



**Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental**

**“Análisis de Factibilidad técnica-económica de la Producción de
Biogás a partir de los Residuos Orgánicos del Mercado Cardonal
de Valparaíso”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**VICENTE GÓMEZ ORELLANA
PROFESOR GUÍA: MARÍA LORENA ÁLVAREZ SÁNCHEZ**

VALPARAÍSO, 2024

RESUMEN

El Mercado Cardonal de Valparaíso es una fuente de residuos, principalmente de residuos sólidos orgánicos (RSO), los cuales no son valorizados ni gestionados adecuadamente. En Valparaíso, aproximadamente el 72.4% de los residuos asimilables a los domiciliarios corresponde a una fracción orgánica que podría ser tratada mediante compostaje u otro método, evitando así su acumulación en el relleno sanitario.

El presente trabajo se enfoca en la evaluación técnica y económica de la producción de biogás a partir de los RSO del Mercado Cardonal. En primera instancia se realizó la caracterización de los residuos que son generados en este establecimiento identificando disponibilidad y volumen diario generado. Posteriormente se realizó el ensayo de Potencial Bioquímico del Metano (BMP) el cual consistió en llevar a cabo pruebas para determinar la cantidad de metano que se puede generar a partir de mezclas de diferentes residuos orgánicos disponibles. Para desarrollar el diseño preliminar, se tomaron en cuenta los resultados del ensayo BMP, considerando los parámetros técnicos de diseño y el potencial energético del biogás generado. Además, se evaluaron los costos asociados a la implementación del sistema, incluyendo la construcción y operación del biodigestor. Paralelamente, se analizaron los beneficios económicos esperados a partir de la valorización energética de los residuos orgánicos generados en el Mercado Cardonal, destacando su contribución potencial al aprovechamiento sostenible de recursos

Como resultado del primer objetivo se obtuvo una significativa cantidad de masa residuos orgánicos de interés que alcanza las 4,75 [ton/día], y se determinó los residuos principales en base a la disponibilidad de comercialización, por lo que selecciono como sustratos para poder llevar a cabo el BMP teniendo en consideración la estabilidad y disponibilidad a lo largo del año. Se seleccionó a las frutas como: manzana, pera y plátano, mientras que por parte de las verduras y hortalizas se seleccionó la remolacha, papa, zanahoria, hojas de descarte de diferentes verduras y el zapallo que corresponden a productos que muestran alta disponibilidad y representan una fracción importante en la generación de residuos.

A partir de 3 mezclas que se denominaron M1, M2 y M3 donde varían su composición en lo que es frutas y verduras, la que obtuvo un mayor rendimiento en cuanto a la generación de biogás fue M2, alcanzando una producción real de 16,90 [mL de Biogás/gSV], obteniendo un potencial de generación de 4.036,80 [m³/año] de biogás, con un digestor que debe alcanzar los 443 [m³] para su implementación

En la evaluación técnica y económica, se analizó la viabilidad global del proyecto, teniendo en cuenta diversos factores claves. A través de los análisis de sensibilidad e indicadores económicos Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) indicando su viabilidad económicamente, se examinan cómo distintos factores operativos, como costos, ingresos y la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto, además de otros parámetros relevantes, pueden influir en la rentabilidad del proyecto

INDICE

1.	Introducción	8
1.1.	Problemática de Residuos Sólidos Orgánicos	8
1.2.	Problemática de Emisiones Generadas en Relleno Sanitarios	8
1.3.	Biomasa como Combustible	9
1.4.	Estado del Biogás en Chile.....	9
1.5.	Área de Estudio.....	10
1.6.	Biogás	12
1.6.1.	Composición del biogás.....	12
1.6.2.	Aprovechamiento del Biogás	13
1.7.	Marco Legal del Biogás en Chile	13
1.7.1.	Política Nacional de Residuos 2018-2030	13
1.7.2.	Normativa Técnica.....	14
2.	Problema	16
3.	Objetivos.....	17
3.1.	Objetivo General	17
3.2.	Objetivos Específicos	17
4.	Revisión Bibliográfica.....	18
4.1.	Recolección Selectiva de la Materia Orgánica.....	18
4.1.1.	Fracción Orgánica de Origen Comercial	18
4.2.	Digestión Anaeróbica	19
4.2.1.	Etapas de la digestión Anaerobia	20
4.2.2.	Parámetros ambientales y operacionales que afectan el proceso.....	23
4.3.	Biodigestor Anaeróbico	28
4.3.1.	Tipos de Biodigestores	28
4.3.2.	Modos de Operación del Digestor.....	30
4.4.	Ensayo Potencial Bioquímico del Metano.....	31

