumulación de ácidos o toxicidad por amonio durante la fase metanogénica.

4.4.4 Tasa de carga orgánica

La Tasa de Carga Orgánica (Organic Loading Rate, OLR) es un parámetro operativo fundamental en los sistemas de digestión anaerobia. Se define como la cantidad de materia orgánica (expresada comúnmente en sólidos volátiles o demanda química de oxígeno) que se introduce por unidad de volumen del reactor por día. Este valor depende del tipo de sustrato disponible, el diseño del reactor y la temperatura de operación [28].

Una OLR excesivamente alta puede inhibir la actividad microbiana, especialmente durante las primeras etapas del proceso, como la fermentación ácida. Esto puede provocar una acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), lo que reduce el pH del sistema y obstaculiza la transición hacia las etapas de metanogénesis, disminuyendo así la producción de biogás [29]. Por el contrario, una OLR demasiado baja puede resultar en una alimentación insuficiente para las bacterias metanogénicas, lo que limita su crecimiento y reduce la eficiencia del proceso, generando una digestión lenta y con bajo rendimiento energético [30].

Por tanto, mantener una OLR dentro de un rango óptimo es esencial para garantizar la estabilidad, eficiencia y productividad del sistema de digestión anaerobia.

4.4.5 Tiempo de retención hidráulico

El Tiempo de Retención Hidráulico (Hydraulic Retention Time, HRT) se define como el tiempo promedio que un sustrato permanece dentro del digestor anaerobio. Este parámetro es crucial para garantizar una conversión eficiente de la materia orgánica en biogás, ya que determina el tiempo disponible para que los microorganismos completen las distintas etapas del proceso de digestión [31].

4.4.6 Ácidos volátiles

Los ácidos grasos volátiles (AGV) son compuestos intermedios generados principalmente durante la segunda etapa del proceso de digestión anaerobia, conocida como acidogénesis, en la cual bacterias fermentativas descomponen la materia orgánica en compuestos más simples. Estos ácidos (entre los que se incluyen el ácido acético, propiónico y butírico) son esenciales para la alimentación de las bacterias metanogénicas en etapas posteriores del proceso. Una concentración controlada de AGV contribuye a mantener un pH estable y adecuado, favoreciendo el equilibrio microbiano y mejorando el rendimiento del reactor.

4.4.7 Régimen de alimentación

En los sistemas de digestión anaerobia, el régimen de alimentación se refiere a la forma en que se introduce el sustrato al biodigestor y existen tres tipos.

4.4.7.1 Régimen continuo. Consiste en una alimentación constante y uniforme del reactor, sin interrupciones. Este tipo de régimen es común en sistemas de gran escala, como plantas de tratamiento de aguas residuales, donde se dispone de un flujo continuo de materia orgánica. Su principal ventaja es la estabilidad operativa y la producción sostenida de biogás [32].

4.4.7.2 Régimen semicontinuo o fed-batch. La alimentación se realiza en intervalos regulares, generalmente a diario, con pequeñas cargas de sustrato. Para evitar la sobrecarga del sistema, se retira simultáneamente una porción del digestato. Este régimen permite un mayor control sobre la carga orgánica y es común en biodigestores de mediana escala. Se recomienda una relación agua/residuos de aproximadamente 4:1 para facilitar la mezcla y la digestión [32].

4.4.7.3 Régimen discontinuo o batch. Se caracteriza por una única carga de sustrato, tras la cual el sistema se sella y se deja en reposo durante todo el proceso de digestión, hasta que se completa la producción de biogás. Este régimen es adecuado cuando la disponibilidad de materia orgánica es intermitente o estacional. Aunque su operación es más simple, presenta limitaciones en términos de continuidad y eficiencia energética [32].

4.5 Tipos de biodigestores

Existen diferentes tipos de plantas biodigestoras y sus diferencias, además del diseño, se ven reflejadas en su desempeño, economía y facilidad de escalabilidad. Los principales diseños conocidos son: el dosel flotante proveniente de la India, el domo fijo diseñado en China y el modelo Taiwán o de bolsa. A continuación, se evidencian algunos de los diseños más conocidos [33].

1.5.1. Biodigestor de dosel flotante

Este diseño presenta facilidad en su construcción y operación, está pensada para una utilización en zonas rurales ante operarios de baja preparación. Conformado por un cilindro subterráneo con tapa flotante con guía en el centro del almacenamiento del sustrato, la tapa sube o baja según el nivel de producción de biogás permitiendo visualizar el desempeño del reactor de forma muy sencilla, además de mantener presión en la salida del gas gracias al peso de la misma tapa, funciona con alimentación semicontinua como se observa en la figura 2 [34].

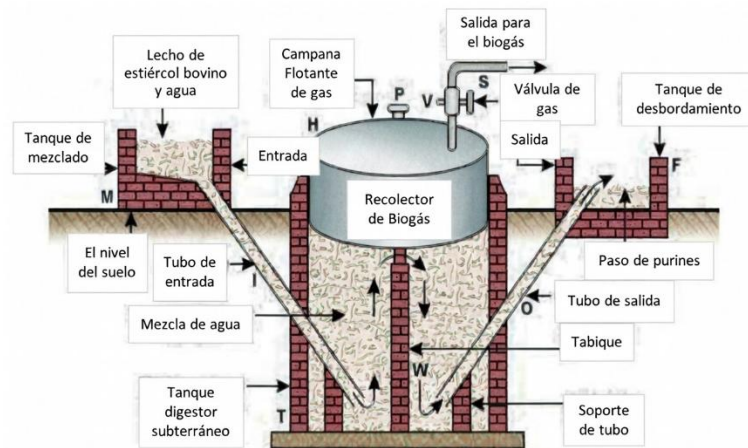


Figura 2. Biodigestor tipo dosel flotante.

Fuente: Tomado de [35].

1.5.2. Biodigestor de domo fijo

Este diseño consiste en una cámara construida por ladrillos, piedras o concreto, generando un espacio de volumen constante para el gas. Con salida del gas en la parte superior, tiene una presión dependiente a la cantidad de volumen gaseoso almacenado. Presenta una vida útil de alrededor de 20 años o más, construido con materiales de bajo costo y un uso de espacio más reducido para su funcionamiento. Sin embargo, la construcción de la parte subterránea puede ser costosa y requiere de un nivel de experticia en su elaboración para superar los desafíos de fugas del biogás producido, como se presenta en la figura 3 [36].

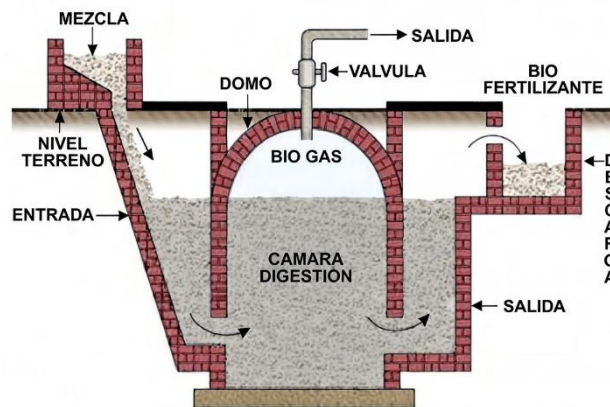


Figura 3. Biodigestor tipo domo fijo.

Fuente: Tomado de [37].

1.5.3. Biodigestor Taiwanés

Este diseño nace ante la necesidad de lograr un sistema de digestión anaerobia de bajo costo, empleándose una bolsa de polietileno que almacena el biogás producido en la parte superior de la misma. La generación del gas aumentará la posible presión de salida debido al aumento de volumen. El biodigestor Taiwanés presenta las mejores características para zonas rurales presentado en la figura 4, aunque ante daños en su bolsa de polietileno, difícilmente puede ser reparado [38].

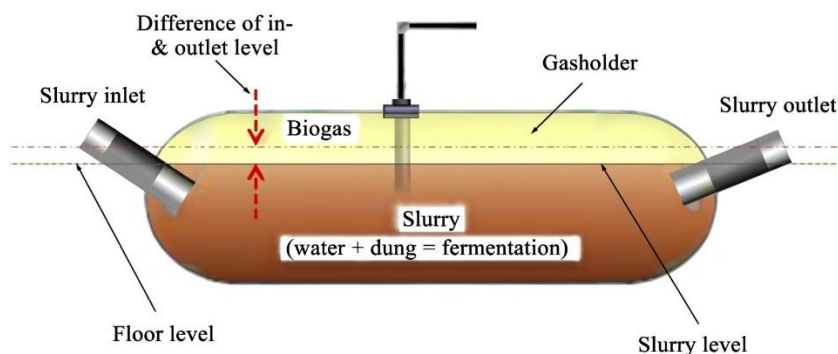


Figura 4. Biodigestor tipo Taiwanés.
Fuente: Tomado de [39].

4.6 Sistemas de purificación

El biogás generado en procesos de digestión anaerobia contiene diversos compuestos indeseables que deben ser eliminados para su uso eficiente y seguro. Entre los principales contaminantes se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3), el vapor de agua y los siloxanos. Estos compuestos afectan negativamente el poder calorífico del biogás, provocan corrosión en los equipos y pueden representar riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

Aunque el biogás puede ser utilizado sin purificación previa, la presencia de impurezas reduce su eficiencia energética y limita su viabilidad económica, especialmente en aplicaciones como la generación eléctrica o el transporte. La purificación permite obtener biometano con concentraciones superiores al 84%, lo que mejora significativamente su poder calorífico y facilita su uso como sustituto del gas natural [40].

4.6.1 Purificación por adsorción por oscilación de presión

Esta es una tecnología que se utiliza para separar mezcla de gases de baja presión, según las características de estos y la capacidad de absorción que tengan; usualmente se utilizan materiales especiales altamente absorbentes como las zeolitas y el carbón activado. Primero, se eliminan las impurezas a altas presiones y, luego, se cambia a baja presión para emitir las fuera del material. El proceso se basa en la característica de los gases a ser atraídos por las

superficies sólidas, es decir, adsorberse. Sucede, entonces, a cuanta mayor presión, mayor adsorción.

Durante la purificación del gas, la adsorción de H_2S es completamente irreversible y toda la superficie es contaminada; por eso mismo, siempre se necesita una descontaminación previa de H_2S . También se ha demostrado que este método, utilizando materiales especiales a diferentes niveles de presión, es eficaz para la separación del dióxido de carbono del metano, todo esto siendo operado a 7-8 bares y unas temperaturas de 50-70 °C [40].

4.6.2 Purificación por absorción con agua

Este proceso de purificación se utiliza esencialmente para eliminar el CO_2 y el H_2S del gas, se basa en el principio de que los compuestos son más solubles en agua que el metano (CH_4). El proceso de absorción es puramente físico, el biogás es presurizado y alimentado en contracorriente con el agua limpia, esta purificación se puede configurar selectivamente para eliminar solo el H_2S del gas, debido a que es más soluble que el CO_2 en agua.

El agua, después de salir con los residuos de los gases contaminantes, puede volver a reutilizarse pasando por un depurador y un lavador que realizan una despresurización y extracción con aire [40].

4.6.3 Purificación por absorción química

La adsorción química implica formación de enlaces reversibles entre un soluto y un disolvente, los disolventes que se usan con más frecuencia para la purificación del biogás son las soluciones acuosas de aminas, estas han sido utilizados durante mucho tiempo para la eliminación de impurezas como CO_2 y H_2S del gas natural [40].

4.7 Sistema de refrigeración

Los sistemas de refrigeración están diseñados principalmente para reducir la temperatura de productos almacenados en cámaras térmicamente controladas, las cuales suelen contener alimentos perecederos o compuestos químicos sensibles. Estos sistemas permiten mantener condiciones de temperatura constantes, lo que inhibe el crecimiento de microorganismos patógenos y prolonga la vida útil de los productos almacenados.

La eficiencia de un sistema de refrigeración depende de múltiples factores, entre ellos el tipo de refrigerante utilizado, el diseño del sistema térmico, y la fuente de energía que lo alimenta. En el contexto de sostenibilidad energética, el uso de biogás como fuente alternativa para alimentar sistemas de refrigeración representa una solución viable y ecológica, especialmente en entornos donde se dispone de biomasa residual [41].

4.7.1 Conservación de alimentos por refrigeración

La conservación de alimentos constituye un aspecto fundamental de la seguridad alimentaria, debido a que la reducción de la temperatura disminuye la actividad metabólica y el crecimiento de microorganismos responsables del deterioro. El almacenamiento a bajas temperaturas es una de las estrategias más eficaces para prolongar la vida útil de los alimentos, permitiendo preservar características como el sabor, la textura, el olor y el aspecto. Sin embargo, es necesario considerar que los rangos de temperatura adecuados varían según el tipo de alimento, por lo que su correcta aplicación resulta determinante para garantizar la calidad e inocuidad.

Los rangos de temperatura utilizados para la conservación de alimentos se clasifican principalmente en dos categorías: la refrigeración, que comprende temperaturas entre 0 °C y 10 °C, y la congelación, con valores entre -18 °C y -35 °C.

En la Tabla 3 se presentan los rangos de temperatura recomendados para distintos tipos de alimentos.

Tabla 3. Rangos de temperatura recomendados para la conservación de alimentos

Tipo de alimento	Refrigeración (°C)	Congelación (°C)
Carnes y pescados	0 a 2	-18 a -20
Frutas y verduras	2 a 7	No aplica
Productos lácteos	1 a 5	-18 a -20

Fuente: Elaboración propia con base en [42].

Los rangos de temperatura presentados en la Tabla 3 evidencian que cada grupo de alimentos requiere condiciones específicas de almacenamiento para conservar su calidad e inocuidad. En el caso de las carnes y pescados, se recomienda mantener temperaturas más bajas debido a su alta susceptibilidad al deterioro microbiológico. Por su parte, las frutas y verduras requieren rangos moderados para evitar daños fisiológicos, mientras que los productos lácteos demandan un control térmico estricto para prevenir la proliferación de microorganismos patógenos.

La correcta aplicación de estos rangos contribuye a prolongar la vida útil de los alimentos, mantener su valor nutricional y reducir las pérdidas por deterioro, fortaleciendo así las prácticas de conservación y seguridad alimentaria [42].

4.7.2 Ciclo de refrigeración por absorción

Los sistemas de refrigeración por absorción representan una alternativa eficiente y económicamente viable cuando se dispone de una fuente de energía térmica de bajo costo, capaz de generar temperaturas entre 100 °C y 200 °C. A diferencia de los sistemas de compresión mecánica, estos sistemas utilizan calor como fuente de energía principal, lo que los hace especialmente atractivos en aplicaciones donde el calor residual o el biogás pueden ser aprovechados [41].

El principio de funcionamiento se basa en la interacción entre un refrigerante y un absorbente. En configuraciones típicas se usan los ciclos amoníaco/agua o agua/bromuro de litio, usando el amoníaco como el refrigerante del primer ciclo y el agua como el refrigerante del segundo respectivamente. El nombre “absorción” proviene del proceso en el que el refrigerante se absorbe por un medio líquido, que posteriormente se separan mediante la aplicación de calor,

esta parte del ciclo es llamado “absorbedor” y cumple la función del compresor usado para otros ciclos de refrigeración.

Históricamente, este tipo de sistema fue desarrollado por Ferdinand Carré en 1859, y su uso se popularizó en décadas posteriores para la producción de hielo y la conservación de alimentos, especialmente en zonas sin acceso a electricidad [43].

4.7.3 Partes esenciales del ciclo de absorción

Para esta investigación se hará uso del ciclo de refrigeración por absorción amoníaco/agua. Este consiste en una circulación forzada de refrigerante en un circuito cerrado con el propósito de que este absorba calor de un lugar y lo disipe en otro. Generalmente cuenta con las siguientes seis partes [44].

4.7.3.1 Generador

El generador tiene la función de separar el refrigerante del agua al ponerlos en contacto con la fuente de calor y lograr una evaporación del primer elemento, en la figura 5 se detalla el ciclo.

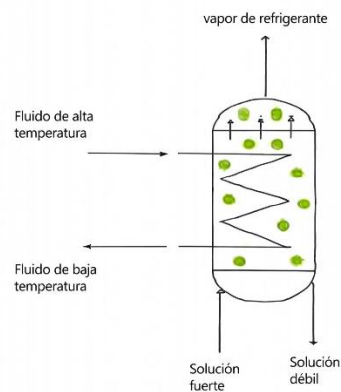


Figura 5. Diagrama del generador en el ciclo de absorción.

Fuente: Tomado de [45].

4.7.3.2 Absorbedor

En el absorbedor, el amoníaco que proviene del evaporador en estado vapor y a baja presión entra en contacto con agua líquida, la cual actúa como absorbente. Debido a la alta afinidad química entre el amoníaco y el agua, el vapor de amoníaco se disuelve rápidamente, retirándose de la fase gaseosa y formando una solución rica en amoníaco.

Este proceso de absorción es exotérmico, por lo que se requiere un sistema de enfriamiento externo para evacuar el calor liberado y mantener el absorbedor a una temperatura controlada, típicamente entre 30 °C y 40 °C. La remoción continua del amoníaco de la fase vapor permite conservar la baja presión del sistema, lo cual favorece la evaporación constante en el evaporador.

Como resultado, del absorbedor se obtiene una solución líquida concentrada de agua y amoníaco, la cual está lista para ser bombeada hacia la siguiente etapa del ciclo. En la figura 6 se detalla el ciclo.

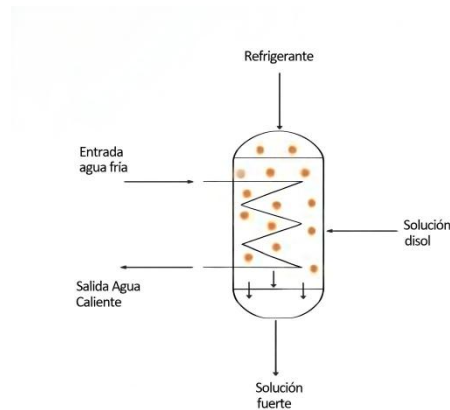


Figura 6. Diagrama de absorbedor en el ciclo de absorción.

Fuente: Tomado de [45].

4.7.3.3 Condensador

El condensador cumple la función de un intercambiador de calor rechazando el calor resultante del proceso anterior en el quemador. Al condensador entra amoníaco a altas temperaturas y presiones para luego salir amoníaco a temperaturas tipo ambiente en estado líquido y alta presión.

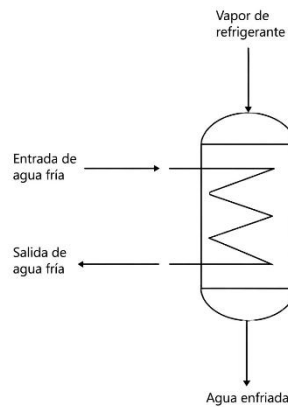


Figura 7. Diagrama de condensador en el ciclo de absorción.

Fuente: Tomada de [45].

4.7.3.4 Válvula de expansión

Este componente reduce la presión del refrigerante, el cual ingresa en forma de amoníaco líquido a alta presión y temperatura cercana al ambiente. Al atravesar la válvula, el refrigerante experimenta una expansión brusca, provocando una disminución significativa de la presión y la temperatura. Como resultado, el amoníaco se transforma en una mezcla líquido-vapor a baja temperatura, quedando en condiciones adecuadas para absorber calor en el evaporador [45].

4.7.3.5 Evaporador

En el evaporador ingresa amoníaco proveniente de la válvula de expansión en forma de una mezcla líquido-vapor a baja presión y temperatura. Debido a estas condiciones, el refrigerante puede evaporarse a temperaturas aproximadas entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, absorbiendo calor del medio que se desea enfriar, típicamente aire o agua entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante este proceso, el amoníaco cambia de fase de líquido a vapor sin un aumento significativo de temperatura, ya que la energía absorbida se emplea como calor latente de evaporación. Como resultado, se genera el efecto frigorífico, y el amoníaco abandona el evaporador en estado vapor a baja presión, listo para ingresar a la siguiente etapa del ciclo, correspondiente al absorbedor [45].

4.7.3.6 Bomba

Este componente se encarga de incrementar la presión de la solución refrigerante, impulsando el fluido desde el absorbedor hacia el generador. Su función principal es garantizar el transporte continuo del refrigerante a alta presión, permitiendo la correcta circulación del fluido dentro del ciclo de refrigeración por absorción. Debido a que la bomba trabaja con el refrigerante en fase líquida, el consumo energético requerido es relativamente bajo en comparación con sistemas de compresión mecánica [45].

4.7.4 Tipos de refrigerante

Los sistemas de refrigeración por absorción varían principalmente en el tipo de refrigerante y absorbente utilizados. Las configuraciones más comunes o utilizadas son Amoníaco-Agua, Agua-Bromuro de litio, Agua-Cloruro de litio.

En la figura 8, se presentan los posibles refrigerantes a utilizar en el sistema de refrigeración por absorción.

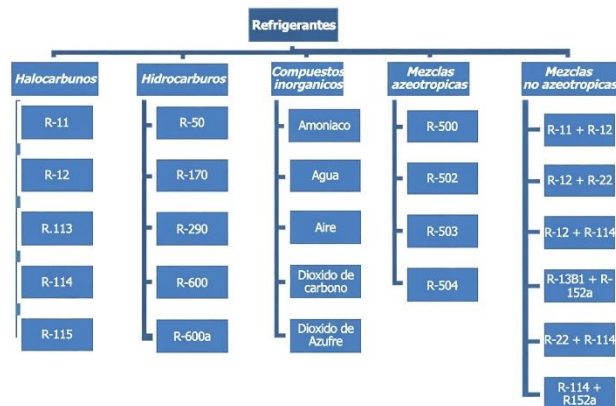


Figura 8. Refrigerantes comúnmente usados en un sistema de refrigeración por absorción.

Fuente: Adaptado de [46].

4.7.4.1 Amoníaco – Agua ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$)

Esta es la configuración más ampliamente utilizada desde dispositivos caseros como neveras hasta artefactos industriales como cámaras de frío. El amoníaco con nomenclatura R-717 clasificado por la ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) se encuentra en el grupo de refrigerantes naturales, no afecta a la

capa de ozono y cuenta con propiedades que le permiten alcanzar -70°C ante el uso de sistemas de última tecnología [46].

4.7.4.2 Agua – Bromuro de litio ($\text{H}_2\text{O} - \text{LiBr}$)

Esta configuración tiene como refrigerante el agua, no presenta efectos negativos para el medio ambiente y produce temperaturas mínimas de 2°C a 5°C . Además, no necesita una fuente de calor de altos valores, lo que permite la implementación con calores residuales en diferentes industrias como lo es la papelera [46].

4.7.4.3 Agua – Cloruro de litio ($\text{H}_2\text{O} - \text{LiCl}$)

El agua es usada como refrigerante en este sistema, logra temperaturas de 2°C a 5°C y es comúnmente utilizado para el enfriamiento de aire, ya sea en ductos de ventilación o aires acondicionados [46].

4.7.5 Configuración Amoníaco-Agua ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$)

Considerando la crisis climática y los avances posteriores al desarrollo industrial, se ha determinado que la configuración que ofrece las mejores propiedades tanto en capacidad de enfriamiento como en sostenibilidad ambiental es la de amoníaco-agua. Por esta razón, se ha decidido profundizar en esta configuración con el objetivo de adaptarla a las características específicas del problema planteado en este documento.

Para entender el funcionamiento del sistema se debe empezar por comprender que se trata de un ciclo cerrado, es decir, no hay un ingreso o una salida de los componentes que hacen parte del sistema, en este caso el refrigerante y el absorbedor. Por esta misma razón podemos empezar a hacer un seguimiento desde cualquiera de sus etapas hasta terminar el ciclo dada su repetitividad [44].

Para facilitar el entendimiento se divide el ciclo en dos subciclos, ciclo absorbedor y ciclo refrigerante. En la figura 9, se puede observar todas las etapas del ciclo amoníaco-agua.

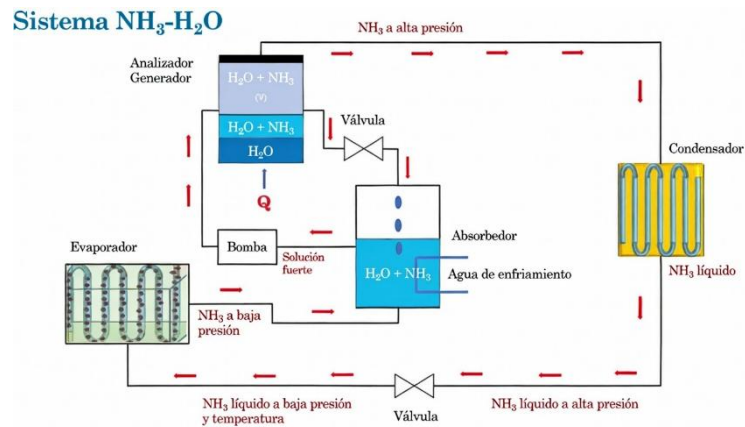


Figura 9. Esquema del sistema amoníaco-agua.

Fuente: Tomado de [45].

4.7.5.1 Ciclo absorbedor.

El ciclo del agua está integrado por el absorbedor, el generador, una bomba y una válvula. Este subciclo busca separar el amoníaco del agua a altas temperaturas y presiones, para luego el agua líquida restante pueda mezclarse con el refrigerante que llega con la temperatura extraída del entorno proveniente del evaporador [45].

4.7.5.2 Ciclo refrigerante.

Al salir del generador en estado gaseoso con altas temperaturas y presiones, pasa por el condensador con la finalidad de cambiar su estado gaseoso a líquido sin perder significativamente la presión que trae. El amoníaco resultante es sometido a una disminución significativa de su presión y con esta pérdida de la presión ocurre un cambio de estado a gaseoso nuevamente y una considerable reducción de su temperatura. Finalmente, este gas con bajas temperaturas y presiones se expone al entorno que se desea refrigerar en el evaporador. Para luego volver al absorbedor y reiniciar el ciclo. Como se puede visualizar en el siguiente esquema [45].

4.8 Fertilizantes

Los fertilizantes son sustancias, naturales o sintéticas, que se aplican al suelo o a las plantas con el objetivo de suplir nutrientes esenciales para su crecimiento y productividad. Entre los nutrientes más importantes se encuentran el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), conocidos como macronutrientes primarios; también micronutrientes como hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn), fundamentales para el crecimiento vegetal [47].

4.8.1 Tipos de fertilizantes

Los fertilizantes se clasifican en cuatro grandes categorías, fertilizantes inorgánicos o sintéticos, fertilizantes orgánicos, biofertilizantes y fertilizantes de liberación controlada [47].

4.8.1.1 Fertilizantes inorgánicos o sintéticos

Son productos manufacturados que contienen nutrientes en formas químicas específicas, permitiendo una dosificación precisa, pero su aplicación excesiva puede causar problemas ambientales.

4.8.1.1.1 *Fertilizantes a base de nitrógeno:* Tienen el nitrógeno como nutriente principal, incluyen amoníaco o soluciones de amonio, nitrato de amonio, urea y nitrato de calcio.

4.8.1.1.2 *Fertilizante a base de fósforo:* Los principales tipos son los superfosfatos, como el superfosfato simple y el superfosfato triple, que se obtuvieron del tratamiento de la roca fosfática y se procesan para hacer el fósforo disponible para las plantas.

4.8.1.1.3 *Fertilizante a base de potasio:* El tipo principal es el Cloruro de potasio, siendo crucial para el crecimiento de las hojas y la síntesis de proteínas en las plantas. El potasio es esencial para el crecimiento fuerte del tallo, el movimiento del agua en las plantas y la promoción de la floración y la fructificación.

4.8.1.2 Fertilizantes orgánicos

Los fertilizantes orgánicos se definen como materiales derivados de fuentes vivas o que alguna vez estuvieron vivas, como el estiércol animal, el compost y los residuos de plantas. Estos fertilizantes no solo proporcionan nutrientes a las plantas, sino que también contribuyen a mejorar la estructura del suelo y fomentar la actividad microbiana. Las fuentes de fertilizantes orgánicos son diversas e incluyen el estiércol de animales, el compost elaborado a partir de residuos orgánicos, los residuos vegetales de cosechas, el abono verde y otros materiales orgánicos. Los fertilizantes orgánicos ofrecen varios beneficios para el suelo y las plantas, como la liberación gradual de nutrientes, la mejora de la retención de agua y la aireación, y el aumento del contenido de materia orgánica y la actividad microbiana en el suelo. Su uso también puede reducir la necesidad de fertilizantes inorgánicos y promover prácticas agrícolas más sostenibles [47].

4.8.1.3 Biofertilizantes

Representan una categoría distinta de fertilizantes que contienen microorganismos vivos o latentes. Estos microorganismos, al aplicarse a las semillas, la superficie de las plantas o el suelo, colonizan la rizosfera o el interior de la planta y promueven el crecimiento al aumentar el suministro o la disponibilidad de nutrientes esenciales. Los biofertilizantes pueden incluir bacterias fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de fósforo y potasio, hongos micorrícicos y otros microorganismos beneficiosos. Su mecanismo de acción puede implicar la fijación de nitrógeno atmosférico, la solubilización de nutrientes que de otro modo no estarían disponibles para las plantas y la producción de fitohormonas que estimulan el crecimiento vegetal.

4.8.1.4 Fertilizantes de liberación controlada

Están diseñados para liberar nutrientes gradualmente a lo largo del tiempo, sincronizando su disponibilidad con las necesidades de la planta en las diferentes etapas de crecimiento. Estos fertilizantes pueden ser tanto inorgánicos como orgánicos y a menudo están recubiertos con materiales especiales que controlan la velocidad a la que los nutrientes se liberan al suelo. El objetivo de los fertilizantes de liberación controlada es mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, reduciendo las pérdidas por lixiviación o volatilización al medio ambiente.

4.8.2 Digestato como fertilizante orgánico

El digestato es el material residual generado tras la digestión anaerobia, proceso en el que microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir biogás. Este subproducto se considera una alternativa sostenible a los fertilizantes químicos, gracias a su contenido de nutrientes y materia orgánica. Se representa en dos fracciones: Líquida y sólida [48].

4.8.2.1 Fracción líquida

Rica en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, utilizada como fertilizante líquido, contiene nutrientes solubles útiles en fertirrigación [49].

4.8.2.2 Fracción sólida

Contiene materia orgánica no degradada, fibra y nutrientes; puede usarse como compost, mejorador de suelos o incluso en aplicaciones agrícolas [49].

5. ESTADO DEL ARTE

5.1. Potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás de digestión anaerobia de residuos alimenticios

El estudio realizado por da Cruz et al. [50] evalúa el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás producido por la biodigestión anaerobia de residuos alimentarios.

Para el desarrollo del estudio, se construyó un proyecto piloto que consistió en tres botellas PET que sirvieron como reactores. Además, se utilizaron otros objetos como una válvula de gas, una manguera de alta presión y un control de temperatura. Se monitoreó la producción de CH_4 , CO , CO_2 , O_2 , H_2S , temperatura y presión, así como la realización de análisis físicos y químicos que evaluaron parámetros como ST, STF, SV, DBO, DQO y pH.

Además, se realizaron análisis de sólidos totales de las muestras para determinar el porcentaje necesario para permitir condiciones de mayor eficiencia en la biodigestión y mayor número de residuos degradados. Para ello, se utilizaron metodologías convencionales para analizar los sólidos totales de las muestras. Se determinó que el inoculado debía permanecer con un porcentaje de sólidos totales cercano al 12%. Los datos obtenidos se utilizaron para calcular la tasa de producción de biogás y la eficiencia de la biodigestión anaerobia de residuos alimentarios.

Los resultados de este estudio indican que el biogás producido por la biodigestión anaerobia de residuos alimentarios tiene un alto potencial energético y puede ser utilizado para generar energía eléctrica y térmica. Además, el digestato producido por el proceso de biodigestión puede ser utilizado como fertilizante orgánico, lo que contribuye a la economía circular y a la reducción de la dependencia de los fertilizantes químicos.

Es importante destacar que la eficiencia de la biodigestión anaerobia de residuos alimentarios depende de varios factores, como la composición de los residuos, la temperatura, la relación C/N y el pH. Por lo tanto, es necesario optimizar las condiciones de operación para maximizar la producción de biogás y minimizar la producción de subproductos no deseados. En este

sentido, se recomendó realizar estudios adicionales para evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación de sistemas de biodigestión anaerobia a mayor escala.

5.2. Generación de electricidad en horas de punta a partir de la digestión anaeróbica de camalote

El estudio desarrollado por Maioli et al. [51] analiza la viabilidad técnica y económica de esta alternativa de generación de energía eléctrica y su impacto en la reducción de la dependencia de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE) en las usinas eléctricas existentes.

Para llevar a cabo este proyecto, se realizó un estudio de factibilidad técnica y económica de la generación de energía eléctrica a partir de la digestión anaeróbica de camalotes. Se llevó a cabo un análisis detallado de la disponibilidad de camalotes en la zona, así como de la calidad y cantidad de biogás que se puede obtener a partir de la digestión anaeróbica. Se realizó un estudio de mercado para evaluar la demanda de energía eléctrica en la zona y se analizaron los costos de producción y distribución de la energía generada. Además, se evaluó el impacto ambiental de la generación de energía eléctrica a partir de la digestión anaeróbica de camalotes.

Una vez completado el estudio de factibilidad, se procedió a la construcción de la planta térmica de ciclo combinado de 130 MW de potencia instalada y los biodigestores necesarios para la digestión anaeróbica de los camalotes. Se llevó a cabo un monitoreo constante de la calidad y cantidad de biogás producido, así como de la eficiencia de la planta térmica. Se realizaron pruebas de carga para evaluar la capacidad de la planta para satisfacer la demanda de energía eléctrica en la zona. Finalmente, se evaluó el impacto económico y ambiental de la generación de energía eléctrica a partir de la digestión anaeróbica de camalotes y se comparó con otras fuentes de energía renovable y no renovable.

Los resultados del estudio de factibilidad técnica y económica indican que la generación de energía eléctrica a partir de la digestión anaeróbica de camalotes es viable y puede competir con otras fuentes de energía renovable y no renovable en términos de costo y eficiencia. Además, la generación de energía eléctrica a partir de la digestión anaeróbica de camalotes

tiene un impacto ambiental positivo, ya que reduce la dependencia de la ANDE en las usinas existentes y disminuye la emisión de gases de efecto invernadero. Este proyecto también tiene un impacto social positivo, ya que puede crear empleos locales y mejorar la calidad de vida de las comunidades cercanas al río Paraguay [39].

5.3. Evaluación en la producción de biogás con desechos avícolas y bovinos para generar energía eléctrica

En esta investigación, se evaluó la eficiencia en la producción de biogás utilizando estiércol bovino y avícola para generar energía eléctrica. Se diseñó un biodigestor a nivel de laboratorio y se valoró la cantidad de gas generado a partir de diferentes mezclas. Los resultados obtenidos permitieron identificar la mezcla más eficiente y se implementó un biodigestor con este tratamiento para la generación de biogás.

El trabajo se dividió en dos fases, en la fase uno se construyó bio-digestores a escala de laboratorio utilizando tanques de polietileno con las condiciones óptimas para facilitar el llenado y la homogenización de la mezcla. Se seleccionaron parámetros de diseño como el volumen total del digestor, el volumen de la cámara de fermentación y el volumen de la cúpula. Se utilizaron tanques de plástico PVC con una capacidad volumétrica de 30 litros y se instalaron accesorios como tapas, válvula de seguridad y válvula de paso para la extracción del biogás. Para la fase dos, se evaluó la cantidad de gas generado en función de las composiciones de la mezcla utilizada, que consistió en estiércol bovino y avícola. Se midió la presión y la temperatura diariamente durante 17 días consecutivos para determinar la eficiencia de la producción de biogás. Se utilizó un termómetro digital y un manómetro de 30 psi para obtener los datos necesarios.

La investigación demostró que el estiércol bovino y avícola pueden ser utilizados de manera eficiente en la producción de biogás para generar energía eléctrica. Se encontró que la mezcla con el mejor tratamiento mostró una mayor producción de biogás con el estiércol bovino. Durante 23 días, se alcanzó una producción de 130,20 litros de biogás, este volumen de gas permitió evaluar el rendimiento del biodigestor y generar energía eléctrica.

6. MARCO LEGAL

En Colombia, las guías ambientales fueron adoptadas oficialmente como instrumento de gestión ambiental por medio de la Resolución 1023 de 2005, emitida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Esta norma establece que las guías son documentos técnicos de orientación conceptual, metodológica y procedimental para apoyar la gestión y control ambiental de proyectos, obras o actividades sujetas a regulación ambiental, lo que sienta las bases para una gestión integral de recursos y residuos en el país.

Antes del año 2006, el biogás no era reconocido formalmente como una fuente no convencional de energía en Colombia. No obstante, la Ley 697 de 2001 estableció los lineamientos para el uso racional y eficiente de la energía y la promoción de fuentes no convencionales, sentando las bases legales para el desarrollo de tecnologías como la digestión anaerobia [52]. Posteriormente, la Ley 1151 de 2007, correspondiente al Plan Nacional de Desarrollo 2006–2010, fortaleció esta política al incentivar el aprovechamiento energético de fuentes alternativas, entre ellas el biogás [53].

El marco normativo del biogás contempla las diferentes etapas de su ciclo de aprovechamiento, que incluyen la generación de residuos orgánicos, la producción del biogás mediante digestión anaerobia, su utilización como combustible y el manejo del digestato como subproducto, con el fin de garantizar condiciones técnicas, ambientales y sanitarias adecuadas [52], [53].

En cuanto a la regulación energética, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) expidió la Resolución CREG 066 de 2009, mediante la cual se establecen los criterios de calidad del biogás y otros gases combustibles, así como los lineamientos para su uso en redes aisladas [54].

Respecto al aprovechamiento del digestato, el Decreto 1287 de 2014 establece las condiciones para el uso de biosólidos provenientes de procesos biológicos [55]. De manera complementaria, la Resolución 689 de 2015 fija los requisitos técnicos y de calidad que deben cumplir los biofertilizantes para su uso en actividades agrícolas [56].

Finalmente, la Resolución 523 de 2017, expedida por el Ministerio de Minas y Energía, define los requisitos técnicos y de calidad que deben cumplir los biocombustibles gaseosos, incluido el biogás, cuando son utilizados para la generación de energía eléctrica en Colombia [57].

Estas disposiciones normativas son fundamentales para el desarrollo del presente proyecto, ya que permiten delimitar su alcance legal y técnico como se desarrollan en la tabla 4, garantizando que las actividades experimentales y operativas se realicen conforme a la legislación colombiana vigente.

Tabla 4. Normativas, requisitos técnicos y de calidad que rigen el uso de biodigestores, sus productos y subproductos.

Normativa	Énfasis	Características para tener en cuenta
Decreto 1287 de 2014	Biosólidos	Condiciones para usar biosólidos provenientes de los procesos agrícolas o desechos alimenticios
Resolución 689 de 2015	Biofertilizantes	Requisitos y calidad requerida para el uso de biofertilizantes provenientes de los procesos de biodigestores
Resolución 523 de 2017	Biocombustibles	Requisitos de calidad que deben cumplir los combustibles producidos a partir de biogás para ser utilizados en la producción de energía en Colombia

Fuente: Elaboración propia con base en [55], [56], [57].

En Colombia, la producción, comercialización y distribución de fertilizantes orgánicos se encuentra regulada por un conjunto de normas técnicas y disposiciones legales que buscan garantizar la calidad del producto, la protección ambiental y la seguridad sanitaria en el uso agrícola. Entre estas disposiciones se destaca la Resolución 150 de 2003 del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), la

cual establece los requisitos para la producción, registro y control de fertilizantes y acondicionadores del suelo [58].

De manera complementaria, el Decreto 1843 de 1991 regula el manejo y uso de productos químicos con fines agropecuarios, estableciendo lineamientos generales de control que también aplican a insumos agrícolas de origen orgánico [59]. Asimismo, la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 define las especificaciones técnicas y criterios de calidad que deben cumplir los fertilizantes orgánicos, abonos y enmiendas del suelo, constituyéndose en un referente técnico fundamental para su evaluación y certificación [60].

En cuanto a los procedimientos administrativos, la Resolución 4254 de 2011 del ICA establece los lineamientos para la obtención del registro de productos orgánicos utilizados como fertilizantes y enmiendas del suelo, asegurando que estos cumplan con los requisitos técnicos y sanitarios exigidos por la autoridad competente [61]. Posteriormente, la Resolución 68370 de 2020 del ICA definió el procedimiento para el registro de fabricantes, importadores y comercializadores de productos de uso agrícola, fortaleciendo los mecanismos de control y trazabilidad en la cadena de suministro [62].

Adicionalmente, el Decreto 1076 de 2015, que compila la normativa ambiental vigente en Colombia, incorpora disposiciones relacionadas con el manejo de residuos orgánicos, el uso sostenible del suelo y la protección del medio ambiente, aspectos directamente asociados a la producción de fertilizantes orgánicos a partir de residuos biodegradables [63].

En conjunto, estas normas, decretos y resoluciones constituyen el marco regulatorio aplicable a la comercialización, venta y distribución de fertilizantes orgánicos producidos a partir de residuos orgánicos, como frutas y verduras, y resultan fundamentales para garantizar que su aprovechamiento se realice de manera técnica, ambiental y legalmente adecuada.

7. OBJETIVOS

7.1. Objetivo general

Evaluar el potencial de producción de biogás a partir de residuos alimenticios y su factibilidad para suplir la carga de refrigeración de la cava de frutas y verduras de un supermercado de cadena en Cali, Colombia.

7.2. Objetivos específicos

1. Establecer teóricamente la composición óptima para la producción de biogás a partir de los desechos alimenticios disponibles en el supermercado de cadena.
2. Calcular el potencial de producción de biogás a partir de los residuos alimenticios del supermercado de cadena.
3. Calcular la carga de refrigeración de los productos almacenados en la cava de frutas y verduras del supermercado de cadena.
4. Evaluar la factibilidad del estudio del proyecto mediante una matriz de costo-beneficio.

8. METODOLOGIA

8.1. Establecer teóricamente la composición óptima para la producción de biogás a partir de los desechos alimenticios disponibles

8.1.1. Cuantificación de biomasa

Gracias a la colaboración con la cadena de supermercados Surtifamiliar S.A., se obtuvo acceso a la base de datos correspondiente a los productos desechados en la sede ubicada en el barrio Alameda, en Cali, Colombia. Esta información permitió cuantificar la biomasa disponible, la cual estuvo compuesta principalmente por frutas y verduras. Mediante el uso de herramientas de análisis en Excel, los datos fueron procesados con el fin de calcular el promedio mensual de generación de cada producto y su participación porcentual con respecto al total de biomasa producida.

Con el propósito de simplificar el análisis de una muestra conformada por más de 100 productos, se seleccionaron los 10 más representativos en términos de volumen generado. Cada uno de estos productos fue recolectado y sometido a pruebas de laboratorio orientadas a determinar parámetros fisicoquímicos clave para la digestión anaerobia, tales como la relación carbono/nitrógeno (C/N), el contenido de humedad y el porcentaje de sólidos volátiles. Dichos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Universidad Javeriana, sede Cali, lo cual garantizó la rigurosidad técnica y la confiabilidad en la caracterización de la biomasa evaluada.

8.1.2. Recolección de datos y estimación del potencial de generación de biogás

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y de la información contenida en la base de datos proporcionada por Surtifamiliar S.A., se estimaron tres escenarios de generación de biogás, fundamentados en la cantidad de materia orgánica generada durante el año 2023. Para cada uno de los productos seleccionados, se analizaron los valores máximos, mínimos y promedio de generación mensual, lo que permitió establecer rangos de variabilidad en la disponibilidad de biomasa a lo largo del periodo evaluado.

8.1.3. Análisis y discusión de resultados

Los resultados obtenidos permitieron realizar una evaluación integral de los tres escenarios planteados, con el propósito de analizar cómo las variaciones en la cantidad de materia orgánica disponible podrían haber afectado el desempeño del sistema. Esta evaluación facilitó el planteamiento de estrategias de respuesta específicas para cada escenario, con el fin de asegurar que el sistema de biodigestión mantuviera condiciones operativas adecuadas frente a fluctuaciones en la disponibilidad de biomasa.

De esta manera, se garantizó la continuidad en la producción de biogás y digestato, así como la estabilidad operativa del sistema bajo condiciones variables de abastecimiento, simulando un comportamiento más cercano a la operación real.

8.2. Definir la configuración del sistema de refrigeración alimentado mediante el calor suministrado por el biorreactor

8.2.1. Selección del sistema de refrigeración

La selección del sistema de refrigeración por absorción se realizó con base en criterios técnicos, energéticos y operativos, en concordancia con la orientación metodológica proporcionada por el director de tesis, el ingeniero PhD. José Luis Ramírez. Los sistemas de refrigeración por absorción se caracterizaron por utilizar energía térmica como fuente principal de entrada, lo que los convirtió en una alternativa adecuada para aplicaciones en las que se disponía de calor residual o de fuentes térmicas renovables, como el biogás producido a partir de la digestión anaerobia.

Diversos estudios reportaron que, aunque los sistemas de absorción presentaron coeficientes de desempeño (COP) inferiores a los sistemas de compresión mecánica, su capacidad para operar con fuentes de calor de baja y media temperatura les otorgó ventajas significativas en términos de eficiencia energética global cuando fueron integrados con sistemas de aprovechamiento térmico [64]. En particular, los ciclos de absorción basados en las parejas agua–bromuro de litio (H_2O – LiBr) y amoníaco–agua (NH_3 – H_2O) demostraron un desempeño confiable en aplicaciones de refrigeración industrial y comercial, así como una alta compatibilidad con fuentes térmicas provenientes de la combustión de biogás [65].

Para complementar el proceso de selección tecnológica, se realizó un estudio de los principios termodinámicos presentes en el ciclo de refrigeración de absorción, teniendo como referencia los textos Termodinámica de Cengel y Fundamentos de Termodinámica de Moran y Shapiro. A partir de estas fuentes se analizaron los balances de masa y energía involucrados en los diferentes componentes del sistema, así como la comprensión del comportamiento del coeficiente de rendimiento (COP) como parámetro fundamental para la evaluación teórica de esta tecnología.

Adicionalmente, la simplicidad mecánica de los sistemas de absorción, al no requerir compresores accionados eléctricamente, redujo los requerimientos de mantenimiento y mejoró la confiabilidad operativa, especialmente en aplicaciones de operación continua [66]. Estas características permitieron considerar la refrigeración por absorción como una alternativa viable para disminuir el consumo eléctrico asociado a sistemas de refrigeración convencionales, particularmente en el sector comercial, donde la refrigeración representó una fracción significativa del consumo energético total.

Finalmente, se evaluó la posibilidad de implementar un sistema híbrido o mixto, combinando tecnologías de absorción y compresión, con el fin de optimizar el desempeño energético del sistema y maximizar el aprovechamiento del biogás disponible. Este tipo de configuraciones fue reportado en la literatura como una estrategia efectiva para mejorar la flexibilidad operativa y la eficiencia global de los sistemas de refrigeración alimentados con fuentes energéticas no convencionales [67].

8.3. Determinar la capacidad de refrigeración que se puede producir por medio del biogás y evaluar la factibilidad del desarrollo del diseño

8.3.1. Capacidad de producción

Mediante la ecuación del coeficiente de desempeño (COP), se realizó una estimación teórica de la capacidad de refrigeración del sistema. Esta estimación se fundamentó en el poder calorífico del biogás generado mensualmente en cada uno de los tres escenarios definidos (mínimo, promedio y máximo), con el propósito de determinar si la energía térmica disponible habría sido suficiente para cubrir la carga de refrigeración de una cava con

características operativas similares a la utilizada por el supermercado para la conservación de frutas y verduras.

Para ello, se estableció la relación entre la energía térmica suministrada al generador del sistema de absorción y la capacidad frigorífica obtenida, a partir del valor teórico del COP, permitiendo así cuantificar el potencial de sustitución energética bajo cada escenario evaluado.

8.3.2. Factibilidad del desarrollo del diseño

Para evaluar la viabilidad del proyecto, se aplicó una matriz de costo-beneficio fundamentada en los resultados técnicos y energéticos obtenidos durante el desarrollo del estudio. Esta herramienta permitió organizar y sistematizar la información de manera estructurada, facilitando el análisis integral de la factibilidad técnica y económica del diseño propuesto.