4.4.1.	Parámetros que influyen en la BMP	32
5.	Materiales y Métodos	33
5.1.	Caracterización de los Residuos sólidos orgánicos generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso	33
5.2.	Cuantificación de los Residuos sólidos orgánicos Generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso	33
5.3.	Ensayo Potencial Bioquímico del Metano.....	34
5.3.1.	Análisis del Inoculo y Sustrato	35
5.4.	Dimensionar el Biodigestor preliminares del Sistema de generación de gas	37
5.4.1.	Determinación de Rendimiento de las Mezclas	37
5.4.2.	Parámetros de Diseño	37
5.4.3.	Potencial Térmico del Biogás Producido.....	38
5.4.4.	Evaluación de Costos	40
5.4.5.	Evaluación de Ingresos.....	41
6.	Resultados	42
6.1.	Caracterización de los Residuos Generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso.....	42
6.2.	Cuantificación de los residuos generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso	46
6.3.	Ensayo de Potencial Bioquímico del Metano.....	47
6.3.1.	Caracterización del Sustrato.....	48
6.3.2.	Evaluación del rendimiento del biogás proveniente de diferentes mezclas	51
6.4.	Escala a las condiciones del Mercado Cardonal.....	61
6.4.1.	Potencial térmico del Biogás generado.....	62
6.5.	Dimensionamiento y Diseño del Biorreactor	64
6.5.1.	Volumen de Diseño de Digestor	64
6.5.2.	Volumen del Gasómetro de almacenamiento	65
6.6.	Evaluación Económica	65

6.6.1.	Inversión.....	65
6.6.2.	Ingresos y Ahorros.....	66
6.6.3.	Egresos	67
6.6.4.	Resultado del Flujo de Caja.....	68
7.	Discusión	71
8.	Conclusión	73
8.1.	Recomendaciones.....	74
9.	Bibliografía.....	75
10.	Anexos.....	78
	Anexo A. Encuesta a Administrador del Mercado Cardonal	78
	Anexo B. Batea Compactadora de Recolección del Mercado Cardonal.....	79
	Anexo C. Plano del Primer piso del Mercado Cardonal.....	80
	Anexo D. Plano del Segundo piso del Mercado Cardonal de Valparaíso	81
	Anexo E. Planilla de Productos para cada Locatario del Mercado Cardonal Exterior ...	82
	Anexo F. Planilla de Productos para cada locatario del Mercado Cardonal Interior.....	84
	Anexo G. Métodos Analíticos.....	88
	Anexo H. Determinación de las características de las Muestras	90
	Anexo I. Detalle de la Inversión.....	91
	Anexo J. Depreciación y Amortización de la deuda.....	92
	Anexo K. Monitoreo diario de Biogás	93
	Anexo L. Flujo de Caja.....	94

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición del biogás según Sustrato.....	12
Tabla 4.1 Concentraciones Inhibidoras.....	25
Tabla 4.2 Tiempo de Retención Hidráulica según condiciones climáticas.....	26
Tabla 5.1 Antecedentes de Residuos del Mercado Cardonal.....	34
Tabla 5.2 Costos Asociados a la producción de biogás.....	40
Tabla 6.1 Frutas y verduras seleccionadas.....	46
Tabla 6.2 Antecedentes de Residuos del Mercado.....	47
Tabla 6.3 Características del Inoculo.....	49
Tabla 6.4 Composición de las Mezclas.....	49
Tabla 6.5 Características de las Mezclas utilizadas.....	50
Tabla 6.6 Rendimiento de las Mezclas generadas.....	60
Tabla 6.7 Requerimiento de Autoabastecimiento y Potencial de Energía.....	62
Tabla 6.9 Detalle del Monto de Inversión.....	64
Tabla 6.10 Detalle de Ingresos.....	65
Tabla 6.11 Detalle de Costos.....	66
Tabla 6.12 Indicadores económicos.....	67
Tabla 6.13 Sensibilidad ante la variación del Costo de Operación.....	68
Tabla 6.14 Sensibilidad ante la variación del Monto de Inversión.....	68
Tabla 6.15 Sensibilidad ante la variación de Ventas de Digestato.....	70
Tabla 6.16 Sensibilidad ante la variación de Ventas de Bonos de Carbono.....	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Imagen satelital del Mercado Cardonal.....	11
Figura 1.2 Fotografía del Mercado Cardonal.....	11
Figura 4.1 Esquema de proceso de Digestión Anaerobia.....	20
Figura 4.2 Reacciones en Metanogénesis.....	22
Figura 4.3 Relación de Temperatura y Crecimiento bacteriano.....	24
Figura 4.4 Esquema Biodigestor de Mezcla Completa.....	28
Figura 4.5 Esquema Biodigestor Flujo Pistón.....	29
Figura 4.6 Esquemas de digestores con Retención de biomasa.....	30
Figura 5.1 Diagrama de Flujo del Proceso de BMP.....	35
Figura 6.1 Frutas con mayor disponibilidad de venta en el interior del Mercado.....	42
Figura 6.2 Verduras con mayor disponibilidad de venta en el interior del Mercado.....	43
Figura 6.3 Otros productos de disponibilidad comercial en el interior del Mercado.....	43
Figura 6.4 Frutas con mayor disponibilidad de venta en el exterior del Mercado.....	44
Figura 6.5 Verduras con mayor disponibilidad de venta en el exterior del Mercado.....	45
Figura 6.6 Montaje de Biorreactores.....	48
Figura 6.7 Volumen de generación diaria de biogás de Muestra Control.....	51
Figura 6.8 Volumen promedio de biogás generado diario de muestra control.....	51
Figura 6.9 Volumen promedio acumulado de la Muestra Control.....	52
Figura 6.10 Volumen de generación diaria de biogás de M1.....	53
Figura 6.11 Volumen promedio de biogás generado diario de M1.....	53
Figura 6.12 Volumen promedio acumulado de la M1.....	54
Figura 6.13 Volumen de generación diaria de biogás de M2.....	55
Figura 6.14 Volumen promedio de biogás generado diario de M2.....	55
Figura 6.15 Volumen promedio acumulado de la M2.....	56
Figura 6.16 Volumen de generación diaria de biogás de M3.....	57
Figura 6.17 Volumen promedio de biogás generado diario de M3.....	57
Figura 6.18 Volumen promedio acumulado de la M3.....	58
Figura 6.19 Comparación del Volumen acumulado de las mezclas.....	59
Figura 6.20 Diferencia de pH de las Muestras.....	59