El enfoque adoptado buscó evaluar el potencial del sistema no solo como alternativa tecnológica para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos, sino también como estrategia para mitigar impactos ambientales asociados a la disposición inadecuada de desechos alimenticios. Asimismo, se consideraron los beneficios económicos derivados de la valorización del biogás y del digestato, enmarcando el proyecto dentro de un modelo de economía circular orientado a la optimización de recursos y generación de valor agregado.

9. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante el desarrollo del presente documento se identificaron tres componentes fundamentales que contribuyeron directamente al cumplimiento de los objetivos del proyecto.

En primer lugar, se abordó la cuantificación de la biomasa disponible, lo cual permitió estimar el potencial energético del sistema a partir de la producción de biogás generado mediante digestión anaerobia. Este análisis constituyó la base para determinar la disponibilidad real de recurso energético y su variabilidad temporal. En segundo lugar, se desarrolló el diseño conceptual del sistema de refrigeración, alimentado por la energía térmica proveniente de la combustión del biogás producido en el biorreactor. Dicho diseño incluyó cálculos termodinámicos, representaciones esquemáticas y análisis matemáticos orientados a validar la coherencia técnica y el desempeño esperado del sistema.

Finalmente, se formuló una propuesta de valor enfocada en evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental del diseño planteado. Esta evaluación consideró tanto la mitigación de impactos asociados a la disposición inadecuada de residuos orgánicos como los beneficios derivados del aprovechamiento energético, en el marco de un modelo de economía circular.

9.1. Producción de biogás y metano

9.1.1. Cuantificación de la biomasa

La empresa Surtifamiliar S.A. proporcionó la base de datos correspondiente a la sede Alameda, la cual incluyó el seguimiento detallado de la mercancía y permitió identificar la cantidad de productos vencidos, pérdidas por hurto y residuos orgánicos generados. A partir de esta información se realizó un análisis específico enfocado en la fracción orgánica descartada, con el fin de cuantificar el volumen total de biomasa potencialmente aprovechable para la producción de biogás.

Con el propósito de garantizar la consistencia y representatividad de los datos, se consideró exclusivamente la información correspondiente al año 2023. Esta delimitación se estableció debido a la alta variabilidad en las ventas de ciertos productos, atribuida a factores

comerciales y estacionales que excedieron el alcance técnico de la presente investigación, según lo reportado por el área administrativa de la empresa.

Durante el periodo evaluado, la sede analizada manejó más de 150 ítems, los cuales generaron en conjunto más de 41 toneladas de residuos orgánicos al finalizar el año. Este volumen representó una disponibilidad significativa de materia prima para la digestión anaerobia, evidenciando un potencial energético relevante para aplicaciones de valorización. La magnitud de residuos generados permitió inferir que el establecimiento presentó una producción relativamente constante de biomasa, condición necesaria para garantizar la operación continua y estable de un sistema de biodigestión, como se evidencia en la Tabla 5.

Tabla 5. Cantidad anual de desechos orgánicos por producto

Producto	Cantidad Anual (kg)	Porcentaje global
Lechuga	8.497,11	21%
Tomate	6.169,21	15%
Mango	2.728,32	7%
Plátano	2.379,04	6%
Papaya	1.729,20	4%
Papa	1.536,93	3%
Banano	1.467,03	4%
Cebolla	1.408,89	4%
Mandarina	1.400,41	4%
Sandía	1.300,60	3%
Naranja	1.287,56	3%
Limon	1.118,70	3%
Lulo	993,70	2%
Brócoli	948,75	2%
Maiz Dulce	885,50	2%
Pimentón	868,90	2%
Piña	858,07	2%
Guayaba	855,17	2%
Aguacate	799,00	2%
Otros	3.720,71	9%
Total General	41.363,79	100%

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior presentó la distribución anual de los principales productos contenidos en la base de datos, organizados por tipo de producto, peso en kilogramos y porcentaje de

participación respecto al total generado. Debido al elevado número de ítems con porcentajes individuales muy bajos, se excluyeron aquellos con mínima representatividad, ya que su inclusión habría incrementado la complejidad del análisis sin generar un impacto significativo en la estimación global del potencial energético. No obstante, la concentración del estudio en los productos de mayor participación permitió capturar la fracción predominante de la biomasa generada, evidenciando un alto potencial de aprovechamiento.

Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron los ocho productos con mayor volumen de desecho, los cuales fueron agrupados en familias con características fisicoquímicas similares, con el fin de facilitar su caracterización y análisis. Por ejemplo, dentro de la categoría de lechugas se incluyeron variedades como Batavia, Romana, Lisa y Morada; mientras que en la categoría de tomates se agruparon tipos como Chonto, De árbol y Milano. Los productos finalmente considerados fueron: lechuga, tomate, mango, papaya, papa, plátano, banano y cebolla.

Esta selección permitió trabajar con una muestra representativa de la biomasa total generada, asegurando que los análisis de caracterización (relación C/N, humedad y sólidos volátiles) reflejaran adecuadamente el comportamiento real del residuo orgánico disponible para digestión anaerobia.

Tabla 6. Distribución mensual de desechos orgánicos

Mes	Peso Neto (kg)
Enero	2.509,05
Febrero	1.958,65
Marzo	3.958,46
Abril	4.445,33
Mayo	3.171,67
Junio	3.052,18
Julio	3.460,11
Agosto	3.324,17
Septiembre	3.505,73
Octubre	3.518,80
Noviembre	3.451,12
Diciembre	5.008,52
Total General	41.363,79

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior presentó la distribución anual de los desechos orgánicos provenientes de frutas y verduras, expresados en kilogramos y en porcentaje respecto al total generado. Se observó que la lechuga representó la mayor proporción con un 21 % (8.497,11 kg), seguida por el tomate con un 15 % (6.169,21 kg), mientras que productos como mango, plátano y papaya aportaron entre el 4 % y el 7 % cada uno. El total acumulado de desechos alcanzó 41.268,79 kg anuales, lo que evidenció una generación significativa de residuos orgánicos con potencial de aprovechamiento mediante procesos de valorización como la digestión anaerobia o el compostaje.

Desde una perspectiva energética, este volumen anual equivalió aproximadamente a 113 kg diarios de biomasa, lo cual sugirió una disponibilidad relativamente constante de sustrato para la operación de un biodigestor a escala comercial. La alta participación de productos con elevado contenido de humedad, como lechuga y tomate, indicó la necesidad de considerar estrategias de control de sólidos totales y relación carbono/nitrógeno para optimizar el proceso de digestión.

Posteriormente, se presentó la Tabla 7, en la cual se ilustraron tres escenarios comparativos: el mes con mayor generación de desechos, el promedio mensual y el mes con menor volumen registrado. Este análisis permitió evaluar la variabilidad temporal en la disponibilidad de biomasa y establecer criterios para el dimensionamiento del sistema, garantizando su operación bajo condiciones tanto favorables como restrictivas.

Tabla 7. Escenarios comparativos de generación mensual de desechos

ESCENARIO 1	MAXIMO	5.008,52 kg
ESCENARIO 2	PROMEDIO	3.446,98 kg
ESCENARIO 3	MINIMO	1.958,65 kg

Fuente: Elaboración propia.

9.1.2. Recolección y preparación de muestras

En la sede Alameda se recolectaron muestras de residuos orgánicos en el mejor estado posible para garantizar la representatividad del análisis. Las muestras fueron cortadas y licuadas antes de ser trasladadas al laboratorio. El tiempo transcurrido entre la preparación (licuado) y el ingreso al laboratorio fue de aproximadamente 3 a 4 horas, manteniendo condiciones

adecuadas para evitar alteraciones en la composición. La Figura 10 muestra el estado inicial de las muestras recolectadas.



Figura 10. Muestras de biomasa vegetal para análisis en laboratorio

9.1.2.1. Procedimiento de análisis de muestras

Las muestras de residuos fueron recibidas en el laboratorio y sometidas a un proceso de homogeneización mediante licuado, previa remoción de cáscaras y semillas, con el fin de garantizar uniformidad en la matriz analizada. Posteriormente, fueron almacenadas bajo refrigeración a $6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el momento de su caracterización, con el objetivo de minimizar procesos de degradación biológica previos al análisis.

Los ensayos se realizaron en fracciones independientes según el tipo de determinación requerida. Para la cuantificación de humedad y cenizas se emplearon métodos gravimétricos estándar reconocidos internacionalmente (AOAC), asegurando precisión y reproducibilidad en los resultados. La determinación de nitrógeno, fósforo y azufre se efectuó mediante el uso de kits de análisis rápido MACHEREY-NAGEL, complementados con espectrofotometría de absorción molecular UV-Vis para la lectura cuantitativa.

Los análisis se llevaron a cabo dentro de los cinco días posteriores a la recepción de las muestras, manteniendo en todo momento las condiciones de refrigeración establecidas. Cada determinación se realizó por duplicado, incluyendo blancos de proceso y controles analíticos, con el fin de garantizar la validez, confiabilidad y repetibilidad de los resultados obtenidos.

9.1.2.2. Determinación de humedad

Se tomaron al menos 20 g de muestra en su estado original, los cuales fueron pesados en crisoles de porcelana previamente secados y tarados a 104 °C durante 2 h, con el fin de eliminar humedad residual y garantizar exactitud en la determinación gravimétrica. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a secado en un horno de convección forzada a 110 °C durante 4 h. Una vez finalizado el periodo de secado, los crisoles fueron trasladados a un desecador y mantenidos hasta alcanzar peso constante, evitando así la absorción de humedad ambiental.

El contenido de humedad se calculó conforme al método AOAC 964.22, expresando la pérdida total de masa como porcentaje respecto al peso inicial de la muestra.

9.1.2.3. Determinación de cenizas

A partir de la muestra previamente secada, se realizó el proceso de incineración en mufla a 550 °C durante 8 h, con el fin de oxidar completamente la fracción orgánica. Previamente, se efectuó una etapa de combustión controlada en estufa hasta la desaparición de humos blancos, con el propósito de evitar pérdidas bruscas de material y garantizar una calcinación gradual y uniforme.

El procedimiento se llevó a cabo conforme al método AOAC 923.03. El resultado se expresó como porcentaje de residuo inorgánico (cenizas) respecto al peso seco inicial, permitiendo posteriormente determinar el contenido de sólidos volátiles por diferencia.

9.1.2.4. Cuantificación de nutrientes

Para la determinación de nitrógeno, fósforo y azufre, se tomaron fracciones independientes de las muestras previamente homogeneizadas y se procesaron conforme a las especificaciones técnicas de cada kit analítico. Las reacciones generaron compuestos coloreados cuya absorbancia fue medida mediante espectrofotometría de absorción molecular UV-Vis. Las concentraciones fueron calculadas a partir de curvas de calibración obtenidas por regresión lineal, siguiendo los principios establecidos por la ley de Beer-Lambert.

En el caso del nitrógeno, este fue determinado en forma de nitrato (N-NO_3^-). Para ello, se tomaron entre 5 y 10 g de muestra, los cuales fueron sometidos a digestión durante 30 min a 120 °C en tubos de descomposición con peroxodisulfato de potasio, con el fin de oxidar y convertir todas las formas de nitrógeno presentes a nitrato. Posteriormente, el nitrato reaccionó con 2,6-dimetilfenol en una mezcla de ácido sulfúrico y ácido fosfórico, formando un compuesto coloreado susceptible de medición fotométrica. La absorbancia fue registrada a una longitud de onda de 365 nm tras 10 min de reacción, utilizando el kit MACHEREY-NAGEL (Ref. 985083, lote 83311).

9.1.2.5. Determinación fósforo y azufre

El fósforo fue cuantificado en forma de ortofosfato (P-PO_4^{3-}). Para ello, se tomaron entre 5 y 20 g de cada muestra, las cuales fueron sometidas a digestión durante 30 min a 120 °C en tubos de descomposición, utilizando 0,5 mL de peroxodisulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) como agente oxidante, con el propósito de convertir todas las formas de fósforo presentes en ortofosfato. Posteriormente, el ortofosfato reaccionó en medio ácido con una solución que contenía iones de molibdato y antimonio, formando un complejo de fosfomolibdato. Este complejo fue reducido para generar el denominado azul de fosfomolibdeno, cuya intensidad fue medida fotométricamente mediante espectrofotometría UV-Vis a una longitud de onda de 728 nm, tras 10 min de reacción (Kit MACHEREY-NAGEL, Ref. 91877, lote 6617).

El azufre fue determinado en forma de sulfato (S-SO_4^{2-}). Para su análisis, el residuo obtenido tras la incineración fue disuelto en una solución con pH comprendido entre 2 y 11, asegurando la solubilización del sulfato presente. Posteriormente, se adicionó una solución de cloruro de bario, lo que generó la formación de sulfato de bario (BaSO_4), produciendo una turbidez proporcional a la concentración de sulfato. La intensidad de dicha turbidez fue medida fotométricamente después de 15 min de reposo, mediante espectrofotometría UV-Vis a una longitud de onda de 800 nm (Kit MACHEREY-NAGEL, Ref. 985060, lote 60401).

Tabla 8. Resultados generales obtenidos del laboratorio

Código de muestra	Nombre	% Humedad	% Ceniza	% C	Nitrógeno total % N	Fosforo total % P	Azufre total % S
LIA 000269-24	Lechuga	96,04	0,69	82,59	0,133	0,021	0,025
LIA 000271-24	Mango	94,58	0,52	90,47	0,042	0,010	0,022
LIA 000270-24	Tomate	84,47	0,32	97,95	0,065	0,013	0,022
LIA 001151-24	Papaya Naranja	87,43	0,84	93,33	0,093	0,016	0,019
LIA 001152-24	Cebolla	91,53	0,38	95,50	0,085	0,020	0,022
LIA 001153-24	Banano	74,07	1,83	92,96	0,082	0,006	0,007
LIA 001154-24	Plátano maduro	64,71	1,41	96,00	0,082	0,015	0,005
LIA 001155-24	Papa	81,09	1,20	93,65	0,068	0,039	0,017

Fuente: Elaboración propia.

Los valores reportados se refieren a la muestra fresca con excepción del %C que se refiere a la muestra seca.

Al analizar los resultados, se observó que los residuos evaluados presentaron un alto contenido de humedad, superior al 64%, condición favorable para la digestión anaerobia, ya que facilita la solubilización y degradación de la materia orgánica por parte de los microorganismos.

El contenido de carbono, determinado en base seca, evidenció una alta proporción de materia orgánica disponible, lo que sugiere un adecuado potencial como sustrato para la generación

de metano. No obstante, los niveles de nitrógeno, fósforo y azufre fueron relativamente bajos, lo cual podría generar limitaciones nutricionales para la actividad microbiana si no se garantiza un balance adecuado de macronutrientes.

En particular, una relación C/N desbalanceada puede afectar la estabilidad del proceso, provocando acumulación de amonio (si es baja) o deficiencia de nitrógeno (si es muy alta), lo que repercute en la eficiencia metanogénica.

En términos generales, los parámetros fisicoquímicos obtenidos indican que los residuos analizados son técnicamente adecuados para la producción de biogás, siempre que se implementen estrategias de co-digestión o mezcla con sustratos complementarios que permitan optimizar la relación C/N y mantener condiciones estables durante la operación del biodigestor.

9.1.3. Caracterización de la biomasa

A partir de los resultados obtenidos por el laboratorio de investigaciones ambientales de la universidad Javeriana, se procede a pasar los resultados del porcentaje de carbono en base seca a base húmeda y además se añade el factor de corrección de 0,45 que nace de una composición que no es carbono puro sino también residuos del oxígeno, hidrógeno y algunos elementos adicionales resultantes de la quema realizada en el laboratorio que alteran las mediciones, con la ecuación 2:

$$C_{humedo} = C_{seco} * 1 - \frac{Humedad}{10} * 0,45 \quad (2)$$

Donde:

C_{humedo} = Porcentajes de carbono en base húmeda.

C_{seco} = Porcentajes de carbono en base seca.

$Humedad$ = Fracción de agua presente en la muestra.

0.45 = Factor de corrección por composición química.

Entonces,

$$\text{Lechuga:} \quad 1,47\% = 82,59\% * \left(1 - \frac{96,04}{100}\right) * 0,45$$

$$\text{Mango:} \quad 2,2\% = 90,47\% * \left(1 - \frac{94,58}{100}\right) * 0,45$$

$$\text{Tomate:} \quad 6,84\% = 97,95\% * \left(1 - \frac{84,47}{100}\right) * 0,45$$

$$\text{Papaya:} \quad 5,29\% = 93,33\% * \left(1 - \frac{87,43}{100}\right) * 0,45$$

$$\text{Cebolla:} \quad 3,64\% = 95,50\% * \left(1 - \frac{91,53}{100}\right) * 0,45$$

$$\text{Banano:} \quad 10,84\% = 92,96\% * \left(1 - \frac{74,07}{100}\right) * 0,45$$

$$\text{Plátano:} \quad 15,24\% = 96,00\% * \left(1 - \frac{64,71}{100}\right) * 0,45$$

$$\text{Papa:} \quad 7,97\% = 93,65\% * \left(1 - \frac{81,09}{100}\right) * 0,45$$

En la tabla 9 se puede observar el resumen de la caracterización de todos los ingredientes en estudio. Debido a la alta variabilidad de la cantidad de residuos durante el día se tienen en cuenta 3 escenarios: mínimos de producción, producción promedio y máximos de producción.

Tabla 9. Resumen caracterización de los productos

Ingrediente	Humedad	%C	%N	C/N	Peso 1 (kg)	Peso 2 (kg)	Peso 3 (kg)	pH
Lechuga	96.04	1,47	0,133	11,05	33.5	23.6	18.5	6,5
Mango	94.58	2,2	0,042	52,38	15.1	7.6	0.8	4
Tomate	84.47	6,84	0,065	105,23	38.6	17.2	9.1	4
Papaya	87.43	5,29	0,093	56,88	38.55	4.8	0.2	6
Cebolla	91.53	3,64	0,085	42,82	5.2	3.9	1.8	5
Banano	74.07	10,84	0,082	132,19	10.1	4.1	0.9	5
Plátano	64.71	15,24	0,082	185,85	13.3	6.7	3	5
Papa	81.09	7,97	0,068	117,2	8.09	4.3	0.8	6
Total	-	-	-	-	162.44	72.2	35.1	-

Fuente: Elaboración propia-

Se adjuntaron los resultados de las mediciones de pH practicadas por el kit de rápido testeo de MACHEREY – NAGEL. Cada una de las practicas se hizo individual, dejando la prueba dentro del recipiente de 3 a 5 minutos. En las siguientes figuras se evidencian los pasos seguidos.



Figura 11. Toma de muestras.



Figura 12. Medición de pH.

9.1.3.1. Relación Carbono-Nitrógeno

A partir de la ecuación (1) para el cálculo del índice C/N ponderado

para una mezcla de materias primas:

$$K = \frac{C_1 * Q_1 + C_2 * Q_2 + \dots + C_n * Q_n}{N_1 * Q_1 + N_2 * Q_2 + \dots + C_n * Q_n} \quad (3)$$

Donde:

$K = \text{Relación } \frac{C}{N} \text{ de la mezcla de materias primas.}$

$C = \% \text{ de carbono orgánico contenido en cada materia prima.}$

$N = \% \text{ de nitrógeno orgánico contenido en cada materia.}$

$Q = \text{Peso fresco de cada materia prima (kg o tonelada).}$

Escenario 1: Máximos

$$K = \frac{(1.47 * 33.5) + (2.2 * 15.1) + (5.29 * 38.6) + (3.64 * 5.2) + (6.84 * 38.6) + (7.97 * 8.09) + (10.84 * 10.1) + (15.24 * 13.3) + 12.674 * 20}{(0.133 * 33.5) + (0.042 * 15.1) + (0.093 * 38.6) + (0.085 * 5.2) + (0.065 * 38.6) + (0.068 * 8.09) + (0.082 * 10.1) + (0.082 * 13.3) + (1.702 * 20)}$$

$$K = 24.92 \text{ C: N}$$

Escenario 2: Promedio

$$K = \frac{(1.47 * 23.6) + (2.2 * 7.6) + (5.29 * 4.8) + (3.64 * 3.9) + (6.84 * 17.2) + (7.97 * 4.3) + (10.84 * 4.1) + (15.24 * 6.7) + (12.674 * 7.5)}{(0.133 * 23.6) + (0.042 * 7.6) + (0.093 * 4.8) + (0.085 * 3.9) + (0.065 * 17.2) + (0.068 * 4.3) + (0.082 * 4.1) + (0.082 * 6.7) + (1.702 * 7.5)}$$

$$K = 25.11 \text{ C: N}$$

Escenario 3: Mínimos

$$K = \frac{(1.47 * 18.5) + (2.2 * 0.8) + (5.29 * 0.2) + (3.64 * 1.8) + (6.84 * 9.1) + (7.97 * 0.8) + (10.84 * 0.9) + (15.24 * 3) + (12.674 * 2.5)}{(0.133 * 18.5) + (0.042 * 0.8) + (0.093 * 0.2) + (0.085 * 1.8) + (0.065 * 9.1) + (0.068 * 0.8) + (0.082 * 0.9) + (0.082 * 3) + (1.702 * 2.5)}$$

$$K = 24.96 \text{ C: N}$$

Para el escenario numero 3 es necesario añadir 2.5 kg de estiércol porcino para redondear la mezcla cercana a una relación carbono nitrógeno de 25.

9.1.3.2. Humedad general

La humedad del sustrato constituye un factor determinante en la producción de metano dentro de un biodigestor, debido a su influencia directa sobre la dinámica microbiológica y la eficiencia del proceso anaerobio. Su importancia se fundamenta en los siguientes aspectos:

- **Actividad microbiológica:** Los microorganismos anaerobios requieren un medio acuoso para transportar nutrientes, enzimas y metabolitos. Una humedad adecuada favorece la movilidad celular, la actividad enzimática y la estabilidad del consorcio microbiano responsable de la metanogénesis.
- **Contenido de sólidos volátiles (SV):** La fracción biodegradable del sustrato se encuentra asociada a los sólidos volátiles. La relación entre humedad y sólidos totales influye directamente en la concentración efectiva de materia orgánica disponible para la digestión.
- **Balance energético y transferencia de calor:** Un contenido hídrico adecuado mejora la capacidad térmica del sistema, favoreciendo una distribución homogénea de temperatura dentro del reactor, condición esencial para mantener la actividad metanogénica estable.
- **Dilución y mezcla del sustrato:** La humedad facilita la homogenización del material alimentado al biodigestor, mejora la biodisponibilidad de nutrientes y reduce problemas operativos como sedimentación o formación de costras superficiales.

Para determinar la humedad promedio del sustrato, se empleó la siguiente expresión:

$$\text{Humedad promedio} = \frac{\sum(\text{Peso humedo} \times \text{Humedad})}{\sum \text{Peso Humedo}} \quad (4)$$

Donde:

Humedad = Porcentaje de humedad de cada componente.

Peso humedo = Masa total del material en estado humedo.

9.1.3.2.1. Caracterización de la biomasa: Escenario 1 – Máximos:

Banano	$10.1 * 0.741 = 7.48 \text{ kg agua}$
Cebolla	$5.2 * 0.915 = 4.758 \text{ kg agua}$
Lechuga	$33.5 * 0.960 = 32.16 \text{ kg agua}$
Mango	$15.1 * 0.945 = 14.27 \text{ kg agua}$
Papa	$8.09 * 0.8109 = 33.74 \text{ kg agua}$
Papaya	$38.6 * 0.874 = 33.74 \text{ kg agua}$
Plátano	$13.3 * 0.647 = 8.61 \text{ kg agua}$
Tomate	$38.6 * 0.8447 = 32.62 \text{ kg agua}$
Estiércol	$20 * 0.5059 = 10.12 \text{ kg agua}$

$$\text{Humedad promedio} = \frac{7.48 + 4.76 + 32.16 + 14.27 + 6.56 + 33.74 + 8.61 + 32.62 + 10.12}{10.1 + 5.2 + 33.5 + 15.1 + 8.09 + 38.6 + 13.3 + 38.6 + 20} = \frac{150.32}{182.49}$$

$$\text{Humedad promedio} = 0.824 = 82.4\%$$

Cantidad de agua que se debe adicionar:

$$0.9 = \frac{150.32 + x}{182.44 + x}$$

$$x = 139.21 \text{ Litros de agua}$$

Para lograr una humedad promedio aproximada de 90% se deben añadir aproximadamente 139.21 litros de agua.

9.1.3.2.2. *Caracterización de la biomasa: Escenario 2 – Promedio:*

Banano	$4.1 * 0.741 = 3.04 \text{ kg agua}$
Cebolla	$3.9 * 0.915 = 3.57 \text{ kg agua}$
Lechuga	$23.6 * 0.960 = 22.66 \text{ kg agua}$
Mango	$7.6 * 0.945 = 7.182 \text{ kg agua}$
Papa	$4.3 * 0.811 = 3.49 \text{ kg agua}$
Papaya	$4.8 * 0.874 = 4.2 \text{ kg agua}$
Plátano	$6.7 * 0.647 = 4.33 \text{ kg agua}$
Tomate	$17.2 * 0.8447 = 14.53 \text{ kg agua}$
Estiércol	$7.5 * 0.5059 = 3.79 \text{ kg agua}$

$$\text{Humedad promedio} = \frac{3.04 + 3.57 + 22.66 + 7.18 + 3.49 + 4.2 + 4.33 + 14.53 + 3.79}{4.1 + 3.9 + 23.6 + 7.6 + 4.3 + 4.8 + 6.7 + 17.2 + 7.5} = \frac{66.79}{79.7}$$

$$\text{Humedad promedio} = 0.838 = 83.8\%$$

Cantidad de agua que se debe adicionar:

$$0.9 = \frac{66.79 + x}{79.7 + x}$$

$$x = 49.4 \text{ Litros de agua}$$

Para lograr una humedad promedio aproximada de 90% se deben añadir aproximadamente 49.4 litros de agua.

9.1.3.2.3. *Caracterización de la biomasa: Escenario 3 – Mínimos:*

Banano	$0.9 * 0.741 = 0.67 \text{ kg agua}$
Cebolla	$1.8 * 0.915 = 1.65 \text{ kg agua}$
Lechuga	$18.5 * 0.960 = 17.76 \text{ kg agua}$
Mango	$0.8 * 0.945 = 0.76 \text{ kg agua}$
Papa	$0.8 * 0.8109 = 0.65 \text{ kg agua}$
Papaya	$0.2 * 0.874 = 0.17 \text{ kg agua}$
Plátano	$3 * 0.647 = 1.94 \text{ kg agua}$
Tomate	$9.1 * 0.8447 = 7.67 \text{ kg agua}$
Estiércol	$2.5 * 0.5059 = 1.26 \text{ kg agua}$

$$\text{Humedad promedio} = \frac{0.67 + 1.65 + 17.76 + 0.76 + 0.65 + 0.17 + 1.94 + 7.67 + 1.26}{0.9 + 1.8 + 18.5 + 0.8 + 0.8 + 0.2 + 3 + 9.1 + 2.5} = \frac{32.53}{37.6}$$

$$\text{Humedad promedio} = 0.8651 = 86.51\%$$

Cantidad de agua que se debe adicionar:

$$0.9 = \frac{32.53 + x}{37.6 + x}$$

$$x = 13.1 \text{ Litros de agua}$$

Para lograr una humedad promedio aproximada de 90% se deben añadir aproximadamente 13.1 litros de agua.

9.1.3.3. pH

El pH de una mezcla destinada a la digestión anaerobia está influenciado por diversos factores fisicoquímicos y biológicos, entre ellos la composición del sustrato, la actividad microbiana, la temperatura de operación, el tiempo de retención hidráulica y la presencia de compuestos ácidos o alcalinos generados durante las etapas de hidrólisis y acidogénesis. Debido a la naturaleza dinámica y amortiguada del sistema, no resulta apropiado estimar teóricamente el pH inicial únicamente a partir de la concentración de iones hidrógeno, ya que dicha aproximación no considera la capacidad buffer del medio ni la formación progresiva de ácidos grasos volátiles.

Por esta razón, se adoptó un enfoque experimental, determinando el pH directamente después de la preparación de la mezcla mediante un potenciómetro calibrado. En caso de encontrarse fuera del rango adecuado, se realizaron ajustes graduales mediante la adición controlada de un agente alcalinizante (cal agrícola), incorporado en pequeñas proporciones y bajo agitación constante, hasta alcanzar el intervalo óptimo para la digestión anaerobia (6,8–7,4) [68].

9.1.4. Potencial teórico de producción de biogás y metano

A partir de la información recopilada en la base de datos, se determinó la composición y las cantidades específicas de la mezcla destinada al biodigestor. Con base en estos datos, se procedió al cálculo de la generación teórica de biogás. Para ello, se adoptó un enfoque fundamentado en factores de conversión reportados en estudios científicos, los cuales relacionan la masa del sustrato con el volumen de biogás producido.

Es importante señalar que los factores de conversión utilizados fueron de 0,08 m³/kg para el estiércol porcino y 0,50 m³/kg para los residuos de frutas y verduras. Estos valores corresponden a la producción diaria de biogás por kilogramo de sustrato fresco bajo condiciones mesofílicas.

Asimismo, se aclara que el volumen calculado representa el biogás total generado, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. Para estimar el volumen de metano puro, se consideró un contenido promedio del 60%, valor representativo dentro del rango típico del biogás, el cual suele variar entre 50% y 70%.

En el caso del estiércol porcino, se empleó el factor de conversión aproximado de 0,08 m³/kg junto con el contenido promedio de metano mencionado. [69] Por su parte, para los residuos orgánicos de frutas y verduras se adoptó un valor conservador de 0,50 m³/kg [70].

9.1.4.1. Producción teórica de biogás – Escenario 1

$$m_{Biogas}^3 = 0.08 \frac{m^3}{kg} * 20 kg + 0.5 \frac{m^3}{kg} * 16.49 kg$$

$$m_{Biogas}^3 = 82.85 m^3 * día$$

$$m_{Biogas}^3 = 2485.35 m^3 * mes (30 días)$$

$$m_{Biogas}^3 = 30238.43 m^3 * año(365 días)$$

9.1.4.2. Producción teórica de biogás – Escenario 2

$$m_{Biogas}^3 = 0.08 \frac{m^3}{kg} * 7.5 kg + 0.5 \frac{m^3}{kg} * 70.2 kg$$

$$m_{Biogas}^3 = 35.7 m^3 * día$$

$$m_{Biogas}^3 = 1071 m^3 * mes (30 días)$$

$$m_{Biogas}^3 = 13030.5 m^3 * año(365 días)$$

9.1.4.3. Producción teórica de biogás – Escenario 3

$$m_{Biogas}^3 = 0.08 \frac{m^3}{kg} * 2.5 kg + 0.5 \frac{m^3}{kg} * 35.1 kg$$

$$m_{Biogas}^3 = 17.75 m^3 * día$$

$$m_{Biogas}^3 = 532.5 m^3 * mes (30 días)$$

$$m_{Biogas}^3 = 6478.75 m^3 * año(365 días)$$

La proporción de metano presente en el biogás producido está directamente relacionada con el control y la estabilidad del proceso de digestión anaerobia. Variables operacionales como la relación carbono/nitrógeno (C/N), la temperatura de operación, el pH y el tiempo de retención hidráulica influyen de manera determinante en la actividad de los consorcios microbianos responsables de las etapas de acidogénesis y metanogénesis, afectando así la composición final del biogás generado [71]. Un desequilibrio en estos parámetros puede provocar acumulación de ácidos grasos volátiles o inhibición por amonio, reduciendo la eficiencia del proceso y disminuyendo la fracción de metano en el gas producido [72].

De acuerdo con la literatura especializada, el contenido de metano en el biogás obtenido a partir de residuos orgánicos se encuentra típicamente en un rango entre 50 % y 70 %, dependiendo tanto de la naturaleza del sustrato como de las condiciones de operación del biodigestor [71] [73]. En sistemas mesofílicos adecuadamente estabilizados, el valor promedio suele situarse alrededor del 60 %, considerado representativo para estimaciones preliminares de diseño y evaluación energética [71].

Para el desarrollo del presente estudio, se adoptó un valor conservador del 60 % de metano en el biogás producido. Este criterio es ampliamente utilizado en estudios de factibilidad y dimensionamiento de sistemas de aprovechamiento energético, ya que permite realizar estimaciones comparables del potencial energético del biogás sin sobreestimar su rendimiento [73]. La adopción de un valor promedio facilita además la evaluación técnica

preliminar del sistema propuesto, manteniendo coherencia con referencias internacionales y lineamientos de diseño.

En la Tabla 10 se presentan los cálculos correspondientes a cada escenario evaluado, incluyendo el volumen total de biogás producido, el volumen estimado de metano puro y su respectivo potencial energético. Estos resultados constituyen un insumo fundamental para el dimensionamiento del sistema de aprovechamiento energético propuesto, así como para la evaluación de su viabilidad técnica y económica.

Tabla 10. Escenarios de producción estimada de biogás y metano según masa diaria

Tiempo diario	Masa total de la mezcla (kg)	Biogás	Metano (m ³)
Escenario 1	162.49	82.85	49.71
Escenario 2	70.2	35.7	21.42
Escenario 3	35.1	17.75	10.65

Fuente: Elaboración propia.

9.1.4.4. Energía disponible a partir del metano teórico

$$PCI = 33.873.1 \frac{kJ}{m^3} = 32.104,5 \frac{Btu}{m^3}, (\text{Recordando que } 1 \text{ kJ} \approx 0.9478 \text{ Btu})$$

$$\text{Escenario 1: } 49.71 \text{ m}^3 * 32.104,5 \frac{Btu}{m^3} = 1.596.000 \frac{Btu}{\text{día}}$$

$$\text{Escenario 2: } 21.42 \text{ m}^3 * 32.104,5 \frac{Btu}{m^3} = 688.000 \frac{Btu}{\text{día}}$$

$$\text{Escenario 3: } 10.65 \text{ m}^3 * 32.104,5 \frac{Btu}{m^3} = 342.000 \frac{Btu}{\text{día}}$$

9.2. Cálculo de cargas térmicas

El proyecto se desarrolló con base en la necesidad de refrigerar una cava de frutas y verduras, replicando en tamaño y funcionamiento la ubicada en la sede Alameda del supermercado de cadena Surtifamiliar. El propósito principal fue determinar la viabilidad técnica del sistema, comparando la demanda energética requerida para conservar los productos con la capacidad de generación de frío de un ciclo de refrigeración por absorción alimentado con biogás.

Para calcular las cargas térmicas del sistema, se consideraron los siguientes parámetros:

- **Condiciones de transporte:** Las frutas y verduras son transportadas en vehículos sin sistema de refrigeración, provenientes de diversos proveedores. Esto genera una alta ganancia térmica inicial y un diferencial significativo de temperatura con respecto al ambiente controlado de la cava.
- **Respiración de los productos:** Los productos vegetales continúan su proceso biológico de respiración postcosecha, lo cual implica una liberación constante de calor. Este fenómeno fue incorporado en los cálculos térmicos.
- **Condiciones internas de conservación:** La cava mantiene una temperatura de 5 °C y una humedad relativa del 95 %, condiciones óptimas para la conservación de frutas y verduras.
- **Condiciones externas:** El ambiente adyacente al cuarto presenta una temperatura de 32 °C y una humedad relativa del 60 %, lo que representa un reto adicional para el aislamiento térmico.
- **Dimensiones del espacio:** El volumen interno del cuarto refrigerado es de 108 m³, con dimensiones de 6 m de largo, 4 m de ancho y 3 m de alto.

9.2.1. Ganancia de calor por paredes

Actualmente, todas las superficies del cuarto refrigerado (incluidos el piso y el techo) están aisladas con poliuretano expandido, con un espesor de 0,1 metros, según las especificaciones del arquitecto responsable del diseño. Este aislamiento es fundamental para minimizar las pérdidas térmicas y mejorar la eficiencia del sistema de refrigeración.

$$Q_{Pared} = U_{Pared} * A_{Pared} * \Delta T \quad (5)$$

Donde:

$$Q_{Pared} = \text{Transferencia de calor en } \frac{Btu}{h}$$

$$U_{Pared} = \text{Coeficiente global de transferencia de calor en } \frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F}$$

$A_{pared} = \text{Área de la superficie en } ft^2$

$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del cuarto en } ^\circ F$

Para calcular el coeficiente global de transferencia de calor en las paredes se utiliza:

$$U_{pared} = \frac{1}{R_t}, \text{ Donde } R_t \text{ es resistencia total del sistema en } \frac{h * ft^2 * ^\circ F}{Btu}$$

Donde:

$$R_t = \frac{e}{k}, \text{ Donde } e \text{ es el espesor de la pared en pulgadas}$$

$$k = \text{Es la conductividad termica del aislante termico en } \frac{Btu}{h * ft^2 * \frac{^\circ F}{in}}$$

Según el Manual de Refrigeración COPELAND, específicamente la Tabla 7 de factores de cálculo rápido para la transmisión de calor a través de paredes aisladas, se adopta un valor de conductividad térmica del poliuretano expandido de $k = 0,17$. Con base en esta información y considerando que el espesor del aislamiento es de 0,1 metros, equivalente a 3,94 pulgadas, se procede al cálculo de la resistencia térmica total R_t , necesaria para determinar el coeficiente global de transferencia de calor U .

$$R_t = \frac{e}{k} = \frac{3.94}{0.17} = 23.17 \frac{h * ft^2 * ^\circ F}{Btu}$$

$$U_{pared} = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{23.17} = 0.0431 \frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F}$$

El valor obtenido de $U=0,0431$ corresponde a un coeficiente global de transferencia de calor bajo, lo que indica que la pared presenta una alta resistencia térmica. En términos prácticos, esto significa que el aislamiento instalado (poliuretano expandido con un espesor de 0,1 metros) resulta eficiente para reducir la ganancia de calor desde el ambiente externo hacia el interior del cuarto refrigerado.

El cuarto refrigerado tiene forma de paralelepípedo, lo que permite agrupar sus paredes en dos pares con dimensiones iguales:

- **Pared Norte y Pared Sur:** presentan las mismas dimensiones.
- **Pared Oriente y Pared Occidente:** también comparten dimensiones; sin embargo, la pared Oriente incluye una puerta, por lo que su área efectiva de transferencia de calor es menor.

Para los cálculos térmicos, el área de cada pared se determina mediante la expresión:

$$A_{pared} = Longitud * Altura \quad (6)$$

Las dimensiones del cuarto son:

- **Longitud:** 6 m
- **Ancho:** 4 m
- **Altura:** 3 m

Con base en estas dimensiones, se obtienen las siguientes áreas:

$$A_{PNorte} = A_{PSur} = 4 \text{ m} * 3 \text{ m} = 12 \text{ m}^2 = 129.17 \text{ ft}^2$$

$$A_{POccidente} = 6 \text{ m} * 3 \text{ m} = 18 \text{ m}^2 = 193.75 \text{ ft}^2$$

$$A_{PORiente} = (6 \text{ m} * 3 \text{ m}) - (\text{Área puerta}) = (18 \text{ m}^2) - (2 \text{ m}^2) = 16 \text{ m}^2 = 172.22 \text{ ft}^2$$

Ninguna de las superficies del cuarto frío está en contacto directo con fuentes de calor, como maquinaria operativa, ni expuesta a radiación solar. Por lo tanto, se descartan las correcciones por radiación térmica en las paredes del recinto, lo que simplifica el análisis de carga térmica. A partir de esta condición, se procede al cálculo del diferencial de temperatura entre el ambiente interno y externo del cuarto, utilizando los valores previamente establecidos:

Este diferencial térmico será utilizado en los cálculos de transferencia de calor para cada superficie del cuarto refrigerado.

$$\Delta T = T_{ext} - T_{int} \quad (7)$$

Donde:

$$T_{ext} = \text{Temperatura al exterior del cuarto.}$$

$$T_{int} = \text{Temperatura al interior del cuarto.}$$

Los valores obtenidos en la medición en la sede Alameda de Surtifamiliar, específicamente en la cava fueron los siguientes:

$$T_{ext} = 32\text{ }^{\circ}\text{C} = 89.6\text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$T_{int} = 5\text{ }^{\circ}\text{C} = 41\text{ }^{\circ}\text{F}$$

Entonces,

$$\Delta T = 89.6 - 41 = 48.6\text{ }^{\circ}\text{F}$$

Este valor será utilizado en los cálculos de transferencia de calor para cada superficie del cuarto refrigerado.

Pared Oriente – Área (172.22 ft²)

$$Q_{Oriente} = U_{Pared} * A_{POriente} * \Delta T \quad (8)$$

$$Q_{Oriente} = \left(0.0431 \frac{\text{Btu}}{\text{h} * \text{ft}^2 * ^{\circ}\text{F}} \right) * (172.22 \text{ ft}^2) * (48.6\text{ }^{\circ}\text{F})$$

$$Q_{Oriente} = 361.74 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Pared Occidente – Área (193.75 ft²)

$$Q_{Occidente} = U_{Pared} * A_{POccidente} * \Delta T \quad (9)$$

$$Q_{Occidente} = \left(0.0431 \frac{\text{Btu}}{\text{h} * \text{ft}^2 * ^{\circ}\text{F}} \right) * (193.75 \text{ ft}^2) * (48.6\text{ }^{\circ}\text{F})$$

$$Q_{Occidente} = 406.84 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Pared Norte y Sur – Área (129.17 ft²)

$$Q_{NS} = U_{Pared} * A_{PNorte} * \Delta T = U_{Pared} * A_{PSur} * \Delta T \quad (10)$$

$$Q_{NS} = \left(0.0431 \frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right) * (129.17 ft^2) * (48.6 ^\circ F)$$

$$Q_{NS} = 270.56 \frac{Btu}{h}$$

Para hallar el total del calor proveniente de las paredes se suman todas las anteriores:

$$Q_{Total} = Q_{Oriente} + Q_{Occidente} + 2(Q_{NS}) \quad (11)$$

$$Q_{Total} = (361.74 + 406.84 + 2(270.56)) \frac{Btu}{h}$$

$$Q_{Total} = 1,309.70 \frac{Btu}{h}$$

9.2.2. Ganancia de calor por el piso

El cálculo de la ganancia de calor a través del piso utiliza la fórmula anteriormente presentada, considerando las propiedades térmicas específicas de este elemento constructivo. Dado que su composición difiere de la de las demás superficies, debido a los materiales que lo conforman, la expresión se adapta en función de dichas características. Por tanto, la fórmula quedaría de la siguiente manera:

$$Q_{Piso} = U_{Piso} * A_{Piso} * \Delta T \quad (12)$$

Donde:

$$A_{Piso} = 6 m * 4 m = 24 m^2 = 258.33 ft^2$$

$$\Delta T = T_{ext} - T_{int}$$

$$T_{ext} = 24 ^\circ C = 75.2 ^\circ F, \text{ Valor promedio obtenido en el exterior de la cava de Surtifamiliar}$$

$$T_{int} = 5 ^\circ C = 41 ^\circ F$$

$$\Delta T = 75.2^{\circ}F - 41^{\circ}F = 34.2^{\circ}F$$

De acuerdo con las referencias Principios de la Refrigeración (R. Warren Marsh, p. 105) y el Manual de Refrigeración COPELAND (p. 18-6), es posible determinar las propiedades térmicas de los materiales que conforman el piso del cuarto refrigerado. Estas propiedades dependen de la configuración y el espesor de cada una de las capas que integran el sistema constructivo, el cual generalmente está compuesto por cuatro niveles:

- Concreto como base estructural inferior.
- Poliuretano expandido como material aislante térmico.
- Concreto como segunda base estructural.
- Acabado en granito, que proporciona resistencia mecánica y acabado superficial.

Con base en la ecuación del coeficiente global de transferencia de calor, se procede a calcular la resistencia térmica equivalente del sistema multicapa, considerando el aporte individual de cada capa que compone el piso.

$$U_{Piso} = \frac{1}{R_t}, \text{ donde } R_t \text{ es la resistencia termica total}$$

$$R_t = \frac{e}{k_1} + \frac{e}{k_2} + \dots + \frac{e}{k_n}, \text{ donde } e \text{ es el espesor del material en pulgadas}$$

$$\text{y } k \text{ es la conductividad termica de los materiales en } \frac{Btu}{h * ft^2 * \frac{^{\circ}F}{in}}$$

Tabla 11. Propiedades térmicas y espesores de las capas de material

Material	Conductividad ($\frac{Btu}{h * ft^2 * \frac{^{\circ}F}{in}}$)	Espesor (Pulgadas)
Granito	1.3	0.50
Concreto (2da. Base)	1.1	3
Poliuretano expandido	0.17	4
Concreto (1ra. Base)	1.1	4

Fuente: Elaboración propia.

Con base a los datos obtenidos de la tabla, formulamos:

$$R_t = \frac{0.50}{1.3} + \frac{3}{1.1} + \frac{4}{0.17} + \frac{4}{1.1} = 30.28^{\circ}F * ft^2 * \frac{h}{Btu}$$

$$U_{Piso} = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{30.28} = 0.0330 \frac{Btu}{h * ft^2 * ^{\circ}F}$$

Por lo tanto, la ganancia de calor a través del piso de la cava de Surtifamiliar es:

$$Q_{Piso} = \left(0.0330 \frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right) * (258.33 ft^2) * (34.2 ^\circ F)$$

$$Q_{Piso} = 291.80 \frac{Btu}{h}$$

9.2.3. Ganancia de calor por el techo

La ganancia de calor debido al techo de la cava se obtuvo mediante la fórmula:

$$Q_{Techo} = U_{Techo} * A_{Techo} * \Delta T \quad (13)$$

Donde:

$$Q_{Techo} = \text{Ganancia de calor por el techo} \frac{Btu}{h}$$

$$U_{Techo} = \text{Coeficiente global de transferencia de calor.}$$

$$A_{Techo} = \text{Área perpendicular al flujo de calor.}$$

$$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura entre el interior y exterior del cuarto.}$$

El coeficiente U es:

$$U_{Techo} = \frac{1}{R_t} ; R_t = \frac{e}{k}$$

$$R_t = \frac{e}{k} = \frac{4}{0.17} = 23.52; \text{Valor de } k \text{ y } e \text{ obtenido de los calculos anteriores}$$

$$U_{Techo} = \frac{1}{23.52} = 0.0425 \frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F}$$

El área del techo es:

$$A_{Techo} = 6 m * 4 m = 24 m^2 = 258.33 ft^2$$

La diferencia de temperatura es:

$$\Delta T = T_{ext} - T_{int}$$

$$T_{ext} = 32 ^\circ C = 89.6 ^\circ F; \text{Valor obtenido en el exterior de la cava de Surtifamiliar}$$

$$T_{int} = 5\text{ }^{\circ}\text{C} = 41\text{ }^{\circ}\text{F}$$

Entonces,

$$\Delta T = 89.6 - 41 = 48.6\text{ }^{\circ}\text{F}$$

Por lo tanto, la ganancia de calor debido al techo es:

$$Q_{Techo} = 0.0425 \frac{Btu}{h * ft^2 * ^{\circ}\text{F}} * 258.33\text{ }ft^2 * 48.6^{\circ}\text{F} = 533.58 \frac{Btu}{h}$$

9.2.4. Ganancia de calor por cambio en el aire

Este cálculo se refiere a la pérdida de frío a través de la puerta de la cava durante los períodos en que permanece abierta para la entrada o salida de productos.

Dimensiones de la puerta

$$\text{Ancho de la puerta} = A_{puerta} = 1\text{ }m = 3.28\text{ }ft$$

$$\text{Altura de la puerta} = H_{puerta} = 2\text{ }m = 6.56\text{ }ft$$

Dimensiones de la cava

$$\text{Ancho de la cava} = A_{cuarto} = 4\text{ }m = 13.12\text{ }ft$$

$$\text{Alto de la cava} = L_{cuarto} = 6\text{ }m = 19.68\text{ }ft$$

$$\text{Altura de la cava} = H_{cuarto} = 3\text{ }m = 9.84\text{ }ft$$

Volumen interior

$$V = 72\text{ }m^3 = 2543.22\text{ }ft^3$$

Temperaturas

$$T_{int} = 5\text{ }^{\circ}\text{C} = 41\text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$T_{ext} = 32\text{ }^{\circ}\text{C} = 89.6\text{ }^{\circ}\text{F}$$

Humedad Relativa: 60%

Numero de cambios de aire: Según el *Manual de Fundamentos de ASHRAE (1967)*, Tabla 21-10, interpolando para un volumen de 72 m^3 , se obtiene 10.64 cambios de aire por cada 24 horas.