LISTADO DE ACRONIMOS

BMP: Ensayo Potencial Bioquímico de Metano (Biochemical Methane Potential)

CH₄: Metano

CNE: Comisión Nacional de Energía

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

DQO: Demanda Química de Oxígeno

GEI: Gases Efecto Invernadero

H₂: Hidrogeno

H₂S: Ácido Sulfhídrico

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

kWh: Kilovatio- hora

MMA: Ministerio de Medio Ambiente

NH₃: Amoniaco

O₂: Oxígeno

ONU: Organización Naciones Unidas

RSD: Residuos Sólidos Domiciliarios

RSO: Residuos Sólidos Orgánicos

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

SINADER: Sistema Nacional de Declaración de Residuos

ST: Solidos Totales

SV: Solidos Volátiles

TRH: Tiempo de Retención Hidráulica

USEPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

VCO: Velocidad de Carga Orgánica

1. Introducción

1.1. Problemática de Residuos Sólidos Orgánicos

La generación excesiva de residuos sólidos urbanos como otra problemática del inevitable crecimiento poblacional y urbanización ha llevado a un ineficiente manejo y gestión de estos, provocando gran cantidad de focos de basura y una saturación de los sitios de disposición final influyendo directamente en la calidad de vida de las poblaciones. En países latinoamericanos se generan grandes volúmenes de residuos sólidos, estimándose un total de 540.000 toneladas por día, donde alrededor del 75% corresponde a una fracción orgánica de estos residuos (ONU, 2017). Se proyecta que para los próximos 30 años esta tendencia vaya en incremento, generando una importante acumulación, llevando el problema al destino final de estos residuos donde mayoritariamente son vertederos sin un tratamiento previo o valorización (Banco Mundial, 2018)

A nivel nacional, al año 2019 la generación de residuos alcanzaba los 20 millones de toneladas anuales, donde un 96,9% corresponde a residuos no peligrosos de los cuales el 79% son llevados a disposición final, mientras que el otro 21% son valorizados de alguna forma, entre las que destaca el compostaje (MMA, 2019).

En la Comuna de Valparaíso, el 18,4% de los residuos corresponden a materiales reciclables, es decir, residuos que tienen un potencial valor comercial y podrían ser dirigidos hacia un destino distinto a la disposición final. Donde 72,4% corresponde a una fracción residuos orgánicos, de los cuales una parte puede ser tratada en la fuente mediante compostaje u otro tratamiento, evitando así su llegada a los sitios de disposición final.

1.2. Problemática de Emisiones Generadas en Relleno Sanitarios

Al año 2019, en Chile el 79% de los residuos son llevados a disposición final, que principalmente son los rellenos sanitarios y vertederos que se encuentran operativos actualmente. En el caso de la Región de Valparaíso, según el último reporte de residuos del Relleno Sanitario El Molle declarado en el RETC en mayo de 2024, que abarca las comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Casablanca, Concón, entre otras. Se expresaron una totalidad de 10.109,9 [ton/día] de RSD declarados en el SINADER. El manejo final de grandes volúmenes de residuos orgánicos conlleva a la descomposición de la materia orgánica en dichos residuos, resultando la emisión de una combinación de gases. Esta mezcla está mayormente compuesta por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), ambos reconocidos como gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al cambio climático

1.3. Biomasa como Combustible

La biomasa es un término que engloba la materia orgánica renovable proveniente de diversas fuentes, tanto naturales como artificiales. Estas fuentes incluyen materiales vegetales, como residuos de cultivos, madera, o residuos agrícolas; animales, como estiércol o desechos de procesos ganaderos; y también la transformación de estos materiales mediante procesos biológicos, físicos o químicos (CNE, 2007). Lo que distingue a la biomasa como recurso es su capacidad para ser renovada de forma continua, ya que los organismos que la componen pueden crecer nuevamente para reemplazar los materiales extraídos. Esto contrasta con fuentes de energía no renovables, como los combustibles fósiles, cuya disponibilidad es limitada.

La energía de la biomasa se refiere al potencial energético que puede ser liberado al utilizarla como fuente de energía. Existen diferentes métodos para aprovecharla, siendo los más comunes la combustión directa para generar calor o electricidad, y la conversión de la biomasa en otros combustibles más manejables, como el biogás (producto del proceso de digestión anaeróbica) y biocombustibles líquidos como el biodiésel o el bioetanol. Estos combustibles son producidos a partir de la biomasa mediante procesos de transformación química o biológica que permiten obtener formas de energía más eficientes y adecuadas para su uso en vehículos, maquinarias o redes eléctricas. (CNE, 2007).