Volumen infiltrado

$$V_{\text{infiltrado}} = 2543.22 \text{ ft}^3 * 10.64 = 27059.86 \frac{\text{ft}^3}{24h}$$

Factor de calor sensible

De acuerdo con la tabla 21-11 del *Manual ASHRAE*, para $T_{\text{int}} = 41^\circ\text{F}$, $T_{\text{ext}} = 89.6^\circ\text{F}$ y humedad relativa exterior del 60%, se obtiene:

$$\text{Factor} = 1.92 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^3}$$

9.2.5. Carga debida al producto

En los productos perecederos se presentan dos tipos de carga, la carga debida al cambio de temperatura y la carga debida al calor de respiración de los productos.

9.2.5.1. Carga debido al cambio de temperatura

Este cálculo corresponde a la cantidad de calor que debe extraerse del producto para reducir su temperatura desde el momento en que es descargado del proveedor hasta alcanzar la temperatura de conservación en el cuarto refrigerado.

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$Q = W * C_p * (T_{\text{Producto}} - T_{\text{Cuarto}}) \quad (14)$$

Donde:

$$Q = \text{Calor que debe extraerse en } \frac{\text{Btu}}{24 \text{ h}}$$

$$W = \text{Peso del producto en libras (lb)}$$

$$C_p = \text{Calor especifico por encima de la congelación en } \frac{\text{Btu}}{\text{lbs} * ^\circ\text{F}}$$

$$T_{Producto} = \text{Temperatura de llegada del producto dado en } ^\circ F$$

$$T_{Cuarto} = \text{Temperatura deseada en el cuarto de refrigeración dado en } ^\circ F$$

Este análisis se realizó para 12 tipos de verduras y 5 tipos de frutas, utilizando información suministrada por la empresa. Para el cálculo se consideraron los siguientes datos: temperatura de llegada (registrada desde planta), peso diario promedio (proporcionado por el analista de datos de Surtifamiliar) y calor específico por encima del punto de congelación.

Tabla 12. Propiedades térmicas y condiciones iniciales de frutas y verduras para cálculo de carga térmica

Producto			Calor específico	
Nombre	Peso	Temperatura de llegada	Arriba punto de congelación	Abajo punto de congelación
	kg	°C	$\frac{Btu}{lb * ^\circ F}$	
Tomate Chonto	220	23	0.95	0.48
Lechuga Batavia	218	23	0.96	0.48
Zanahoria	78	23	0.90	0.46
Papa Amarilla	71	25	0.82	0.43
Lulo	46	24	0.90	0.46
Pepino	37	23	0.97	0.49
Tomate de Arbol	35	23	0.95	0.48
Yuca	28	25	0.82	0.43
Manzana	27	24	0.88	0.45
Cebolla Larga	26	25	0.90	0.46
Habichuela	26	24	0.86	0.45
Pimentón	25	23	0.94	0.48
Apio	21	23	0.95	0.48
Brócoli	18	23	0.92	0.47
Remolacha	11	24	0.90	0.47
Pera	11	23	0.86	0.45

Fuente: Elaboración propia.

Basándose en la tabla y procediendo a realizar los cálculos.

Tomate	$Q = \left(220 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.95 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (73.4^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 14,928.67 \text{ Btu}$
Lechuga Batavia	$Q = \left(218 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.95 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (73.4^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 14,948.67 \text{ Btu}$
Zanahoria	$Q = \left(78 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.90 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (73.4^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 5014,32 \text{ Btu}$
Papa amarilla	$Q = \left(71 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.82 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (77^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 4610,57 \text{ Btu}$
Lulo	$Q = \left(46 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.90 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (75.2^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 3126,83 \text{ Btu}$
Pepino	$Q = \left(40 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.97 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (73.4^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 2767,53 \text{ Btu}$
Tomate de árbol	$Q = \left(35 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.95 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (73.4^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 2373,63 \text{ Btu}$
Yuca	$Q = \left(28 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.82 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (77^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 1820,84 \text{ Btu}$
Manzana	$Q = \left(27 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.88 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (75.2^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 1790,91 \text{ Btu}$
Cebolla larga	$Q = \left(26 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.90 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (77^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 1857.34 \text{ Btu}$
Habichuela	$Q = \left(26 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.86 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (75.2^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 1684.94 \text{ Btu}$
Pimentón	$Q = \left(26 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.94 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (77^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 1939.56 \text{ Btu}$
Apio	$Q = \left(21 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.95 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (73.4^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 1420.93 \text{ Btu}$
Brócoli	$Q = \left(18 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.92 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (73.4^{\circ}\text{F} - 41^{\circ}\text{F})$ $Q = 1183.08 \text{ Btu}$

$$\begin{aligned}
 & \text{Remolacha} \quad Q = \left(11 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.90 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (75.2^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F}) \\
 & \quad \quad \quad Q = 745,51 \text{ Btu} \\
 & \text{Pera} \quad Q = \left(11 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.86 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (73.4^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F}) \\
 & \quad \quad \quad Q = 674,94 \text{ Btu} \\
 & \text{Otros} \quad Q = \left(200 \text{ kg} * 2.204 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * 0.90 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} * (77^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F}) \\
 & \quad \quad \quad Q = 14279,76 \text{ Btu} \\
 & \quad \quad \quad Q = 75168.03 \text{ Btu} = \frac{75168.03}{24} \approx 3132.00 \frac{\text{Btu}}{\text{hora}}
 \end{aligned}$$

Recopilando todos los resultados, tenemos:

Tabla 13. Resultados cambio por temperatura

Resultados		
Producto	Peso (kg)	Calor generado (Btu)
Apio	21	1420.93
Brócoli	18	1183.08
Cebolla	26	1857.34
Habichuela	26	1684.94
Lechuga	218	14948.67
Lulo	46	3126.83
Manzana	27	1790.91
Papa	71	4610.57
Pepino	40	2767.53
Pera	11	674.94
Pimentón	26	1939.56
Remolacha	11	745.51
Tomate	220	14298.67
Tomate de árbol	35	2373.63
Yuca	28	1820.84
Zanahoria	78	5014.32
Otros	200	14279.76
Total	1.102	77.541.66

Fuente: Elaboración propia.

9.2.5.2. Carga debido al calor de respiración

En la conservación de frutas y verduras es fundamental considerar que se trata de materia viva, la cual está sujeta a procesos fisiológicos durante su almacenamiento. Uno de los más relevantes es la respiración, proceso mediante el cual el oxígeno del aire se combina con el carbono presente en los tejidos del producto, generando energía en forma de calor.

Este calor de respiración representa una carga térmica adicional que debe ser considerada en el cálculo total de refrigeración, ya que influye directamente en el diseño y eficiencia del sistema de conservación.

La carga total por calor de respiración se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 Q_{rtotal} &= Q_{r1} + Q_{r2} \\
 Q_{r1} &= t_{rT} * W * Q_{rt} \\
 Q_{rt} &= \sum \frac{Q_{r1}}{N_d} \\
 Q_{r2} &= t_{ra} * W * Q_{ra}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Donde:

$$Q_{rtotal} = \text{Calor de respiración total dado en } \frac{\text{Btu}}{h}$$

$$Q_{r1} = \text{Calor de respiración durante el tiempo de reducción de temperatura dado en } \frac{\text{Btu}}{h}$$

$$Q_{r2} = \text{Calor de respiración despues de obtener la temperatura de almacenamiento dado en } \frac{\text{Btu}}{h}$$

$$Q_{rt} = \text{Calor de respiración promedio a distintas temperaturas dado en } \frac{\text{Btu}}{h}$$

$$Q_{ra} = \text{Calor de respiración a la temperatura de almacenamiento dado en } \frac{\text{Btu}}{h}$$

$$t_{rT} = \text{Tiempo de reducción de temperatura desde que llega hasta la temperatura de conservación}$$

$$t_{ra} = \text{Tiempo despues de obtenida la temperatura de almacenamiento en dias.}$$

$$W = \text{Peso del producto en toneladas.}$$

$$N_d = \text{Numero de temperaturas de respiración.}$$

Tabla 14. Parámetros de respiración y energía térmica de frutas y verduras

Producto			Vatios/Tonelada			
Nombre	Peso (kg)	Temperatura de llegada (°C)	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C
Tomate Chonto	220	23	17	26	43	66
Lechuga Batavia	218	23	48	71	92	149
Zanahoria	78	23	46	58	93	117
Papa Amarilla	71	25	-	17-20	20-30	20-35
Lulo	46	24	-	-	-	-
Pepino	37	23	17	22	37	40
Tomate de árbol	35	23	-	-	-	59-71
Yuca	28	25	-	-	-	-
Manzana	27	24	10-12	15-21	41-61	41-92
Cebolla Larga	26	25	31-66	51-201	107-174	195-288
Habichuela	26	24	-	101-103	161-172	251-276
Pimentón	25	23	23	31	57	63
Apio	21	23	21	32	58-81	110
Brócoli	18	23	59-65	95-106	225-25	473-532
Remolacha	11	24	16-21	27-28	35-40	50-69
Pera	11	23	8-20	15-46	23-63	45-159

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad máxima del cuarto es alrededor de 3 toneladas, los cuales se dividen entre los 16 productos anteriores, los cuales son los que tienen un mayor porcentaje de entrada en el cuarto dado su rotación.

El calor por el cambio de temperatura es de:

Tomate Chonto

$$Q = \left(0.220 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * \frac{66 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 1654.55 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.600 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) * \frac{26 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 54.86 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Lechuga Batavia

$$Q = \left(0.218 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{149 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 3701.31 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.600 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{71 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 149.82 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Zanahoria

$$Q = \left(0.078 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{117 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 1039.91 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.200 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{58 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 40.80 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Papa Amarilla

$$Q = \left(0.071 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{30 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 242.71 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.150 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{17 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 9.97 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Lulo

$$Q = \left(0.046 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{50 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 262.08 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.100 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{20 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 7.03 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Pepino

$$Q = \left(0.040 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{149 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 679.14 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.100 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{22 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 7.74 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Tomate de árbol

$$Q = \left(0.035 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{65 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 259.24 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.100 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{25 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 8.79 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Yuca

$$Q = \left(0.028 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{30 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 95.72 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.090 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{17 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 5.38 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Manzana

$$Q = \left(0.027 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{70 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 215.36 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.090 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{21 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42 ^\circ\text{F} - 41 ^\circ\text{F})$$

$$Q = 6.65 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Cebolla Larga

$$Q = \left(0.026 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{260 * 12000 \frac{\text{Btu}}{h}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{W} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{W}} * (73.4 ^\circ F - 41 ^\circ F)$$

$$Q = 770.3 \frac{\text{Btu}}{h}$$

$$Q = \left(0.090 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{201 * 12000 \frac{\text{Btu}}{h}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{W} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{W}} * (42 ^\circ F - 41 ^\circ F)$$

$$Q = 63.62 \frac{\text{Btu}}{h}$$

Habichuela

$$Q = \left(0.026 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{260 * 12000 \frac{\text{Btu}}{h}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{W} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{W}} * (73.4 ^\circ F - 41 ^\circ F)$$

$$Q = 770.3 \frac{\text{Btu}}{h}$$

$$Q = \left(0.080 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{103 * 12000 \frac{\text{Btu}}{h}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{W} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{W}} * (42 ^\circ F - 41 ^\circ F)$$

$$Q = 28.97 \frac{\text{Btu}}{h}$$

Pimentón

$$Q = \left(0.026 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{63 * 12000 \frac{\text{Btu}}{h}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{W} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{W}} * (73.4 ^\circ F - 41 ^\circ F)$$

$$Q = 186.65 \frac{\text{Btu}}{h}$$

$$Q = \left(0.080 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{31 * 12000 \frac{\text{Btu}}{h}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{W} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{W}} * (42 ^\circ F - 41 ^\circ F)$$

$$Q = 8.72 \frac{\text{Btu}}{h}$$

Apio

$$Q = \left(0.021 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{110 * 12000 \frac{\text{Btu}}{h}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{W} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{W}} * (73.4 ^\circ F - 41 ^\circ F)$$

$$Q = 263.22 \frac{\text{Btu}}{h}$$

$$Q = \left(0.060 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{32 * 12000 \frac{\text{Btu}}{h}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{W} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{W}} * (42 ^\circ F - 41 ^\circ F)$$

$$Q = 6.75 \frac{\text{Btu}}{h}$$

Brócoli

$$Q = \left(0.018 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{500 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F})$$

$$Q = 1025.55 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.060 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{106 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F})$$

$$Q = 22.37 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Remolacha

$$Q = \left(0.011 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{59 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F})$$

$$Q = 73.95 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.50 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{59 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F})$$

$$Q = 18.64 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Pera

$$Q = \left(0.011 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{100 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F})$$

$$Q = 125 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.50 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{90 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F})$$

$$Q = 15.83 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Otros

$$Q = \left(0.200 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{100 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (73.4^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F})$$

$$Q = 2278.99 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = \left(0.500 \text{ kg} * 2.2046 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}\right) * \frac{35 * 12000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{W}} * 2204.62 \frac{\text{Btu}}{\text{W}}} * (42^\circ\text{F} - 41^\circ\text{F})$$

$$Q = 61.55 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Siendo recopilada en la siguiente tabla:

Tabla 15. Calor de respiración frutas y verduras

Producto	$Q_{r1} \left(\frac{Btu}{h} \right)$	$Q_{r2} \left(\frac{Btu}{h} \right)$
Tomate Chonto	1654,55	54,86
Lechuga Batavia	3701,30	149,82
Zanahoria	1039,91	40,80
Papa Amarilla	242,71	9,97
Lulo	262,08	7,03
Pepino	679,14	7,74
Tomate de árbol	259,24	8,79
Yuca	95,72	5,38
Manzana	215,36	6,65
Cebolla larga	770,30	63,62
Habichuela	770,30	28,97
pimentón	186,65	8,72
Apio	263,22	6,75
Brócoli	1025,55	22,37
Remolacha	73,95	18,64
Pera	125,00	15,83
Otros	2278,99	61,55
Total	13643,97	517,49

Fuente: Elaboración propia.

Entonces, la carga generada a partir del calor de respiración se calculó de la siguiente forma:

$$Q_{rtotal} = Q_{r1} + Q_{r2}$$

$$Q_{rtotal} = 13643.97 \frac{Btu}{h} + 517.49 \frac{Btu}{h}$$

$$Q_{rtotal} = 14161.46 \frac{Btu}{h} = 339875.04 \frac{Btu}{día}$$

El valor obtenido en $\frac{Btu}{h}$ se convierte al sistema internacional empleando el factor previamente definido en la sección 9.2.1, garantizando consistencia en los resultados.

$$Q_{total} = 14.161.46 \frac{Btu}{h} = 4.149,78 W = 4.1 kW$$

9.2.6. Cargas suplementarias

9.2.6.1. Iluminación eléctrica

El cuarto frío cuenta con 4 lámparas a prueba de vapor y humedad, cada una con una potencia de 150 W. el calor generado por cada lampara se calcula considerando que 1 W es igual a $3.41 \frac{Btu}{h}$.

$$Q_{Lampara} = Potencia * 3.41 \frac{Btu}{h} * h_f \quad (16)$$

Donde:

$Q_{Lampara}$ = Calor generado por cada lampara dado en $\frac{Btu}{h}$

Potencia = Potencia en Vatios de la lampara.

h_f = Horas de funcionamiento.

Entonces,

$$Q_{Lampara} = \frac{150 W * 3.41 * 8}{24} = 170.50 \frac{Btu}{h}$$

Dado que el cuarto frío dispone de cuatro lámparas instaladas, la carga térmica total asociada a la iluminación se determina multiplicando el calor generado por una lámpara individual por el número total de lámparas en funcionamiento.

$$Q_{t1} = 170.50 \frac{Btu}{h} * 4 = 682 \frac{Btu}{h}$$

9.2.6.2. Motores eléctricos

En el caso de los motores eléctricos, el análisis térmico se enfoca específicamente en la cortina de aire instalada en el acceso al cuarto frío. Esta solución es fundamental debido al flujo constante de mercancía, que implica aperturas frecuentes de la puerta y, por consiguiente, intercambio de aire entre el ambiente exterior y el interior refrigerado. La cortina de aire permite reducir las infiltraciones, disminuyendo así las pérdidas de temperatura y la carga térmica asociada.

Para el proyecto se seleccionó una cortina de aire equipada con un motor eléctrico de $\frac{3}{4}$ HP de doble eje. De acuerdo con la Tabla 11 del *Manual de Cálculo de Cargas Térmicas de ASHRAE*, este tipo de motor genera una ganancia de calor sensible aproximada de 750 Btu/h, valor comúnmente utilizado como referencia en el diseño de sistemas de refrigeración y climatización.

La expresión empleada para calcular la ganancia total de calor asociada al funcionamiento del motor es la siguiente:

$$Q_{MC} = G_M * N_M * N_U * \frac{h_f}{24} \quad (17)$$

Donde:

Q_{MC} = Ganancia de calor total por motores electricos de la cortina dado en $\frac{Btu}{h}$

G_M = Ganancia de calor por motor electrico dado en $\frac{Btu}{h}$

N_M = Número de motores por cortina.

N_U = Número de cortinas.

h_f = Horas de funcionamiento.

Entonces,

$$Q_{MC} = 750 * 1 * 1 * \frac{8}{24} = 250 \frac{Btu}{h}, \text{ representando la carga termica promedio por hora}$$

9.2.6.3. Carga por personas

En el análisis de la carga térmica del cuarto frío se consideró el régimen laboral del personal de la planta Fruver de Surtifamiliar. Según observaciones operativas, los trabajadores desarrollan actividades clasificadas como moderadamente pesadas, con desplazamientos aproximados de 3 millas por hora (mph).

De acuerdo con la Tabla 12 del *Manual de Cálculo de Cargas Térmicas de ASHRAE*, este nivel de actividad genera una ganancia de calor total por persona de 1000 Btu/h, distribuida en 375 Btu/h de calor sensible y 625 Btu/h de calor latente.

Para estimar la ganancia de calor promedio por hora atribuible a la presencia de personal en el cuarto frío, se empleó la siguiente expresión, basada en los lineamientos establecidos por ASHRAE:

$$Q_{TP} = G_P * N_P * \frac{h_d}{24} \quad (18)$$

Donde:

$$Q_{TP} = \text{Ganancia de calor total por personas en } \frac{\text{Btu}}{h}.$$

$$G_P = \text{Ganancia de calor por persona en } \frac{\text{Btu}}{h}.$$

$$N_P = \text{Número de personas.}$$

$$h_d = \text{Horas dentro del cuarto.}$$

Entonces,

$$Q_{TP} = 1000 * 2 * \frac{8}{24} = 667 \frac{\text{Btu}}{h}$$

9.2.7. Carga de refrigeración total

En la tabla siguiente se organizaron todos los resultados previamente obtenidos para realizar la sumatoria y determinar cuál es la capacidad de enfriamiento requerida. Se añade un factor de seguridad de 10 % con la intención de cubrir cualquier imprevisto, como lo dicho por el libro tratado práctico de refrigeración automática pagina 263.

Tabla 16. Carga de refrigeración total

Origen de la carga	Ganancia total de calor ($\frac{Btu}{h}$)
Paredes	1309.70
Techo	533.58
Piso	291.80
Cambio de aire	2164.78
Calor de producto	172.93
Iluminación	682
Motores eléctricos	250
Personas	667
Total	23.191,86

Fuente: Elaboración propia.

$$23.191,86 \frac{Btu}{h} * 24 \text{ horas} = 556.604,64 \frac{Btu}{\text{día}}$$

Carga térmica de la cava ($1 \text{ kW} = 3412.14 \frac{Btu}{h}$)

$$Q_e = 23.191,86 \frac{Btu}{h} = 6.79 \text{ kW}$$

9.3. Análisis termodinámico

El análisis termodinámico parte de la determinación de la cantidad de calor que debe extraerse del cuarto frío para mantener la temperatura deseada de 6 °C. Este valor, obtenido en el apartado anterior mediante el cálculo de cargas térmicas, representa la demanda energética que el sistema de refrigeración debe compensar de forma continua. Con base en esta carga térmica, se define la selección de los equipos y las condiciones operativas necesarias para asegurar el cumplimiento de los parámetros de diseño. Dado que el sistema de refrigeración propuesto opera bajo el principio de refrigeración por absorción, es fundamental determinar la cantidad de refrigerante requerida, de modo que este tenga la capacidad de absorber y remover la energía térmica calculada, garantizando así que las condiciones internas del cuarto se mantengan estables y dentro del rango especificado.

9.3.1. Cálculo de metano

Los cálculos se realizaron con base a las especificaciones de la cava, temperatura de enfriamiento igual a 6 grados Celsius y temperatura de combustión del quemador asumida igual a 1200 grados Celsius.

Para encontrar la cantidad de energía que debe proporcionar el metano para llevar a cabo el proceso, recurrimos a la fórmula de coeficiente de rendimiento que utiliza en el libro de termodinámica de Cengel, Página 643, Capítulo 11.

$$COP_{absorción} = \frac{Q_{extraído}}{Q_{suministrado}} \quad (19)$$

Donde:

COP = Coeficiente de desempeño de un sistema de refrigeración por absorción.

$Q_{extraído}$ = Cantidad de calor que el sistema logra remover del espacio refrigerado (Btu o kWh).

$Q_{suministrado}$ = Cantidad de energía térmica que se aporta al sistema.

Para llevar a cabo este cálculo, fue necesario establecer previamente un conjunto de variables fundamentales. Estas variables serán utilizadas en etapas posteriores del análisis con el objetivo de determinar la cantidad de metano requerida para alimentar el sistema de refrigeración por absorción. La correcta definición de estos parámetros garantiza que el refrigerante pueda extraer la energía térmica necesaria para mantener las condiciones deseadas dentro del cuarto frío.

- Carga térmica de la cava de 6.8 kW.
- COP del sistema de absorción amoníaco-agua igual a 0.65.
- Eficiencia del quemador igual a $\eta_q = 0.80$.
- Poder calorífico inferior del metano (PCI/LHV) - *Volumetrico*: $35.8 \frac{MJ}{Nm^3}$.

Dado que el sistema de refrigeración opera bajo el principio de absorción amoníaco-agua, se adopta un Coeficiente de Desempeño (COP) de 0,65, valor dentro del rango típico para este tipo de tecnología, que suele oscilar entre 0,6 y 0,7 según referencias especializadas.

A partir de la expresión del COP:

$$0.65 = \frac{6.8 \text{ kW}}{Q_{\text{suministrado}}}$$

$$Q_{\text{suministrado}} = \frac{6.8 \text{ kW}}{0.65}$$

$$Q_{\text{suministrado}} = 10.46 \text{ kW}$$

La energía que se debe suministrar diariamente será entonces,

$$1 \text{ kW} = 3.6 \text{ MJ}$$

$$E_s = Q_{\text{suministrado}} * 24 * 3.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}}$$

$$E_s = 10.46 \text{ kW} * 24 * 3.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}}$$

$$E_s = 903.74 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}$$

Teniendo en cuenta la eficiencia asumida en el quemador:

$$E_{CH_4} = \frac{E_s}{\eta_q} = \frac{903.74}{0.80} = 1.129.675 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}$$

A partir del volumen del poder calorífico inferior se tiene que:

$$V_{CH_4} = \frac{E_{CH_4}}{PCI_{vol}} = \frac{1.129.68 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}}{35.8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}} = 31.54 \frac{\text{Nm}^3}{\text{día}}$$

El sistema requiere $31.54 \frac{\text{Nm}^3}{\text{día}}$ de metano para operar a las condiciones establecidas.

9.3.2. Cálculo de cantidad de amoniaco

Para determinar la masa de amoníaco necesaria en un sistema de refrigeración por absorción amoniaco-agua, se parte de una energía de enfriamiento conocida y una temperatura de evaporación de 6 °C. Este proceso se fundamenta en los siguientes principios de termodinámica aplicada:

- El amoníaco puro actúa como refrigerante, evaporándose dentro del evaporador y absorbiendo calor del ambiente que se desea enfriar.
- Para que ocurra la evaporación, el amoníaco requiere una cantidad específica de energía, la cual toma del entorno refrigerado.
- Esta energía absorbida se denomina energía de enfriamiento o Q_L .
- La entalpía de vaporización (h_{fg}) representa la cantidad de energía que el amoníaco necesita por unidad de masa para pasar de estado líquido a vapor, bajo condiciones específicas de temperatura y presión.
- A una temperatura de 6 °C y presión de 1 atm, el valor típico de h_{fg} para el amoníaco es aproximadamente $1175.1 \frac{kJ}{kg}$.

Datos para tener en cuenta

Carga térmica horaria: $Q_e = 6.8 \text{ kW}$

Tiempo de operación diaria: 24 horas

Energía de enfriamiento diaria: $Q_L = 6.8 \text{ kW} * 86.400 \frac{\text{segundos}}{\text{día}} = 587.520 \frac{kJ}{\text{día}}$

Cálculo de masa de amoníaco requerida

$$Q_L = m_{NH_3} * h_{fg} \quad (20)$$

$$m_{NH_3} = \frac{Q_L}{h_{fg}}$$

$$m_{NH_3} = \frac{587.520 \frac{kJ}{día}}{1175.7 \frac{kJ}{kg}} \approx 499.7 \frac{kg}{día}$$

Para mantener una carga térmica de 6,8 kW durante 24 h, el sistema de absorción debe evaporar aproximadamente 500 kg de amoníaco por día dentro del ciclo frigorífico. Este valor representa la masa de amoníaco que participa en el proceso de evaporación-condensación, no una cantidad consumida o perdida del sistema. La estimación real del

amoníaco utilizado dentro del ciclo dependerá del equipo y las especificaciones del fabricante.

9.4. Diseño del biodigestor

9.4.1. Criterios de diseño

El diseño del biodigestor parte de la necesidad de suministrar metano al sistema de refrigeración por absorción, cuya demanda energética diaria es de $1.129.68 \frac{MJ}{\text{día}}$, equivalente a $31.54 \frac{m^3}{\text{día}}$ de metano.

Para garantizar la continuidad del proceso y cubrir posibles variaciones en la producción, se aplica un factor de seguridad del 10%, lo que eleva la demanda mínima de metano a $34.70 \frac{m^3}{\text{día}}$. Dado que el biogás contiene aproximadamente 60% de metano, el volumen total de biogás requerido es:

$$\text{Biogás total} = \frac{34.70 \frac{m^3}{\text{día}}}{0.60} = 57.83 \frac{m^3}{\text{día}}$$

9.4.2. Producción esperada de biogás

La mezcla de sustratos seleccionada está compuesta por residuos de frutas y verduras, y estiércol porcino, lo cual ha demostrado ser una combinación eficiente para la generación de biogás, debido a la adecuada relación carbono/nitrógeno y su buena degradabilidad [74] [75].

Tabla 17. Cálculo de la producción diaria de biogás y metano según masa y rendimiento de los sustratos.

Componente	Masa ()	Rendimiento Biogás ()	Producción Biogás ()	Rendimiento Metano ()	Producción Metano ()
Frutas y verduras	113	0,50	56,5	0,60	33,9
Estiércol Porcino	20	0,08	1,6	0,60	0,96
Total	133	-	58.1	-	34.86

Fuente: Adaptado de [76] [77].

Para operar el biodigestor con un factor de seguridad de poco más del 10% de la cantidad del metano requerido diariamente por el sistema de refrigeración, el biorreactor debe alimentarse con aproximadamente 133 kilogramos de material orgánico.

9.4.3. Parámetros operativos

Para el diseño del biorreactor se establecen los siguientes parámetros operativos comunes en sistemas de biodigestores:

- **Sólidos totales (TS) objetivo:** 10 %
- **Agua añadida:** 130 kg/día (para dilución y mantenimiento de condiciones óptimas)
- **Tiempo de retención hidráulica (TRH):** 30 días (tiempo que permanece el sustrato en el biodigestor)

Estos valores permiten calcular la carga y el volumen necesarios para mantener condiciones estables en el proceso de digestión.

9.4.4. Cálculo del caudal de alimentación

El caudal total de alimentación al biodigestor se calcula sumando la masa diaria de residuos orgánicos y agua, y multiplicándola por el tiempo de retención hidráulica:

$$Q_{alimentación} = (133 + 20 + 130) * 30 = 283 * 30 = 8.490 \frac{kg}{mes} \quad (21)$$

9.4.5. Estimación del volumen de mezcla

Para determinar el volumen del sustrato dentro del biodigestor, se utiliza la densidad promedio de cada componente:

Tabla 18. Masa, densidad y volumen diario de los componentes del sustrato para el biodigestor.

Componente	Masa ($\frac{kg}{día}$)	Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)	Volumen ($\frac{m^3}{día}$)
Frutas y verduras	133	950	0.140
Estiércol porcino	20	1040	0.0192
Agua	130	998	0.130
Total	283	-	0.2892

Fuente: Adaptado de [78], [79].

El volumen mensual de mezcla será el resultado de multiplicar el total diario por treinta, considerando que este número representa todos los días de un mes completo.

$$0.2892 * 30 = 8.68 \frac{m^3}{mes}, \text{ espacio ocupado por la mezcla liquida dentro del biodigestor}$$

9.4.6. Volumen mínimo del biodigestor

Considerando que el 80 % del volumen del biodigestor está destinado a la fase líquido- sólido y el 20 % a la fase gaseosa, se calcula el volumen mínimo requerido para contener la mezcla:

$$V_{minimo} = \frac{8.68}{0.8} = 10.85 m^3$$

El volumen destinado a la fase gaseosa es:

$$V_{gaseoso} = 10.85 * 0.20 = 2.17 m^3$$

Estos valores aseguran un espacio adecuado para la acumulación de biogás y para mantener las condiciones óptimas del proceso.

Se tiene entonces que el volumen mínimo que debe tener el biodigestor para operar correctamente será de $10.85 m^3$ con un $8.68 m^3$ de mezcla sólido-líquida y el restante en fase gaseosa de $2.17 m^3$.

9.4.7. Propuesta de biodigestor

Se propone un biodigestor tubular flexible con las siguientes dimensiones, longitud 4 m y diámetro 2 m, dada la facilidad de acceder a él en el mercado. El volumen total disponible se calcula como: $V = \pi * r^2 * h = \pi * (1)^2 * (4) = 12.57 m^3$

Con respecto al volumen mínimo calculado, el biodigestor está operando aproximadamente al 86,32%. Esto indica que hay un margen de volumen pequeño para incrementar la carga o adaptar el proceso en caso de que haya más generación de residuos orgánicos que el esperado por el sistema.

Un biodigestor tubular flexible de estas dimensiones se estima entre los 150.000 y 200.000 pesos colombianos.

10. COMERCIALIZACIÓN DEL FERTILIZANTE

Los residuos generados tras la producción de biogás en un biodigestor representan una valiosa oportunidad para el desarrollo de alternativas económicas y ambientales sostenibles. Estos residuos, conocidos como digestato, corresponden al subproducto orgánico resultante del proceso de digestión anaerobia, mediante el cual la materia orgánica es degradada por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno, produciendo biogás como vector energético.

El digestato puede presentarse en fase líquida, sólida o como una combinación de ambas, dependiendo del tipo de biodigestor, las condiciones operativas y la naturaleza del sustrato tratado. Desde el punto de vista agronómico, este material se caracteriza por un alto contenido de nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, tales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así como por una fracción significativa de materia orgánica estabilizada, la cual contribuye a mejorar la estructura física, la capacidad de retención de agua y la fertilidad del suelo.

Adicionalmente, el digestato contiene micronutrientes como calcio (Ca), magnesio (Mg), zinc (Zn) y hierro (Fe), los cuales favorecen la actividad microbiológica del suelo y el desarrollo adecuado de los cultivos. Estas características convierten al digestato en un insumo con alto potencial para su aprovechamiento como fertilizante orgánico o enmienda del suelo, siempre que cumpla con los requisitos técnicos y normativos establecidos para su uso agrícola.

El aprovechamiento del digestato permite cerrar el ciclo de los nutrientes, reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos de origen industrial y disminuir los impactos ambientales asociados a la disposición final de residuos orgánicos. En este sentido, su utilización se alinea con los principios de la economía circular y promueve prácticas agrícolas más sostenibles, eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

10.1. Tipos de digestato

10.1.1. Digestato líquido

Este es el efluente que queda después de la digestión anaerobia. Tiene propiedades fertilizantes por su contenido de nutrientes y materia orgánica.

10.1.1.1. Características

- Rico en nitrógeno amoniacal (NH_4), fósforo (P) y Potasio (K).
- Contiene micronutrientes como calcio, magnesio, zinc y hierro.
- Alta biodisponibilidad de nutrientes.
- Puede aplicarse directamente al suelo o diluido en sistemas de fertirriego.

10.1.1.2. Usos

- Fertilizantes líquidos para cultivos como maíz, caña, pastos y hortalizas.
- Enmienda orgánica para mejorar estructura del suelo.

10.1.2. Digestato sólido

Es la fracción sólida separada del digestato, rica en materia orgánica estabilizada.

10.1.2.1. Características

- Alto contenido de carbono orgánico.
- Mejora la retención de agua y la estructura del suelo.
- Menor concentración de nutrientes que el líquido, pero más persistente en el suelo.

10.1.2.2. Usos

- Compostaje para enriquecerlo aún más.
- Aplicación directa como abono orgánico.
- Mezcla con otros residuos para formulación de biofertilizantes sólidos.

10.2. Calidad del fertilizante

La calidad del digestato depende de la mezcla utilizada y del proceso de digestión anaerobia. A continuación, se presenta una tabla con los nutrientes esperados:

Tabla 19. Parámetros químicos para un sustrato o suelo optimo

Parámetro	Valor estimado	Observación
Nitrógeno total	2-4 g/L	Alta disponibilidad como amonio
Fósforo	0.5-1 g/L	Ideal para raíces y floración
Potasio	1-3 g/L	Mejora resistencia y calidad de frutos
pH	7-8	Neutro a ligeramente alcalino
Materia Orgánica	Alta	Mejora estructura del suelo

Fuente: Elaboración propia.

La tabla presentada permite concluir que el digestato obtenido del proceso de digestión anaerobia posee características agronómicas favorables para su uso como fertilizante orgánico.

- Presenta concentraciones adecuadas de nitrógeno, fósforo y potasio, nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.
- Alta disponibilidad de nitrógeno como amonio, lo que facilita su absorción por las plantas.
- pH neutro a ligeramente alcalino, ideal para la mayoría de los cultivos, ya que no genera condiciones extremas en el suelo.
- Elevada materia orgánica, que contribuye a mejorar la estructura física del suelo, su capacidad de retención de agua y la actividad microbiana.

En conjunto, estos parámetros si se cumplen indican que el digestato no solo es una alternativa económica, sino también una opción técnicamente viable para mejorar la fertilidad del suelo y promover una agricultura más sostenible.

10.3. Producción de digestato por escenario

Se estimó que el 90% de la mezcla se convierte en digestato, distribuido en 70% líquido y 30% sólido. Partimos de los datos de la tabla 9 para estimar cuánto se genera de digestato por escenario, esta tabla da los valores máximos, mínimos y promedios, obtenidos de la base de datos proporcionada por la empresa Surtifamiliar.

Cuando se tiene en cuenta el agua calculada para lograr los niveles de humedad se tiene respectivamente: 139 litros, 49 litros y 13,1 litros.

Al sumar todos estos valores a la mezcla total se tiene entonces la siguiente tabla por escenario:

Tabla 20. Balance de masa del digestato por escenario diario

Escenario	Masa total de la mezcla (kg)	Digestato total (kg)	Digestato líquido (kg)	Digestato sólido (kg)
Alimentación de la cava	283	254.70	178.29	76.41
Escenario 1	301.7	271.53	190.10	81.30
Escenario 2	119.6	107.64	75.35	32.30
Escenario 3	48.2	43.38	30.37	13.01

Fuente: Elaboración propia.

Se toman los valores de alimentación de la cava asumiendo el caso ideal para este proyecto. En el año se podrá producir entonces aproximadamente:

$$\text{Digestato líquido: } 178.29 * 30 = 5348.7 \frac{\text{kg}}{\text{mensual}}$$

$$\text{Digestato sólido: } 76.41 * 30 = 2292.3 \frac{\text{kg}}{\text{mensual}}$$

En el presente estudio se estimó que aproximadamente el 90% del volumen total de la mezcla introducida en el biodigestor se convierte en digestato, distribuido en un 70% en fase líquida y un 30% en fase sólida. A partir de esta estimación se fundamenta una producción de aproximadamente 5348,7 kg de digestato líquido mensual que puede ser procesado para luego ser vendido como fertilizante natural y 2292,3 kg de digestato sólido mensual que puede ser transformado en abonos orgánicos.

10.4. Riesgos

10.4.1. Riesgos en la producción del digestato

10.4.1.1. Riesgos sanitarios asociados al digestato sin tratamiento adicional

Cuando el proceso de digestión anaerobia no se completa de manera adecuada, existe el riesgo de que el digestato contenga microorganismos patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. y *Listeria monocytogenes*. Estos patógenos pueden sobrevivir en el subproducto si no se alcanzan las condiciones óptimas de temperatura, tiempo de retención y estabilidad microbiológica durante el proceso.

La aplicación directa de digestato sin tratamiento adicional en cultivos alimentarios representa un riesgo sanitario significativo, especialmente en productos de consumo fresco. Por esta razón, es fundamental implementar medidas de postratamiento como compostaje, pasteurización o almacenamiento prolongado, que permitan reducir la carga microbiana y garantizar la inocuidad del fertilizante orgánico.

10.4.1.2. Riesgos agronómicos por alta concentración de nitrógeno amoniacal en el digestato

El uso de digestato con alta concentración de nitrógeno en forma amoniacal puede generar efectos adversos en los cultivos si no se controla adecuadamente la dosis de aplicación. Una aplicación excesiva puede provocar fitotoxicidad, afectando negativamente la germinación, el desarrollo radicular y el crecimiento de las plantas.

Además, el exceso de nitrógeno amoniacal puede alterar el pH del suelo, generando condiciones desfavorables para la disponibilidad de otros nutrientes y para la actividad microbiana beneficiosa. Este riesgo es especialmente relevante en suelos con baja capacidad de amortiguación o en cultivos sensibles a cambios en la acidez o alcalinidad. Por lo tanto, es fundamental realizar un análisis previo del digestato y del suelo receptor, así como ajustar la dosis de aplicación según las necesidades específicas del cultivo y las condiciones edafoclimáticas.

10.4.1.3. Impactos ambientales y perceptivos por el mal manejo del digestato

Un manejo inadecuado del digestato puede generar emisiones de olores intensos debido a la descomposición de compuestos orgánicos volátiles, especialmente cuando se expone al aire sin tratamiento o almacenamiento adecuado. Estos olores no solo afectan el entorno inmediato, sino que también pueden generar molestias en comunidades cercanas y afectar la aceptación del producto.

Además, el digestato mal gestionado puede atraer insectos, roedores y otras plagas, lo que representa un riesgo sanitario y logístico, especialmente en zonas de producción agrícola o comercialización. En el contexto de venta en supermercados, estos factores pueden afectar negativamente la percepción del producto, comprometiendo su aceptación por parte de los consumidores y su viabilidad comercial.

Por lo tanto, es fundamental implementar buenas prácticas de manejo, como el almacenamiento en condiciones controladas, el uso de envases herméticos y la aplicación en momentos adecuados, para garantizar tanto la calidad del fertilizante como su aceptación en el mercado.

10.4.1.4. Problemas de almacenamiento

El manejo adecuado del digestato es fundamental para preservar su calidad agronómica y evitar impactos ambientales. En el caso del digestato líquido, se recomienda su almacenamiento en tanques herméticos, con el fin de prevenir procesos de fermentación secundaria que puedan generar gases, olores desagradables y pérdida de nutrientes volátiles como el amonio.

Por otro lado, el digestato sólido debe almacenarse en condiciones secas y protegidas de la lluvia, para evitar procesos de lixiviación, que pueden provocar la pérdida de nutrientes esenciales y la contaminación de cuerpos de agua cercanos. Además, el almacenamiento en ambientes controlados facilita su manejo, transporte y comercialización, especialmente cuando se destina a mercados como supermercados o distribuidores agrícolas.

10.4.2. Riesgos en el uso agrícola

10.4.2.1. Riesgos de salinización y contaminación por uso inadecuado del digestato

El uso excesivo o mal dosificado del digestato puede provocar salinización del suelo, debido a la acumulación de sales solubles presentes en el fertilizante, especialmente cuando se aplica de forma continua sin considerar las condiciones edáficas. Esta salinización puede afectar la absorción de agua por parte de las plantas, reducir la actividad microbiana beneficiosa y deteriorar la estructura del suelo.

Asimismo, existe el riesgo de contaminación de fuentes hídricas por escorrentía o lixiviación, especialmente si el digestato se aplica en suelos con baja capacidad de retención o en condiciones de lluvia intensa. Esta contaminación puede afectar cuerpos de agua superficiales y subterráneos, comprometiendo la calidad del agua y la salud ambiental.

Por estas razones, es indispensable realizar análisis previos del suelo para conocer su capacidad de absorción y salinidad, y aplicar el digestato siguiendo dosis técnicas recomendadas según el tipo de cultivo, textura del suelo y condiciones climáticas locales.

Compatibilidad con cultivos

10.4.2.2. Compatibilidad con cultivos

El uso de digestato sin una adecuada estabilización puede generar efectos negativos en cultivos sensibles, especialmente en hortalizas de hoja (como lechuga, espinaca o acelga) y flores ornamentales, que presentan alta susceptibilidad a compuestos fitotóxicos, exceso de sales o desequilibrios en el pH.

La presencia de materia orgánica no completamente descompuesta, altos niveles de nitrógeno amoniacal o microorganismos patógenos puede afectar la calidad del cultivo, provocar quemaduras foliares, inhibir el crecimiento o alterar características comerciales como color, textura y aroma.

10.4.3. Riesgos comerciales

10.4.3.1. Percepción del consumidor

El término digestato, aunque técnicamente correcto, puede generar confusión o rechazo entre consumidores finales si no se comunica adecuadamente. Esto se debe a que no es ampliamente conocido fuera del ámbito técnico y puede asociarse erróneamente con residuos o desechos.

Por esta razón, es clave utilizar terminología más accesible y comercialmente atractiva, como biofertilizante orgánico, que resalta el valor agronómico y ambiental del producto. Además, es fundamental destacar sus beneficios en la comunicación del producto, tales como el aporte de nutrientes esenciales, la mejora de la estructura del suelo, el impulso a la agricultura sostenible y el reemplazo de fertilizantes sintéticos.

10.4.3.2. Competencia con fertilizantes químicos

Aunque el digestato representa una alternativa más sostenible frente a los fertilizantes sintéticos, puede ser percibido como menos potente por parte de los usuarios si no se acompaña de información técnica clara y verificable. Esta percepción se debe, en parte, al desconocimiento sobre su composición nutricional, beneficios agronómicos y mecanismos de acción en el suelo.

10.4.3.3. Logística y distribución

Una gestión inadecuada del inventario de digestato, especialmente en su forma líquida, puede generar pérdidas significativas tanto en volumen como en calidad del producto. El digestato líquido es particularmente susceptible a evaporación, fermentación secundaria y contaminación cruzada, lo que puede alterar su composición nutricional y reducir su valor comercial.

Además, la falta de control en el almacenamiento, rotación y trazabilidad del producto puede derivar en sobre stock, vencimiento o deterioro, afectando la eficiencia operativa y la rentabilidad del negocio. Estos riesgos se incrementan cuando no se cuenta con sistemas adecuados de registro, monitoreo y planificación de la demanda.

11. PLAN COMERCIAL

11.1. Producto, tipos y presentaciones

Con el objetivo de facilitar su comercialización en supermercados y distribuidores agrícolas, se han definido diferentes presentaciones del Biofertilizante Digestato, adaptadas a las necesidades de diversos tipos de usuarios y cultivos. La siguiente tabla detalla las opciones disponibles, incluyendo el tipo de fertilizante (líquido o sólido), el formato de empaque, el tamaño por unidad y el precio sugerido de venta al público.

Estas presentaciones han sido diseñadas considerando criterios de facilidad de uso, almacenamiento, transporte y aplicación, así como la percepción del consumidor final. Además, se busca garantizar la trazabilidad del producto y su alineación con los requisitos técnicos y normativos vigentes.

Tabla 21. Estructura de precios por formato y presentación de fertilizantes

Tipo de fertilizante	Formato	Presentación	Precio sugerido (COP)
Líquido	Botella PET	1 L / 5 L / 20 L	8.000 / 35.000 / 120.000
Sólido	Bolsa compostable	2 kg / 10 kg / 25 kg	10.000 / 45.000 / 75.000

Fuente: Elaboración propia.

Los precios de los fertilizantes fueron comparados con los encontrados en la plataforma mercado libre Colombia, los precios tomados en la tabla 20 son menores a los encontrados, buscando un análisis conservador del plan comercial. Cada presentación del Biofertilizante está acompañada de una etiqueta informativa, diseñada para comunicar de forma clara y atractiva los beneficios del producto, las instrucciones de uso según el tipo de cultivo, y un código QR que permite acceder a la trazabilidad, ficha técnica y análisis de laboratorio. Además, se incluye información sobre el registro ICA, indicando si está en trámite o proyectado, lo que refuerza la confianza del consumidor y respalda la legalidad del producto en el mercado colombiano.

Adicionalmente se abre la posibilidad de crear sistemas de trueque con proveedores de frutas y verduras siendo quizás un factor importante a la hora de disminuir precios en la compra de

mercancía, disminuyendo el uso de fertilizantes sintéticos y promoviendo la adopción de prácticas sostenibles en este sector comercial.

11.2. Producción y logística

Para garantizar una experiencia de compra atractiva y eficiente, el Biofertilizante Digestato se presenta en un empaque ecológico con diseño visual optimizado para góndolas, facilitando su visibilidad y posicionamiento en puntos de venta. La entrega directa a supermercados Surtifamiliar permite mantener una cadena de distribución ágil y controlada. Se implementa una rotación mensual con gestión de inventario, asegurando frescura del producto y trazabilidad por lote. Además, se realizan demostraciones en tienda y activaciones con clientes, con el objetivo de educar al consumidor sobre los beneficios del biofertilizante y fomentar su adopción en prácticas agrícolas sostenibles.

11.3. Estrategia de marketing en Surtifamiliar

Para fortalecer la visibilidad y aceptación del producto en el punto de venta, se propone su ubicación en góndolas verdes o agroecológicas, alineadas con su perfil sostenible. Se implementarán promociones de lanzamiento, como 2x1 y combos líquidos + sólido, para incentivar la prueba del producto. Además, se desarrollará material POP (afiches, volantes, exhibidores) que comunique sus beneficios y uso adecuado. Como parte de la estrategia educativa, se realizarán charlas y talleres sobre agricultura urbana y compostaje, dirigidos a consumidores interesados en prácticas sostenibles, reforzando el vínculo entre el producto y su impacto positivo en el entorno.

11.4. Proyección de ventas potenciales

Se plantea una meta comercial de operación en todas las tiendas de la cadena Surtifamiliar, con una estrategia de distribución directa y activaciones en punto de venta. En la tabla 21 se detallan las proyecciones por tipo de producto asumiendo que el litro de fertilizante es aproximadamente un kg de fertilizante:

Tabla 22. Estimación de ingresos por comercialización de subproductos del biodigestor

Producto	Unidades/mes	Total anual	Precio unitario estimado (COP)	Ingreso anual estimado (COP)
Biofertilizante liquido (20 L)	267 botellas	64.176 L	120.000	384.480.000
Biofertilizante solido (25 kg)	91 bolsas	27.504 kg	75.000	81.900.000

Fuente: Elaboración propia.

El ingreso total estimado en Surtifamiliar durante el primer año asciende a \$466.380.000 COP, resultado de la venta proyectada de 64.176 litros de biofertilizante líquido y 27.504 kilogramos de biofertilizante sólido en todas las tiendas de la cadena. Esta proyección es idealista dado que se asume que se logra vender todo lo producido, permitiendo resaltar el gran valor que tendrían los subproductos para esta operación. Esta base comercial permite validar el modelo de negocio y proyectar su escalabilidad en el corto o mediano plazo.

11.5. Documentación y legalización

Para garantizar la legalidad y trazabilidad del biofertilizante digestato, se contempla un proceso de documentación y legalización que incluye el registro como proveedor oficial ante Surtifamiliar, permitiendo la comercialización directa en sus puntos de venta. Paralelamente, se está gestionando la certificación ante el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) como fertilizante orgánico, conforme a la Resolución 150 de 2003. En caso de que el producto se comercialice como insumo para huertas domésticas o uso en el hogar, se evaluará la necesidad de obtener el registro sanitario ante el INVIMA. Asimismo, el etiquetado del producto se desarrollará en cumplimiento de la Norma Técnica Colombiana NTC 5167, que regula los requisitos de rotulado para fertilizantes orgánicos, garantizando calidad, seguridad y confianza para el consumidor final.