1.4. Estado del Biogás en Chile

En Chile, el biogás contribuye minoritariamente a la matriz energética, la representa una fracción relativamente pequeña siendo menor al 1% de la generación total en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN, 2024). en comparación con otras fuentes de energía renovable. En 2024, el biogás forma parte de las energías renovables no convencionales (ERNC), que en conjunto constituyen aproximadamente el 41% de la generación eléctrica del país (Reporte Minero, 2024)

A pesar de su potencial, gran parte del biogás generado en Chile (alrededor del 40%) es incinerado sin aprovechamiento energético. Sin embargo, existen proyectos en desarrollo y en operación que utilizan biogás para cogeneración, energía térmica y eléctrica (Red Agrícola, 2017).

Fomentar la generación de energía a partir de biogás es, sin duda, una excelente iniciativa. Además de permitir la producción de energía eléctrica y térmica, promueve un manejo adecuado y responsable de los residuos. Esta tecnología puede implementarse en cualquier industria que genere desechos orgánicos, como la ganadería, la agricultura, el sector forestal y el tratamiento de aguas residuales. También es importante considerar el sector industrial y comercial, especialmente el alimenticio, que produce grandes cantidades de residuos orgánicos aptos para la generación de biogás.

1.5. Área de Estudio

El estudio será realizado en el Mercado Cardonal, edificio operativo desde 1912, conocido por ser el principal centro cívico del comercio hortofrutícola ubicado en el corazón legislativo de la Comuna de Valparaíso como se observa en la Figura 1.1. Este abarca un área de 3.928 [m²] y una superficie edificada de 9.932 [m²]. El actual edificio que se presenta en la Figura 1.2. reemplazó al antiguo mercado de abastos del barrio El Cardonal, que fue destruido por el terremoto de 1906. Esta obra refleja la gran tendencia hacia las estructuras metálicas de la época, alrededor de su fachada, se puede apreciar una notable exhibición de colores y texturas de productos agrícolas.

El primer piso y exterior de la infraestructura corresponde a locales principalmente hortofrutícolas, mientras que el segundo piso se encuentran los restaurantes y oficinas.

El Mercado Cardonal actualmente no cuenta con un manejo adecuado de sus residuos orgánicos, lo cual es preocupante dado que es una fuente significativa de generación de estos desechos. Esto hace imperativo desarrollar e implementar medidas que permitan la valorización de una parte sustancial de estos residuos. Además, debido a su ubicación en un sector céntrico y de alta concurrencia, el mercado enfrenta una notable informalidad, tanto en los puestos establecidos como en el comercio ambulante que prolifera en sus alrededores. Esta situación se ve agravada por la falta de un sistema de fiscalización eficiente, creando una serie de problemas que deben abordarse de manera integral, considerando los aspectos económicos, sociales y ambientales. Es crucial implementar estrategias que no solo mejoren la gestión de residuos, sino que también fortalezcan la regulación y el ordenamiento del comercio en la zona, promoviendo así un entorno más sostenible.



Figura 1.1. Imagen satelital del Mercado Cardonal (Fuente: Google Earth)



Figura 1.2. Fotografía de Mercado Cardonal (Fuente: Figueroa, 2023)

1.6. Biogás

El término de biogás aduce a la idea de un gas de origen biológico, proveniente de la descomposición bajo condiciones anaeróbicas de la materia orgánica, generada principalmente de la actividad microbiana de bacterias específicas. Esta mezcla de compuestos gaseosos, principalmente metano y dióxido de carbono que adjudica las características combustibles al gas con diferentes aplicaciones en la actividad humana (Mejía, et al. 2005).

1.6.1. Composición del biogás

En el proceso de descomposición microbiológica de la materia orgánica se compone mayormente por metano y dióxido de carbono, además, de otros componentes trazas o de menor porcentaje de composición y este dependerá del tipo de residuo que se maneja como se refleja en la Tabla 1.1. Dependiendo del contenido de azúcares, lípidos y proteínas de los diferentes sustratos, la composición del biogás variará en el porcentaje contenido de metano. Posterior al proceso de generación, para el uso final del biogás, se le deben aplicar diferentes tratamientos con el fin de eliminar los compuestos no deseados (Ministerio de Energía, 2012) De todos los compuestos del biogás, el metano es el único energéticamente utilizable puesto que cuando su contenido es mayor al 45% este adquiere un carácter de inflamabilidad.

Tabla 1.1. Composición del biogás según Sustrato. (Fuente: CIMET ,2008)

Compuesto	Residuos Agrícolas y Ganaderos	Lodos de EDAR	Residuos Industriales	Vertederos de RSU
CH ₄	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
CO ₂	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
N ₂	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
O ₂	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
H ₂	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
CO	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
H ₂ S	100-7000 [ppm]	0-1%	0-8%	0,5-100 [ppm]
NH ₃	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Vapor de Agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación
Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm

1.6.2. Aprovechamiento del Biogás

Mediante la combustión de la fracción de metano, el biogás puede emplearse para generar energía térmica, eléctrica, y también para la generación simultánea de ambas (cogeneración). Con menos frecuencia, se utiliza para producir energía mecánica. Además, el biogás puede sustituir a otros combustibles como el gas natural o el gas de ciudad

1.6.2.1. *Potencial Eléctrico*

Para generar electricidad se pueden emplear turbinas o motores de combustión, donde el combustible se quema para hacer girar un motor que impulsa un alternador, produciendo electricidad que puede ser directamente exportada a la red. La electricidad generada puede usarse para satisfacer las necesidades locales, como alimentar los sopladores del sistema de recolección o el sistema de tratamiento del biogás, o más comúnmente, para venderse a la red eléctrica local (U.S. EPA, 2012).

1.6.2.2. *Potencial Térmico*

El uso más sencillo del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En lugares donde los combustibles son escasos, los pequeños sistemas de biogás pueden proporcionar la energía necesaria para actividades básicas como cocinar y calentar agua. El poder calorífico del biogás depende directamente de la concentración de metano. Como referencia, el poder calorífico de 1 [m³] de metano es de 9,97 [kWh] (Ponce, 2016)

Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para funcionar con biogás, simplemente ajustando la relación aire-gas. El requisito de calidad del biogás para los quemadores es bajo; es necesario alcanzar una presión de gas de 8 a 25 [mbar] y mantener niveles de H₂S inferiores a 100 [ppm] para lograr un punto de rocío de 150 [°C.] (Varnero, 2011)

1.7. Marco Legal del Biogás en Chile

1.7.1. Política Nacional de Residuos 2018-2030

La que tiene como objetivo principal la gestión sostenible de los recursos naturales a través de la economía circular y el manejo ambientalmente racional de los residuos. Esta política busca prevenir la generación de residuos y aumentar la tasa de valorización de residuos hasta un 30% para el año 2030. Para lograrlo, se implementarán diversas acciones, entre ellas la elaboración de decretos para la ejecución de la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP).

La Política Nacional de Residuos incluye la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos, que promueve el compostaje y la generación de biogás como métodos de valorización, alineándose con los principios de la economía circular para proteger el medio ambiente y mejorar la calidad de vida de los habitantes

1.7.1.1. Ley 20.920. Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productos y fomento al reciclaje

La Ley 20.920 busca reducir la generación de residuos, promover su valorización y proteger el medio ambiente mediante la Responsabilidad Extendida del Productor (REP). Aunque los residuos orgánicos no están clasificados como prioritarios, se reconoce su relevancia debido a que representan más del 50% de los residuos domiciliarios y su tasa de reciclaje es inferior al 1%. Para abordar este desafío, la ley fomenta medidas como la separación en origen, valorización mediante compostaje y digestión anaeróbica, y la creación de programas municipales de recolección selectiva. También incentiva campañas educativas y proyectos que aumenten las tasas de reciclaje, buscando integrar los residuos orgánicos en estrategias de economía circular. Esto contribuye a reducir la presión sobre rellenos sanitarios y las emisiones de gases de efecto invernadero.

1.7.2. Normativa Técnica

1.7.2.1. Decreto Supremo 119 Reglamento de seguridad de las plantas de biogás e introduce modificaciones al reglamento de instaladores de gas

El Decreto Supremo 119 de 2017, emitido por el Ministerio de Energía de Chile, establece un marco regulatorio enfocado en la seguridad y operación de plantas de biogás. Su principal objetivo es asegurar que estas instalaciones cumplan con estándares técnicos y de seguridad desde su diseño hasta el término de sus operaciones. Los aspectos más relevantes incluyen:

- **Diseño y Construcción:** Define los requisitos técnicos mínimos para la instalación y configuración de las plantas, considerando las características del biogás, los materiales utilizados y las medidas de prevención de riesgos.
- **Operación y Mantenimiento:** Regula las actividades operativas, el monitoreo continuo y las rutinas de mantenimiento para evitar fallas que puedan poner en riesgo a personas o el medio ambiente.
- **Inspecciones y Seguridad:** Establece que las plantas deben someterse a inspecciones periódicas realizadas por organismos acreditados para garantizar su conformidad con las normas.

1.7.2.2. *NCh 3381:2016 “Gestión de Residuos – Plantas de Digestión anaeróbica – Consideraciones para el diseño y operación”*

Establece los requisitos para el diseño, operación y mantenimiento de plantas de biogás basadas en digestión anaeróbica. Su objetivo es garantizar que estas instalaciones cumplan estándares de seguridad, eficiencia energética y sostenibilidad ambiental, esta abarca criterios para el dimensionamiento de los digestores anaeróbicos, considerando parámetros como la capacidad de tratamiento, el tiempo de retención hidráulico y las características de los residuos. Recomendaciones sobre los materiales de construcción para garantizar la durabilidad y resistencia del equipo frente a las condiciones operativas. Además, propone gestión de los subproductos generados, como el biogás y el digestato, asegurando su aprovechamiento o disposición adecuada

2. Problema

La creciente generación de residuos sólidos orgánicos representa un desafío ambiental significativo, exacerbado por el aumento poblacional, el consumismo y la gestión inadecuada de los recursos. En lugares como el Mercado Cardonal de Valparaíso, se genera una gran cantidad de residuos orgánicos, principalmente provenientes de frutas, verduras y hortalizas. Sin embargo, estos residuos no siempre reciben el tratamiento adecuado, lo que agrava aún más el problema de manejo de desechos en la zona.