12. RESERVORIO SURTIFAMILIAR

Un reservorio es una estructura diseñada para almacenar líquidos o sólidos de forma segura, controlada y accesible. Su función principal es permitir la conservación de materiales en condiciones óptimas, evitando pérdidas, contaminación o deterioro. En sistemas agroindustriales como los biodigestores, el reservorio se convierte en una pieza clave para la gestión eficiente de los subproductos generados.

En el contexto de un biodigestor, el reservorio cumple múltiples funciones esenciales. Primero, permite el almacenamiento temporal o permanente del digestato líquido y sólido, que son los productos resultantes del proceso de biodigestión. Estos digestatos tienen valor como fertilizantes orgánicos, por lo que su conservación adecuada es fundamental para mantener sus propiedades nutritivas.

Además, el reservorio facilita la separación de residuos no procesados o materiales que no deben volver al biodigestor, como restos de frutas con cáscaras duras, plásticos u otros elementos que podrían interferir con el proceso biológico. Esta separación contribuye a la eficiencia del sistema y evita bloqueos o daños en el equipo.

Otra función importante del reservorio es servir como depósito de herramientas, insumos o elementos relacionados con el mantenimiento y operación del sistema. Esto incluye mangueras, válvulas, equipos de medición, y productos de limpieza o control biológico, que deben estar disponibles y organizados cerca del biodigestor.

El diseño del reservorio también debe considerar el control de olores, lixiviados y vectores como insectos o roedores. Para ello, se recomienda una estructura cerrada o semicerrada, con ventilación controlada y materiales resistentes a la corrosión y a la intemperie. Esto no solo mejora la higiene del entorno, sino que también cumple con normativas ambientales y sanitarias.

Finalmente, el reservorio facilita la logística de recolección y distribución del digestato como fertilizante, permitiendo su dosificación, carga en vehículos o aplicación directa en cultivos.

Su diseño debe contemplar accesos cómodos, sistemas de drenaje y compartimentos diferenciados para cada tipo de material.

12.1. Materiales para la construcción del reservorio

Dado que el reservorio está destinado a almacenar digestato líquido, digestato sólido, residuos del proceso y elementos relacionados con la operación del biodigestor, se recomienda su diseño en compartimentos diferenciados, cada uno construido con materiales específicos que respondan a las características fisicoquímicas del contenido. Esta división estructural permite optimizar el uso del espacio, prevenir la contaminación cruzada entre los distintos tipos de materiales, y garantizar condiciones adecuadas de conservación para cada componente.

12.1.1. Digestato líquido

Para el almacenamiento del digestato líquido generado por el biodigestor, se recomienda el uso de materiales que ofrezcan alta resistencia química, durabilidad estructural y protección frente a factores ambientales. Entre los materiales más adecuados se encuentran el polietileno de alta densidad (HDPE), la fibra de vidrio y el acero inoxidable, cada uno con propiedades específicas que los hacen idóneos para este tipo de aplicación.

El HDPE es ampliamente utilizado en sistemas de almacenamiento de líquidos debido a su excelente resistencia a la corrosión, su bajo costo relativo y su facilidad de instalación. La fibra de vidrio, por su parte, ofrece una alta resistencia mecánica y química, siendo ideal para ambientes agresivos o con exposición prolongada a agentes biológicos. El acero inoxidable, aunque más costoso, proporciona una durabilidad superior y una excelente resistencia a la oxidación, lo que lo convierte en una opción robusta para instalaciones de larga vida útil.

12.1.2. Digestato sólido

Para el almacenamiento del digestato sólido proveniente del proceso de biodigestión, se recomienda el uso de materiales que ofrezcan resistencia estructural, durabilidad frente a condiciones ambientales variables y facilidad de manejo. Entre los materiales más adecuados se encuentran el plástico reforzado, el acero galvanizado y la madera tratada, cada uno con propiedades específicas que permiten una conservación eficiente del material orgánico.

El plástico reforzado es liviano, resistente a la humedad y fácil de limpiar, lo que lo convierte en una opción práctica para instalaciones de mediana escala. El acero galvanizado, por su parte, ofrece una alta resistencia mecánica y protección contra la corrosión, siendo ideal para estructuras expuestas a la intemperie o con alta carga operativa. La madera tratada, aunque menos común en sistemas industriales, puede ser utilizada en entornos rurales por su disponibilidad local y bajo costo, siempre que se garantice un tratamiento adecuado contra hongos e insectos.

12.1.3. Residuos del proceso y elementos

Para el almacenamiento de herramientas operativas, insumos auxiliares y residuos no procesables generados durante el funcionamiento del biodigestor, se recomienda el uso de materiales que ofrezcan resistencia estructural, facilidad de limpieza y durabilidad frente a condiciones ambientales variables. En este caso, los materiales más adecuados son el acero galvanizado y el PVC, ambos ampliamente utilizados en instalaciones agroindustriales por su bajo mantenimiento y buena relación costo-beneficio.

12.2. Condiciones de almacenamiento para garantizar la vida útil del digestato

El adecuado almacenamiento del digestato, tanto en su forma líquida como sólida, es fundamental para preservar sus propiedades agronómicas, evitar la degradación microbiológica y asegurar su eficacia como fertilizante orgánico. Para ello, es necesario considerar tanto los materiales del contenedor como las condiciones ambientales y operativas del lugar de almacenamiento.

12.2.1. Digestato líquido

El digestato líquido debe almacenarse en tanques fabricados preferiblemente en polietileno de alta densidad (HDPE), fibra de vidrio o acero inoxidable, materiales que ofrecen alta resistencia a la corrosión, durabilidad frente a agentes químicos y estabilidad estructural. Estos tanques deben ser herméticos, contar con una tapa superior que impida la entrada de contaminantes externos, y disponer de una válvula de drenaje que facilite la extracción controlada del contenido.

Para preservar la calidad del digestato líquido, es esencial que el tanque esté cerrado, protegido de la radiación solar directa, y ubicado en un área con temperatura moderada. Se debe evitar la exposición prolongada al calor, la aireación excesiva, y cualquier forma de contaminación cruzada con otros materiales, ya que estos factores pueden acelerar la descomposición del digestato y reducir su valor fertilizante.

12.2.2. Digestato solido

El digestato sólido requiere un almacenamiento en condiciones que favorezcan su estabilidad física y microbiológica. Los contenedores recomendados incluyen estructuras de plástico reforzado, acero galvanizado o madera tratada, seleccionados por su resistencia mecánica, facilidad de limpieza y capacidad para mantener condiciones secas.

El digestato sólido debe almacenarse en un ambiente seco y ventilado, protegido de la lluvia y la humedad ambiental, para evitar procesos de fermentación no deseados o proliferación de patógenos. Es importante que el contenedor tenga una base elevada, lo que impide el contacto directo con el suelo y reduce el riesgo de absorción de humedad. Asimismo, se debe evitar la compactación excesiva, el contacto con agua, y la exposición directa al sol, ya que estos factores pueden alterar la estructura del digestato, disminuir su contenido de materia orgánica y afectar su eficacia como enmienda agrícola.

12.3. Tiempo de conservación y cantidad total para almacenar

La conservación del digestato, tanto en su forma líquida como sólida, depende directamente de las condiciones de almacenamiento. Mantener un entorno controlado permite preservar sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, garantizando su eficacia como fertilizante durante un periodo prolongado.

12.3.1. Digestato liquido

Puede conservarse entre 6 y 12 meses, siempre que se almacene en condiciones óptimas. Esto implica mantener el tanque cerrado herméticamente, protegido de la exposición solar directa, con temperatura controlada y sin aireación excesiva. Estas medidas evitan la proliferación de microorganismos no deseados, la pérdida de nutrientes por volatilización y la degradación del producto. En caso de tener una sobreproducción se puede hacer un proceso de filtrado y

recircular el biol a través del biodigestor, aunque estas prácticas son muy amigables con el medio ambiente al reducir el uso de agua potable se recomienda hacerlo con precaución debido a cambios bruscos que puedan afectar la actividad bacteriana.

12.3.2. Digestato solido

Tiene una vida útil de hasta 12 meses, siempre que se mantenga en un ambiente seco, aireado y protegido de la humedad. La ventilación controlada es clave para evitar fermentaciones indeseadas, mientras que la protección contra la lluvia y la humedad ambiental previene la compactación y el deterioro de la estructura del digestato, conservando su valor como enmienda orgánica.

12.3.3. Cantidad total requerida para almacenamiento

Para garantizar una operación eficiente del sistema de biodigestión y permitir una gestión adecuada de los subproductos, se recomienda dimensionar el reservorio con base en la producción anual estimada, incorporando márgenes de seguridad que permitan flexibilidad operativa.

12.3.3.1. Digestato liquido

Se estima una producción anual de 1.000 litros, por lo que se recomienda una capacidad de almacenamiento de al menos 1.500 litros, considerando variaciones estacionales y necesidades logísticas.

12.3.3.2. Digestato solido

Con una producción anual aproximada de 6.000 kg, se sugiere una capacidad de almacenamiento de 7.000 kg, lo que permite manejar excedentes y facilitar la planificación de la distribución.

12.3.3.3. Residuos del proceso y elementos operativos

Se requiere un espacio adicional de al menos 2 m³, destinado al almacenamiento de herramientas, equipos de mantenimiento, residuos no procesables y otros insumos relacionados con la operación del biodigestor.

12.4. Calidad de los productos almacenados

La calidad del digestato, tanto líquido como sólido, depende en gran medida de las condiciones de almacenamiento y del diseño del reservorio. Para preservar sus propiedades fertilizantes y garantizar su seguridad sanitaria, es fundamental que el reservorio cumpla con criterios técnicos que eviten la degradación del producto y aseguren su trazabilidad.

En primer lugar, el reservorio debe estar diseñado para evitar la contaminación cruzada entre los distintos tipos de materiales almacenados: digestato líquido, digestato sólido y residuos del proceso. Esto se logra mediante la implementación de compartimentos independientes, contruidos con materiales específicos y adecuados a las características de cada contenido, lo que permite mantener la integridad de cada producto.

Asimismo, es esencial que el reservorio contribuya a preservar las propiedades fertilizantes del digestato, como su contenido de macronutrientes (NPK), materia orgánica, y microorganismos beneficiosos. Esto requiere condiciones de almacenamiento que minimicen la exposición a factores que puedan alterar su composición, como la luz solar directa, el exceso de aireación o la humedad no controlada.

Para el digestato sólido, el diseño debe incluir ventilación controlada y protección contra la humedad, lo que ayuda a evitar la proliferación de patógenos y la descomposición anaerobia no deseada. En el caso del digestato líquido, el uso de tanques herméticos y protegidos contra la radiación UV es clave para mantener su estabilidad microbiológica y química.

Finalmente, el reservorio debe facilitar la inspección y el muestreo periódico de los productos almacenados. Esto implica incorporar accesos seguros, válvulas de extracción, tapas removibles y puntos de muestreo que permitan realizar controles de calidad, verificar parámetros como pH, conductividad eléctrica, contenido de nutrientes y presencia de contaminantes, asegurando así que el digestato cumpla con los estándares requeridos para su uso agrícola o comercial.

12.5. Costos estimados

Tabla 23. Estimación de costos de infraestructura complementaria para el sistema de biodigestión

Elemento	Material	Capacidad	Costo estimado (COP)
Tanque digestato líquido	HDPE o fibra de vidrio	1.500 L	1.200.000 – 2.000.000
Contenedor digestato	Plástico reforzado o acero	7.000 kg	2.500.000 – 4.000.000
Comportamiento de residuos y herramientas	Galvanizado/PVC	2 m ³	800.000 – 1.500.000
Total estimado	-	-	4.500.000 – 7.500.000

Fuente: Elaboración propia.

Se ha desarrollado un boceto preliminar del reservorio multifuncional destinado al almacenamiento de digestato líquido, digestato sólido, residuos del proceso y elementos operativos del biodigestor. El diseño contempla una estructura modular compuesta por tres compartimentos diferenciados, cada uno adaptado a las características fisicoquímicas del material que alberga, con el objetivo de garantizar la conservación, seguridad y eficiencia operativa del sistema.

Para asegurar una adecuada circulación, manipulación y mantenimiento, se ha estimado una necesidad de espacio total de aproximadamente 20 metros cúbicos, incluyendo áreas destinadas a pasillos de acceso, zonas de carga y descarga, y espacios técnicos. Esta configuración permite una distribución lógica y funcional de los materiales, minimizando el riesgo de contaminación cruzada y facilitando las labores de inspección, muestreo y operación.

El diseño modular no solo optimiza el uso del espacio, sino que también permite futuras ampliaciones o adaptaciones según el crecimiento de la producción o la incorporación de nuevos procesos. Cada compartimento está construido con materiales específicos, seleccionados en función de su resistencia química, durabilidad estructural y compatibilidad con el tipo de digestato o residuo que se almacena.

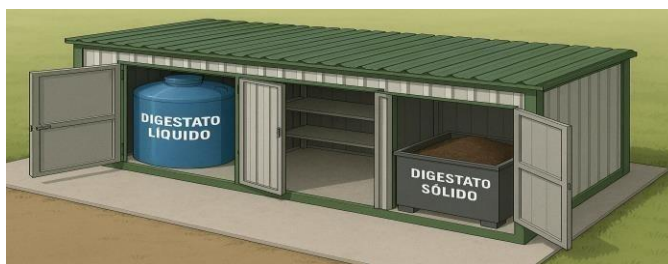


Figura 13. Diseño reservorio Surtifamiliar

13. PROPUESTA DE VALOR

13.1. Factibilidad del diseño

La factibilidad de un sistema de refrigeración sostenible representa una alternativa innovadora y ambientalmente responsable para el aprovechamiento energético. Sin embargo, para garantizar que dicha solución sea viable, es necesario evaluar su factibilidad desde diferentes dimensiones.

Esta verificación permite establecer si el diseño propuesto puede ser técnicamente funcional, económicamente rentable y ambientalmente beneficioso en las condiciones reales del supermercado de cadena, Surtifamiliar.

Se analiza la viabilidad del diseño en tres ejes fundamentales: técnico, económico y ambiental.

13.1.1. Factibilidad técnica

Esta dimensión evalúa si el sistema puede ser implementado de forma práctica, con base en los recursos y condiciones disponibles.

13.1.2. Caracterización de los residuos alimenticios

En la sede alameda del supermercado Surtifamiliar se obtiene una cantidad de residuos orgánicos considerable para empezar a evaluar el uso de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de estas basuras de manera que generen beneficios para el medio ambiente y la parte financiera de la empresa. Se debe tener en cuenta que en los cálculos no se tuvieron en cuenta la totalidad de las basuras de frutas y verduras, tampoco se dimensionó otro tipo de residuos que puedan ser provechosos como pueden ser del sector de panadería o carnes, incluyendo la generación de residuos de las demás sedes de la cadena de supermercados.

13.1.3. Producción del biogás

La cantidad obtenida muestra que el proyecto tiene un alto potencial de crecimiento y que para generar valor hay que generar la mayor cantidad de biogás posible. Actualmente se

estima una producción entre 82 metros cúbicos y 18 metros cúbicos de biogás diario, logrando abastecer la necesidad en los días de máxima generación, pero quedando cortos de energía térmica en los momentos de bajas cantidades de biogás.

13.1.4. Conversión de energía térmica

El biogás será utilizado como fuente de calor para alimentar un sistema de refrigeración por absorción, lo que elimina la dependencia de energía eléctrica convencional y abre la puerta a nuevas tecnologías que podrían aportar a generar valor para la empresa y la sociedad.

13.1.5. Sistema completo

Se consideró la disponibilidad de un espacio físico, el cual será ubicado en un lote contiguo a la sede estudiada; también, las condiciones climáticas y las tecnologías compatibles que, el Valle del Cauca, Cali, cuenta con poca variabilidad de temperaturas debido a que no se cuentan con estaciones climáticas marcadas. Y principalmente, la producción energética se puede considerar suficiente para cubrir la demanda de refrigeración planteada con la cantidad de residuos orgánicos dimensionados previamente.

13.2. Factibilidad económica

Se analizó si el diseño del sistema es financieramente viable y si la inversión requerida se justifica frente a los beneficios económicos proyectados, además de una estimación del tiempo de retorno de la inversión necesaria.

13.2.1. Inversión inicial

Se incluyeron los costos asociados al diseño del sistema de refrigeración, junto con la compra de sus respectivos equipos y la compra del biodigestor e instalación de este.

13.2.2. Costos operativos y mantenimiento

Se consideran los gastos mensuales recurrentes relacionados con la operación técnica, supervisión, limpieza y mantenimiento de los equipos.

13.2.3. Beneficios económicos

Se evaluaron los ahorros por sustitución de energía eléctrica dirigida a refrigerar frutas y verduras, reducción de costos en la disposición de residuos orgánicos y la venta de subproductos como el biofertilizante junto con los abonos resultantes.

13.2.4. Análisis financieros

Se revisó el periodo de recuperación de la inversión y la relación Costo/Beneficio, a fin de evaluar la rentabilidad del proyecto.

13.3. Factibilidad ambiental

En esta dimensión se analizan los impactos ambientales del sistema y su contribución a la sostenibilidad.

13.3.1. Reducción de residuos orgánicos

El aprovechamiento de los residuos alimenticios evita su disposición en rellenos sanitarios, reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero y la presión sobre sistemas de gestión de residuos urbanos.

13.3.2. Sustitución de fuentes de energía

Al emplear biogás como fuente de energía, se disminuye la dependencia de energía eléctrica convencional, contribuyendo a la descarbonización del sistema energético.

13.3.3. Aprovechamiento del digestato

El subproducto del proceso de digestión se utilizará como fertilizante orgánico, reduciendo la necesidad de insumos químicos agrícolas y promoviendo una economía circular.

13.3.4. Impacto en la huella ecológica del supermercado

El proyecto contribuye a mejorar el perfil ambiental de la empresa Surtifamiliar, alineándose con objetivos de sostenibilidad y responsabilidad social.

13.4. Matriz costo-beneficio

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, se realizó un análisis Costo/Beneficio que permite comparar cuantitativamente los costos asociados al diseño, implementación y operación del sistema, frente a los beneficios económicos, sociales y ambientales que genera. Esta herramienta facilita la toma de decisiones al proporcionar una visión integral del rendimiento del proyecto a lo largo del tiempo.

13.4.1. Equipo propuesto

El Robur GA ACF/GAACF-TK es un chiller de absorción amoníaco-agua que se puede alimentar directamente con gas natural, gas licuado y biogás. Logra temperaturas de hasta 3 °C en su versión estándar con capacidad nominal de frío de 17,7kW lo que equivale a toneladas de frío aproximadamente, logrando 2,5 veces la capacidad de refrigeración requerida por la cava.



Figura 14. Gas absorption Chiller (GA ACF TK-ROBUR)

Fuente: Tomado de [80].

Adicional al precio base del equipo se añaden los costos de empezar su funcionamiento directamente en el barrio Alameda de la ciudad de Cali.

Tabla 24. Datos relevantes de la ficha técnica

Ficha técnica Robur GA ACF/GAACF – TK	
Parámetro	Descripción/Valor
Tipo de sistema	Absorción de flama directa (gas natural, gas licuado o biogás)
Capacidad nominal	17,7 kW
Temperatura mínima del agua fría	3°C
Consumo térmico	≈25 kW
Consumo eléctrico	0,85 kW (230 V monofásico)
Eficiencia	71%
Nivel sonoro	≈57,6 dB
Peso / dimensiones	390 kg / 850 x 1240 x 1445 – 1513 mm

Fuente: Elaboración propia.

Estimación del consumo de metano del equipo

25 kW de consumo térmico = 25 kilo joules por segundo

$$25 \frac{kJ}{s} * 3600 s = 90 \frac{MJ}{h}$$

A partir del poder calorífico inferior utilizado previamente de $35.8 \frac{MJ}{Nm^3}$

$$Volumen de CH_4 = \frac{90 \frac{MJ}{h}}{35.8 \frac{MJ}{Nm^3}} = 2.51 \frac{m^3}{h}$$

Para 24 horas de uso diario se necesitan aproximadamente:

$$2.51 \frac{m^3}{h} * 24 h = 60.24 \frac{m^3}{día}$$

Recordemos que el valor obtenido es un máximo de consumo y el equipo podría operar entre 16-20 horas diarias por lo que el valor puede disminuir según la necesidad, añadiendo que su capacidad de refrigeración es poco más del doble de la carga térmica requerida. Al tener todos los equipos seleccionados evaluamos nuevamente la comparación entre el biogás generado y el consumo del equipo.

- **Escenario 1:** 49,71 metros cúbicos de metano diario
- **Escenario 2:** 21,42 metros cúbicos de metano diario
- **Escenario 3:** 10,65 metros cúbicos de metano diario

Al quedar en claro que la necesidad térmica del equipo supera incluso el escenario de máxima producción, se confirma que para darle valor al proyecto deben buscarse más fuentes que estén contaminando con residuos orgánicos y de esta manera generar más valor en todas sus esferas tanto ambiental como económico.

Tabla 25. Matriz costo de generación de frío

Concepto	Valor (USD)	Valor (COP)	Descripción
Equipo Robur GA ACF/GAACF - TK 5 TR	30.000 USD	115.864.800 COP	Chiller absorción amoníaco/agua, 17.6 kW
Transporte internacional y seguro	-	4.000.000 COP	Envío marítimo desde Italia a Buenaventura.
Aranceles e IVA (importación)	-	22.014.312 COP	Derechos de aduana, IVA 19%, otros.
Transporte barrio alameda	-	1.000.000 COP	Logística transporte
Instalación civil, hidráulica y eléctrica	-	10.000.000 COP	Puesta en marcha, pruebas y ajustes.
Subtotal estimado	-	153.000.000 COP	Costo estimado
Imprevistos	-	5.000.000 COP	Imprevistos
Total estimado por refrigeración	-	≈ 158.000.000 COP	155.000.000 y 160.000.000

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 26 presenta una estimación de los costos asociados a la implementación del sistema de producción de biogás propuesto en el proyecto. En ella se incluyen los principales componentes necesarios para la operación del biodigestor, tales como el biodigestor, sensores, válvulas, medidores de gas, sistemas de mezcla, equipos de bombeo, controlador, tuberías y el reservorio de almacenamiento. Asimismo, se contemplan los costos relacionados con la instalación del sistema. Los valores se expresan en pesos colombianos (COP) y se presentan en rangos aproximados con base en cotizaciones de mercado y referencias técnicas, considerando que la mayoría de estos equipos corresponden a inversiones de adquisición única. Esta estimación permite dimensionar la inversión inicial requerida para la implementación del sistema de biodigestión dentro del esquema de aprovechamiento energético propuesto.

Tabla 26. Costo de producción de biogás

Categoría	Detalle	Valor (COP)	Frecuencia/Promedio
COSTOS	Biodigestor	150.000 – 200.000	Única
	Sensores, válvulas, medidores de gas, filtros	6.000.000 – 7.500.000	Única
	Triturador, tanques de mezcla, básculas,	2.500.000 – 3.500.000	Única
	Instalación del biodigestor	1.000.000 – 1.500.000	Única
	Reservorio	4.500.000 – 7.500.000	Única
	Bomba	1.200.000 – 1.500.000	Única
	Controlador Siemens	4.000.000 – 5.000.000	Única
	Tuberías	1.000.000	Única
	Costo total	20.350.000 – 27.700.000	Costos iniciales del biodigestor

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 27 presenta una estimación de los costos asociados al proceso de desarrollo y comercialización del fertilizante y abono orgánico derivado del digestato generado en el biodigestor. En esta tabla se incluyen aspectos relacionados con el diseño de la etiqueta y el envase del producto, los costos legales necesarios para su registro ante las autoridades correspondientes, así como el desarrollo y certificación del producto mediante laboratorios especializados. Los valores se expresan en pesos colombianos (COP) y corresponden principalmente a inversiones de carácter único, necesarias para garantizar que el fertilizante cumpla con los requisitos técnicos, regulatorios y comerciales para su posible aprovechamiento dentro de un modelo de economía circular.

Tabla 27. Costos de producción de fertilizante y abono

Categoría	Detalle	Valor estimado (COP)	Frecuencia/Promedio
Costos	Diseño de etiqueta y envase para fertilizante	500.000	Única
	Costos legales (ICA)	550.000	Única
	Desarrollo de producto con certificado de laboratorios	2.000.000	Única
	Costos totales	3.050.000	Única

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 28 presenta una estimación de los costos operacionales anuales asociados al funcionamiento del sistema propuesto. En ella se incluyen los gastos relacionados con la contratación de un empleado encargado de la operación y supervisión del sistema, así como los costos de mantenimiento del biodigestor y del chiller utilizado en el proceso de refrigeración. Estos valores permiten visualizar los requerimientos económicos necesarios para garantizar la operación continua y eficiente del sistema, proporcionando una base para el análisis de viabilidad económica del proyecto.

Tabla 28. Costos operacionales del proyecto

Categoría	Detalle	Valor estimado (COP)	Frecuencia/Promedio
Costos	Salario mínimo legal 1 empleado	28.000.000	Anual
	Mantenimiento Biodigestor	1.000.000	Anual
	Mantenimiento Chiller	2.000.000	Anual
	Costos totales	31.000.000	Anual

Fuente: Elaboración propia.

Para el salario del empleado se tuvieron en cuenta auxilios de transporte, prestaciones fiscales, aportes de seguridad, entre otros.

La Tabla 29 presenta el resumen general de los costos estimados para el primer año de implementación del proyecto. En ella se integran los principales componentes económicos asociados al sistema propuesto, incluyendo la inversión en el sistema de refrigeración, la instalación del biodigestor, los costos relacionados con el desarrollo del subproducto (fertilizante) y los gastos de operación y mantenimiento. Este consolidado permite visualizar de manera global la inversión total requerida durante la etapa inicial del proyecto, facilitando el análisis financiero y la evaluación de la viabilidad económica de la propuesta.

Tabla 29. Resumen de costos primer año

Categoría	Valor estimado (COP)
Refrigeración	158.000.000
Biodigestor	25.000.000
Subproducto	3.050.000
Operación y mantenimiento	31.000.000
Total	217.050.000

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 30 presenta los principales beneficios económicos asociados a la implementación del sistema propuesto. En ella se incluyen los ingresos y ahorros generados por el aprovechamiento energético del biogás, la comercialización del fertilizante o abono producido como subproducto del proceso de biodigestión y la reducción de costos relacionados con la disposición de residuos orgánicos. Estos elementos permiten estimar el impacto económico positivo del proyecto a nivel anual, proporcionando una base para evaluar su rentabilidad y su contribución al modelo de economía circular propuesto.

Tabla 30. Beneficios económicos

Categoría	Detalle	Valor estimado (COP)	Frecuencia/Promedio
Beneficios	Ahorro energético	21.600.000	Anual
	Venta fertilizante / abono	466.380.000	Anual
	Ahorro disposición de residuos	20.000.000	Anual
	Beneficios totales	507.980.000	Anual

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Matriz Costo/Beneficio

Categoría	Detalle	Valor
CAPEX (Gastos de Capital)	Chiller	158.000.000
	Biodigestor	25.000.000
	Subproductos	3.050.000
	Total Anual	186.050.000
OPEX (Gastos Operativos)	Nomina	28.000.000
	Mantenimientos	3.000.000
	Consumo de agua	12.000
	Consumo eléctrico	460.000
	Total Anual	31.472.000
Beneficios económicos	Ahorro energético	21.600.000
	Venta subproductos	466.380.000
	Ahorro en disposición de residuos	20.000.000
	Total Anual	507.980.000
Balance económico	Primer año	217.522.000
	Resultado	290.558.000
	Recuperación de inversión	1 año aprox.

14. CONCLUSIONES

En este proyecto de grado se evaluó la factibilidad para implementar la implementación de un sistema de refrigeración por absorción accionado por biogás a partir de los desechos alimenticios generados en el supermercado Surtifamiliar, sede Alameda, ubicado en el Valle del Cauca. Para lograr este objetivo se tuvieron en cuenta aspectos fundamentales como la composición óptima de los residuos para la producción de biogás, la configuración técnica del sistema de refrigeración, la capacidad de enfriamiento y, finalmente, la viabilidad del diseño a través de un análisis costo-beneficio.

A través del análisis teórico y bibliográfico, se desarrollan las siguientes conclusiones:

1. Se demostró que es viable y rentable transformar los residuos alimenticios generados diariamente en el supermercado Surtifamiliar, sede Alameda, en una fuente energética útil. El uso de biodigestores, combinado con un sistema de refrigeración por absorción, permite convertir desechos en valor social, económico y ambiental, mitigando el impacto negativo de la disposición inadecuada de residuos orgánicos.
2. Los residuos analizados en el laboratorio presentaron una humedad cercana al 90%, lo que favorece la producción de biogás sin requerir grandes cantidades de agua adicional. Sin embargo, se evidenció la necesidad de incorporar estiércol animal para ajustar la relación carbono/nitrógeno (C/N), garantizando condiciones óptimas para la actividad bacteriana. Esto permitió definir una mezcla teórica adecuada a partir de los residuos típicos del supermercado, con posibilidad de ajustes mediante la adición de otros materiales orgánicos.
3. Dada la capacidad del biogás para generar energía térmica, se optó por un sistema de refrigeración por absorción tipo chiller, con una capacidad de 5 toneladas de refrigeración (≈ 17 kW), suficiente para cubrir la demanda térmica de la cava de frutas y verduras ($\approx 6,8$ kW), similar a la instalada en el supermercado.
4. Se calculó que se requieren al menos 133 kg de materia orgánica diaria para generar aproximadamente 58 m³ de biogás, de los cuales 34,86 m³ corresponden a metano. Esta cantidad es suficiente para abastecer la demanda energética de la cava, confirmando la viabilidad técnica del sistema propuesto.

5. Además del biogás, el digestato generado posee un alto valor como fertilizante orgánico, lo que incrementa el potencial económico del proyecto. El análisis costo- beneficio indica que, bajo condiciones ideales de comercialización, el sistema podría recuperar su inversión en un año, con ingresos brutos superiores a los 500 millones de pesos colombianos. No obstante, se identifican variables críticas como la logística de recolección, el análisis de mercado para los subproductos y la articulación con canales comerciales adecuados.

6. La caracterización de los residuos del supermercado, considerando parámetros como pH, humedad y relación C/N en condiciones mesofílicas propias de Cali, confirma la viabilidad teórica del proceso. Esto sugiere que el modelo puede replicarse en otros supermercados del país, contribuyendo a una gestión más sostenible de los residuos orgánicos.

15. RESTRICCIONES

15.1. Espacio

Se debe delimitar el espacio antes de comenzar el diseño para comprender el tamaño real y como el diseño final va a influir en el medio.

15.2. Recursos

Se evalúa la cantidad de materia prima disponible que puede ser suministrada, es vital que esta materia prima sea constante y que no tengamos carencia de esta misma.

15.3. Cantidad

Dentro del espacio disponible para el digestor cuanto peso puede llegar a soportar y cuanta capacidad de almacenamiento se tiene.

15.4. Costos

Entender la capacidad y alcance verdadero del proyecto, idealmente para no acabar con el presupuesto a mitad de proceso, también, evaluar si este proyecto es rentable y que beneficios económicos traería.

15.5. Caracterización

Se debe separar todos los desechos alimenticios y extraer solamente los que sean de utilidad para el proyecto.

15.6. Seguridad

El biodigestor debe ser diseñado de tal forma que no ponga en riesgo a las personas y tampoco el medio ambiente, debe cumplir con todas las normativas dispuestas para el uso de desperdicios alimenticios.

15.7. Mantenimiento

El mantenimiento debe ser mínimo y se debe abrir la menor cantidad veces, debe ser fácil e intuitivo para que cualquier trabajador designado para esta tarea complete el mantenimiento en corto tiempo.

15.8. Calidad

Debe cumplir con todos los protocolos, estándares, requisitos y normativos establecidos para el uso de biodigestores, biofertilizantes y biogás en Colombia.

16. BIBLIOGRAFÍA

[World Wildlife Fund, "Driven to Waste: The Global Impact of Food Loss and Waste on
1 Farms, World Wildlife Fund," WWF, 2021. [Online]. Available:
] [https://www.worldwildlife.org/publications/driven-to-waste-the-global-impact-of-food-
loss-and-waste-on-farm](https://www.worldwildlife.org/publications/driven-to-waste-the-global-impact-of-food-loss-and-waste-on-farm).

[FENALCO, «Censo de Mermas 2015,» Federación Nacional de Comerciantes, 2015. [En
2 línea]. Available: [https://www.fenalco.com.co/blog/economico-3/censo-de-mermas-
\] 2015-166](https://www.fenalco.com.co/blog/economico-3/censo-de-mermas-2015-166).

[El País, «Conozca la herencia letal que aún le deja el basurero de Navarro a los caleños,»
3 El País Cali, 20 04 2023. [En línea]. Available: [https://www.elpais.com.co/cali/conozca-
\] la-herencia-letal-que-aun-le-deja-el-basurero-de- navarro-a-los-calenos.html](https://www.elpais.com.co/cali/conozca-la-herencia-letal-que-aun-le-deja-el-basurero-de-navarro-a-los-calenos.html).

[Consejo de Redacción, «La peligrosa coexistencia de un relleno sanitario y una reserva
4 natural en Yotoco,» Consejo de Redacción, 10 2021. [En línea]. Available:
] [https://consejoderedaccion.org/sello-cdr/investigacion/la-peligrosa- coexistencia-de-un-
relleno-sanitario-y-una-reserva-natural-en-yotoco/](https://consejoderedaccion.org/sello-cdr/investigacion/la-peligrosa-coexistencia-de-un-relleno-sanitario-y-una-reserva-natural-en-yotoco/).

[A. M. Alvarez, "Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes,"
5 *IWA Publishing*, 2003.
]

[R. E. López, «Refrigeración por absorción: fundamentos y aplicaciones,» *Revista*
6 *Ingeniería*, vol. 25, n° 2, pp. 45-55, 2008.
]

[World Wildlife Fund, «WWF UK - Driven to waste: The Global Impact of Food Loss and
7 Waste on Farms,» 2021. [En línea]. Available:
]

https://wwf.panda.org/discover/our_focus/food_practice/food_loss_and_waste/driven_to_waste_global_food_loss_on_farms/.

[Fenalco, «Fenalco - Censo de Mermas 2015,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.fenalco.com.co/blog/economico-3/censo-de-mermas-2015-166>.

]

[Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, «CVC - Informe de Gestión 2008,» 9 Febrero 2009. [En línea]. Available: https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2018-07/Informe_de_Gestion_2008.pdf.

[Surtifamiliar S.A.S., *Informe técnico sobre generación de residuos orgánicos y consumo energético en tiendas Surtifamiliar*, Cali, Colombia, 2023.

0

]

[Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Food Wastage Footprint: Impacts on Natural Resources, Rome, Italy: FAO, 2013.

1

]

[International Energy Agency (IEA), The Future of Cooling, Paris, Francia: IEA, 2018.

1

2

]

[C. B. a. S. H. Y. Zhang, «Anaerobic digestion of two biodegradable municipal waste streams,» *Bioresource Technology*, vol. 100, n° 2, pp. 585-591, 2009.

3

]

[A. D. Burgos, Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con 1 residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia), Tiquipaya, Bolivia., 4 2013.

]

[B. D. Guayazan, Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de 1 aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto 5 "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura-Colombia, Bogotá, Colombia,] 2019.

[Alcaldía de Santiago de Cali, «Geografía de Cali,» Alcaldía de Santiago de Cali, 15 12 1 2014. [En línea]. Available: 6 <https://www.cali.gov.co/informatica/publicaciones/106104/geografia-de-cali/>.

]

[On The World Map, «Santiago de Cali Map,» On The World Map, 2022. [En línea]. 1 Available: <https://ontheworldmap.com/colombia/city/cali/>.

7

]

[S. L. &. D. D. A. Hassanein, "Anaerobic Digestion (EBR-2023-0686)," University of 1 Maryland, 2024. [Online]. Available: [Extension. go.umd.edu/EBR-2023-0686](https://extension.go.umd.edu/EBR-2023-0686).

8

]

[M. T. Varnero, Manual de Biogás, Santiago, Chile: Organización de las Naciones Unidas 1 para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011.

9

]

[Universidad Nacional Autónoma de México, «Capítulo 4 - Biogás,» de *Manual de Biogás*, 2 México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2021, pp. 41-50.

0

]

[Fundación Naturgy, «Gas renovable. El futuro de la energía y el medio ambiente,»
2 *Vocational Education and Training in Energy*, vol. 1, 2021.

1

]

[J. M. Alvarez, «Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste: An Overview of Research
2 Achievements and Perspectives,» *Bioresource Technology*, vol. 74, nº 1, pp. 3-16, 2000.

2

]

[O. A. O. n. a. J. A. M. Jeremiah Barasa Kabeyi, Biogas Production and Process Control
2 Improvements, Intech Open, 2024.

3

]

[G. v. M. a. W. a. E. a. G. A. Marais, «Weak acid/bases and pH control in anaerobic systems
2 - a review,» *Water SA*, vol. 19, pp. 01-10, 1993.

4

]

[T. W. H. B. a. N. W. L. Gonde, «pH-Based Control of Anaerobic Digestion to Maximise
2 Ammonium Production in Liquid Digestate,» *Water*, vol. 15, nº 3, p. 417, 2023.

5

]

[A. a. G. B. a. P. B. a. P. V. a. P. P. Patel, «Cost benefit and environmental impact assessment
2 of compressed biogas (CBG) production from industrial, agricultural and community
6 organic waste from India,» *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 14, 2022.

]

[O. A. U. K. a. D. R. M. Farghali, «Integration of biogas systems into a carbon zero and 2 hydrogen economy: a review,» *Environmental Chemistry Letters*, vol. 20, 2022.

7

]

[P. W. a. S. S. E. Rus, «Optimum Anaerobic Digestion Organic Loading Rates,» *Thames 2 Water & Imperial College London*, 2015.

8

]

[X. L. J. C. Y. Y. T. K. Y. H. a. X. Z. H.M Wu, «Food Waste Anaerobic Digestion Under 2 High Organic Loading Rate: Inhibiting Factors, Mechanisms, and Mitigation Strategies,» 9 *Processes*, vol. 13, n° 7, 2025.

]

[S. H. X. K. Y. S. Z. Y. T. X. Y. G. a. L. L. J. Jiang, «Effect of Organic Loading Rate and 3 Temperature on the Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste: Process Performance 0 and Energy Recovery,» *Front. Energy Res*, pp. 8-89, 2020.

]

[A. B. a. B. L. E. Maleki, «A review of anaerobic digestion bio-kinetics,» *Reviews in 3 Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 17, 2018.

1

]

[P. J. H. P. H. D. L. J. A. J. Ward, «Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural 3 resources,» *Bioresource Technology*, vol. 99, pp. 7928-7940, 2008.

2

]

[A. Bautista, *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos (Estelí, 3 Nicaragua)*, Leganés: Departamento de Ciencia e Ingeniería de materiales e Ingeniería 3 química, 2010.

]

[R. K. y. P. S. A. Singh, «A review on floating-drum biogas digesters: Design, performance, 3 and applications,» *Energies*, vol. 16, nº 8, p. 3378, 2023.

4

]

[A. T. J. L. e. a. A. Hugo, *Gestión ambiental para la implementación de Biodigestores 3 Anaeróbicos reductores de residuos contaminantes en el medioambiente de los 5 departamentos de la Región Norte y Central de Colombia*, 2020.

]

[A. M. A. e. al., «Architecture of biogas digesters and fixed-dome design,» *Renewable 3 Energy and Sustainability*, 2024.

6

]

[Altertec, «¿QUÉ ES UN BIODIGESTOR?,» [En línea]. Available: 3 <https://altertec.com/que-es-un-biodigestor/>.

7

]

[J. M.-H. e. al., «Low-cost tubular digesters as a solution for rural household biogas 3 production,» *Renewable Energy*, vol. 57, pp. 211-219, 2014.

8

]

[D. A. y. E. M. J. Mungwe, «Design Considerations of a Flexible Biogas Digester System for Use in Rural Communities of Developing Countries,» *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, vol. 11, pp. 260-271, 2021.

]

[L. A. A. D. e. a. H. P. Goldberg, Purificación y usos del biogás./Purification and use of biogas, 2017.

0

]

[D. S. D. K. e. a. E. Sankhla, «Design and Analysis of Biogas Powered Refrigerator for Dairy Farmers,» *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 9, pp. 2502-2550, 2019.

]

[M. Rahman, Handbook of Food Preservation, Light and Sound in Food Preservation, 2007.

2

]

[M. Kaviany, Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer: Springer New York, 1995.

3

]

[J. Gutierrez, Los sistemas de absorción y su aplicación en el acondicionamiento de aire, Guadalajara, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2002.

4

]

[Z. Alan, *Introducción a los sistemas de refrigeración por absorción*, 2021.

4

5

]

[ASHRAE, Refrigerants and their properties, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022.

6

]

[A. D. A. e. a. M. F. Ochoa, «Fertilización orgánica y su impacto en la calidad del suelo,» *4 Biotecnia*, vol. 21, nº 1, pp. 87-92, 2019.

7

]

[S. M. a. K. Emre, «High-Quality Fertilizers from Biogas Digestate,» 2022, pp. 319-347.

4

8

]

[J. H. a. K. M. F. Hafner, «Digestate composition affecting N Fertiliser Value and C 4 Mineralisation,» *Waste and Biomass Valorization*, vol. 13, 2022.

9

]

[e. a. H. da Cruz, «Estudo do potencial de geracao de energia eletrica a partir do biogas de 5 digestao anaerobia de residuos alimentares,» *Research, Society and Development*, vol. 8, 0 nº 5, pp. 2525-3409, 2019.

]

[J. P. a. F. M. A. Maioli, «Generating electricity during peak hours in Asuncion, Paraguay, 5 through anaerobic digestion of cultivated water hyacinths,» *Ingenieria e Investigación*, 1 vol. 31, nº Extra 2, pp. 2248-8723, 2011.

]

[Congreso de Colombia, «Función Publica - Gestor Normativo Ley 697 de 2001,» 3 5 Octubre 2001. [En línea]. Available: 2 <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>.]

[Congreso de Colombia, «Función Publica - Gestor Normativo Ley 1151 de 2007,» 24 5 Julio 2007. [En línea]. Available: 3 <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=25932>.]

[Comisión de Regulación de Energía y Gas, «CREG - Gestor Normativo Alejandria 2.0,» 5 26 Mayo 2009. [En línea]. Available: 4 https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0066_2009.htm.] m.

[Ministerio de Ambiente, «Ministerio de Ambiente de la gobernación de Colombia,» 10 5 Julio 2014. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/decreto-1287-de-10-de-julio-de-2014/>.]

[Ministerio de Ambiente, «Minambiente gobernación de Colombia,» 3 Mayo 2016. [En 5 línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-60689-de-2016/>.]

[Agencia Nacional de Minería, «Agencia Nacional de Minería,» 08 Septiembre 2017. [En 5 línea]. Available: 7 https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res_523_08_sep_2017_ok.pdf.]

[Instituto Colombiano Agropecuario, «ICA Resoluciones MSF Y RT 2003R150,» 21 Enero 5 2003. [En línea]. Available: [https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-8 ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2003/2003r150](https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-8%20ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2003/2003r150).

]

[INVIMA, «Invima Decreto 1843 de 1991: Regulación del Uso y Manejo de Plaguicidas 5 en Colombia,» 22 Julio 1991. [En línea]. Available: 9 <https://invima.gov.co/biblioteca/decreto-1843-1991-regulacion-plaguicidas>.

]

[Icontec Internacional, «Productos para la industria Agrícola. Productos orgánicos usados 6 como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo,» 23 Marzo 2011. 0 [En línea]. Available:] [https://www.cali.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=visor pdf&file=https%3A%2F%2Fwww.cali.gov.co%2Floader.php%3FlServicio%3DTools2% 26lTipo%3Ddescargas%26lFuncion%3DexposeDocument%26idFile%3D31850%26tmp %3Dfec90219877226beb4cd98e1fdc](https://www.cali.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=visorpdf&file=https%3A%2F%2Fwww.cali.gov.co%2Floader.php%3FlServicio%3DTools2%26lTipo%3Ddescargas%26lFuncion%3DexposeDocument%26idFile%3D31850%26tmp%3Dfec90219877226beb4cd98e1fdc).

[Ministerio de la Protección Social, «Invima Resolucion 4254 de 2011: Reglamento 6 Técnico sobre Rotulado de Alimentos Derivados de OGM para Consumo Humano,» 22 1 Septiembre 2011. [En línea]. Available: [https://www.invima.gov.co/biblioteca/resolucion- \] 4254-2011-rotulado-alimentos-ogm](https://www.invima.gov.co/biblioteca/resolucion-4254-2011-rotulado-alimentos-ogm).

[Instituto Colombiano Agropecuario, «ICA Resoluciones MSF Y RT 2020R068370,» 27 6 Mayo 2020. [En línea]. Available: [https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-2 ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2020/2020r68370](https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-2%20ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2020/2020r68370).

]

[Republica de Colombia, «Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Decreto 6 Numero 1076 de 2015,» 26 Mayo 2015. [En línea]. Available:

3 <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de->
] 2015.pdf.

[M. H. a. H. H. M. R. Saidur, «Energy and exergy analysis of absorption refrigerations
6 systems,» *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 15, nº 8, pp. 3734-3746, 2011.

4

]

[R. R. a. S. A. K. K. E. Herold, «Absorption Chillers and Heat Pumps,» de *CRC Press*,
6 Florida, United States, 2016.

5

]

[D. Ziegler, «Thermodynamic optimization of absorption refrigeration cycles,» *Int. J.*
6 *Refrigeration*, vol. 22, nº 5, pp. 394-404, 1999.

6

]

[M. O. McLinden et al., «Hybrid absorption-compression refrigeration systems,» *Int. J.*
6 *Refrigeration*, vol. 35, nº 8, pp. 2100-2112, 2012.

7

]

[E. Shigley, *Mechanical Engineering Design*, New York: McGraw Hill, 2004.

6

8

]

[N. Trautman, «C/N Ratio,» *Cornell Waste Management Institute*.

6

9

]

[I. Vera, «Potencial de Generación de Biogas y Energia electrica Parte I: Excremento de 7 Bovino y Porcino,» *Ingenieria, Investigación y Tecnologia*, 2014.

0

]

[J. J. C. y. K. S. C. Y. Cheng, «Inhibition of anaerobic digestion process: A review,» 7 *Bioresource Technology*, nº 10, pp. 4044-4064, 2008.

1

]

[D. D. y. A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources*, Weinheim: Wiley- 7 VCH, 2011.

2

]

[A. Weiland, «Biogas production: current state and perspectives,» *Applied Microbiology*, 7 vol. 85, pp. 849-860, 2010.

3

]

[S. S. y. K. N. P. Viswanath, «Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes 7 for biogas production,» *Bioresource Technology*, vol. 40, nº 1, pp. 43-48, 1992.

4

]

[A. T. y. T. Lemma, «Production and Evaluation of Biogas from Mixed Fruits and Vegetable 7 Wastes Collected from Arba Minch Market,» *American Journal of Applied Chemistry*, vol. 5 7, p. 185, 2019.

]

[J. Hilbert, «Manual para la producción de biogás,» Argentina, Instituto Nacional de 7 Tecnologia Agropecuaria, 2021.

6

]

[M. Á. Gonzalez, «Modelo integrador para el diseño de una planta de producción de biogás a partir del residual porcino,» Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2021.

7

]

[Z. Y. H. G. e. a. J. Huang, «Chemical structures and characteristics of animal manures and composts during composting and assessment of maturity indices,» *PloS One*, vol. 12, nº 8 6, 2017.

]

[M. B. y. J. Banks, «Anaerobic digestion of solid organic wastes for methane production: A review,» *Bioresource Technology*, vol. 74, nº 1, pp. 1-18, 2000.

9

]

[.. J. W et al, «Characteristics of fruits and vegetable wastes as feedstocks for anaerobic digestion,» *Bioresource Technology*, vol. 102, nº 7, pp. 4521-4527, 2011.

0

]

[J. Sosa, Manual técnico de biodigestores rurales, Managua, Nicaragua, 1999.

8

1

]