El Mercado Cardonal, una de las principales fuentes de generación de residuos sólidos orgánicos en Valparaíso, refleja los desafíos del manejo de residuos hortofrutícolas en zonas urbanas. Actualmente, gran parte de estos desechos es desechada directamente al Relleno Sanitario El Molle, lo que contribuye al aumento de la carga operativa de este recinto y a la emisión descontrolada de GEI. En este contexto, se presenta la necesidad urgente de desarrollar una solución que mitigue el impacto ambiental causado por la disposición inadecuada de los residuos orgánicos del Mercado Cardonal. Una opción viable para enfrentar este desafío es la implementación de un sistema de digestión anaeróbica, el cual permitiría la valorización de los residuos generados, transformándolos en biogás. Este biogás podría ser utilizado como una fuente de energía renovable, bien sea para la producción de electricidad o como energía térmica, contribuyendo así a la reducción de emisiones de GEI y a la disminución de la sobrecarga en el relleno sanitario local.

La solución propuesta no solo aborda la problemática puntual del Mercado Cardonal, sino que también tiene el potencial de ser replicada en otras comunas o establecimientos con características similares, impulsando un modelo de gestión de residuos más sostenible.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Analizar de forma técnica-económica la generación de Biogás a partir de Residuos Sólidos Orgánicos que son generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso

3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los Residuos Sólidos Orgánicos generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso
- Determinar la generación de Biogás mediante un Ensayo Potencial Bioquímico del Metano
- Realizar el diseño preliminar del Sistema de generación de gas teniendo como uso las cocinerías existentes en el Mercado
- Evaluar los costos y beneficios asociados a la producción de Biogás

4. Revisión Bibliográfica

4.1. Recolección Selectiva de la Materia Orgánica

La recogida selectiva de materia orgánica es un proceso esencial para la gestión sostenible de los residuos, centrado en separar los desechos orgánicos del resto de la basura. Esta práctica permite el tratamiento adecuado de estos residuos, facilitando su conversión en compost o biogás a través de procesos de compostaje o digestión anaerobia. Al recolectar de manera selectiva la materia orgánica, se reduce significativamente la cantidad de residuos que terminan en los vertederos, disminuyendo así las emisiones de gases de efecto invernadero y promoviendo la reutilización de los recursos naturales. Además, esta iniciativa contribuye a la creación de suelos más fértiles y al desarrollo de fuentes de energía renovable, beneficiando tanto al medio ambiente como a la economía circular.

4.1.1. Fracción Orgánica de Origen Comercial

Los productores de residuos del sector comercial se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- a) **Establecimientos de venta y distribución de alimentos:** Este grupo incluye fruterías, panaderías, carnicerías, pescaderías, ultramarinos, supermercados, hipermercados y mercados de abastos. Todos estos negocios generan residuos como restos de frutas, verduras, productos de panadería y carne que no se venden.
- b) **Establecimientos del sector HORECA (Hoteles, Restaurantes y Cafeterías):** En este grupo se encuentran bares, cafeterías, restaurantes y hoteles. Estos lugares producen residuos en forma de restos de comida, ingredientes no utilizados y desperdicios de preparación de alimentos.
- c) **Centros públicos y privados con servicios de restauración colectiva:** Incluye hospitales, centros educativos con comedor, centros de la tercera edad, centros asistenciales, centros penitenciarios y cuarteles. En estos centros, la preparación de grandes volúmenes de comida genera una cantidad significativa de residuos.

Cada uno de estos grupos tiene características y necesidades específicas en cuanto a la gestión de sus residuos, lo que requiere enfoques adaptados para su recolección, tratamiento y valorización.

Se consideran una serie de recomendaciones para la recogida la fracción orgánica de los residuos municipales, Para implementar un sistema eficaz de recogida de biorresiduos de origen comercial, es esencial seguir una serie de pasos estructurados y metódicos. Estas recomendaciones aseguran que la gestión de los residuos orgánicos sea eficiente, sostenible y adaptada a las necesidades específicas de cada productor (Consejería de Desarrollo Sostenible de Castilla, 2020).

1. **Identificar todos los productores de biorresiduos de origen comercial:** El primer paso es llevar a cabo una identificación exhaustiva de todos los establecimientos comerciales que generan biorresiduos. Esto incluye fruterías, panaderías, carnicerías, pescaderías, supermercados, hipermercados, bares, cafeterías, restaurantes, hoteles, hospitales, centros educativos con comedor, centros de la tercera edad, centros asistenciales, centros penitenciarios y cuarteles. Una base de datos detallada de estos productores es fundamental para la planificación del sistema de recogida.
2. **Clasificarlos por tipología, generación y modelo de recogida:** Una vez identificados los productores, se deben clasificar según el tipo de establecimiento (venta y distribución de alimentos, sector HORECA, centros con restauración colectiva), la cantidad de biorresiduos que generan y el modelo de recogida más adecuado para cada uno. Esta clasificación permite adaptar las estrategias de recogida a las características específicas de cada productor, optimizando así el proceso de gestión de residuos.
3. **Ubicarlos en un mapa del municipio y asignarles un contenedor de servicio:** Con la información recopilada y clasificada, se debe crear un mapa del municipio que localice geográficamente a todos los productores de biorresiduos. A cada uno de estos productores se le debe asignar un contenedor específico para la recogida de la fracción orgánica. La ubicación de los contenedores debe ser estratégica, asegurando que sean fácilmente accesibles para los productores y para los servicios de recogida.
4. **Establecer un programa de seguimiento de los contenedores asignados:** Para garantizar la eficiencia y sostenibilidad del sistema de recogida, es vital establecer un programa de seguimiento y monitoreo de los contenedores asignados. Este programa debe incluir la supervisión regular de la utilización de los contenedores, el estado de los mismos, la frecuencia de recogida y la cantidad de residuos recolectados. Además, se deben implementar mecanismos de retroalimentación para que los productores puedan reportar cualquier problema o sugerencia relacionada con el sistema de recogida.

Estas recomendaciones aseguran una gestión efectiva de los biorresiduos comerciales, contribuyendo a reducir el impacto ambiental, mejorar la sostenibilidad y optimizar los recursos municipales destinados a la gestión de residuos.

4.2. Digestión Anaeróbica

El proceso de digestión anaerobia corresponde a un mecanismo bioquímico natural, donde se ve involucrada la fermentación microbiana a partir de bacterias específicas en ausencia de oxígeno, degradando la materia orgánica, provocando la generación de una mezcla de gases habitualmente conocido como biogás y un subproducto denominado digestato o Biol (Arrieta, 2016). Este subproducto, conocido como digestato, es una suspensión acuosa la cual presenta un alto porcentaje de nutrientes, por lo que generalmente es utilizado como fertilizante orgánico. Además, este goza de un alto grado de preservación lo que da mayor facilidad a nuevos y suspendidos biorreactores anaerobios de volver a ponerse en marcha (Lorenzo y Obaya, 2005).

Este proceso se lleva a cabo en diferentes ambientes, ya sean de origen natural, como por ejemplo los sistemas gastrointestinales, en sedimentos de cuerpos de agua o turberas, como también en ambientes controlados como fermentadores o biodigestores (Vincent, 1997). Las bacterias específicas que realizan este proceso se distinguen como bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas, el proceso se lleva a cabo en cuatro etapas complejas, donde actúan cada grupo de estas bacterias mencionadas.

4.2.1. Etapas de la digestión Anaerobia

En el transcurso de la digestión anaerobia se dan a lugar cuatro etapas como se ilustra en la Figura 1.3. y están estrechamente ligadas entre sí en una temporalidad sucesiva, las cuales son las fundamentales para la producción de biogás: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. A la vez existen otros procesos y reacciones que no están vinculadas a la producción de biogás, entre estas la sulfurogénesis es importante en la digestión anaerobia ya que las bacterias sulfurreductoras compiten por el ácido acético y el hidrogeno (Ramos, 2015).

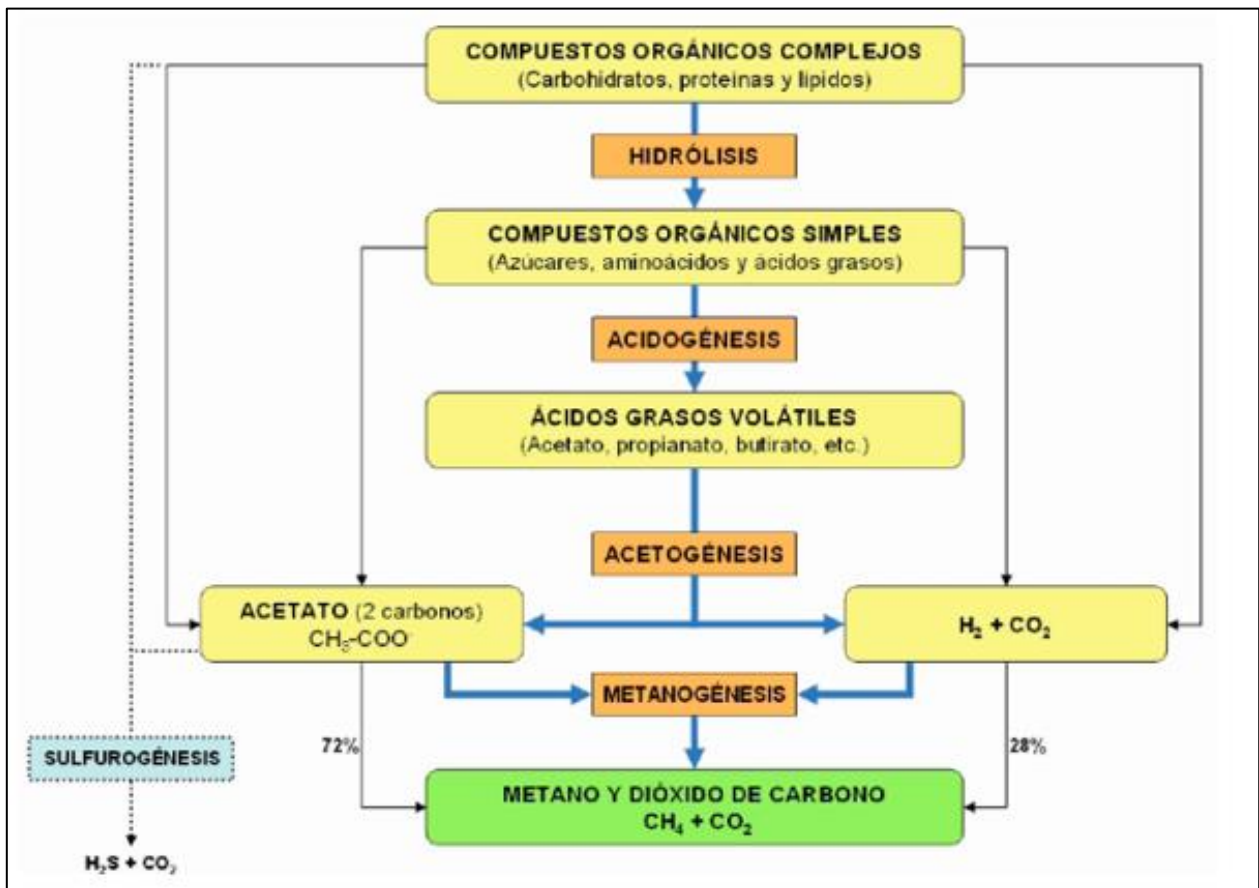


Figura 4.1. Esquema de proceso de Digestión Anaerobia (Fuente: Ramos,2015)

4.2.1.1. Hidrólisis

Es el comienzo del proceso de la digestión anaerobia, en esta etapa grandes polímeros como proteínas, lípidos, carbohidratos, entre otros, son reducidos a compuestos más simples como azúcares y alcoholes por enzimas que son excretadas por bacterias hidrolíticas. Esta conversión permite que exista una fuente de energía y nutrición para la actividad metabólica de los microorganismos anaerobios (Verma, 2002). En la degradación anaerobia de compuestos más complejos o lignocelulósicos la hidrólisis puede ser la etapa limitante del proceso y la que determinara la capacidad orgánica de un digestor anaerobio. (Hilbert, 2003)

Las bacterias involucradas en este proceso corresponden al grupo de las hidrolíticas, con géneros como *Clostridium*, *Staphylococcus* y *bacterioides* encargadas de descomponer los enlaces de las grandes moléculas (Ramos,2015)

Los sustratos más apropiados para el proceso de hidrólisis ya sea ácida o enzimática son comúnmente material de origen vegetal con alto contenido de celulosa, estos incluyen, material y residuos agrícolas, forestales y urbanos (Rogoff & Screve, 2011).

4.2.1.2. Acidogénesis

La acidogénesis es la etapa donde son formados los ácidos mediante los monómeros producidos en la fase de hidrólisis, donde estos cesan para ser convertidos en ácidos grasos volátiles de bajo peso molecular como los son el Ácido acético, propiónico, butírico, láctico, valérico, entre otros. Además, se forma hidrógeno y dióxido de carbono y compuestos orgánicos simples como acetona y alcoholes como metanol, glicerol y etanol. Estas conversiones dependerán de los tipos de bacterias y condiciones ambientales como temperatura y pH que varían las concentraciones de lo producido (Arguelles y Castillo, 2005)

El grupo de bacterias que actúa en esta etapa tiene un rol fundamental en el proceso ya que es la encargada de la producción del sustrato para los otros grupos de bacterias que actúan en etapas posteriores. Además, cumple la función de eliminar las trazas de oxígeno que pueda haber en el sistema. Las principales bacterias facultativas acidogénicas corresponden a los géneros de *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes*, *Escherichia* y *Aerobacter*. (Lopez, 1998)

4.2.1.3. Acetogénesis

Durante la Acetogénesis, hay productos de la fermentación que pueden ser metabolizados de forma directa por las bacterias metanogénicas (Hidrógeno y Ácido Acético), pero también hay otros (Ácidos grasos volátiles, etanol, entre otros) que deben ser convertidos en compuestos más sencillos como acetato e hidrógeno que serán el sustrato que para la etapa metanogénica, las bacterias encargadas de esta transformación son las bacterias acetogénicas (Ramos et al. 2007)

Existe un grupo especial de bacterias que actúan en esta etapa llamadas homoacetogénicas, este tipo de bacterias son aptas para desarrollarse en presencia de azúcares o compuestos monos carbonados (mezclas H_2 y CO_2) produciendo acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, las homoacetogénicas consumen el hidrógeno como sustrato permitiendo la disminución de las presiones parciales de hidrógeno lo que favorece la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas (Ramos et al. 2007).

4.2.1.4. *Metanogénesis*

La etapa que completa la digestión anaerobia corresponde a la metanogénesis, la cual actúan los microorganismos metanogénicos que pueden ser contemplados como los esenciales en el proceso ya que son los responsables de la formación del metano y de la eliminación del sistema de los productos de las etapas anteriores, ya que el metano es formado a partir de sustratos carbonados o moléculas con dos átomos de carbono unidos de manera covalente como acetato, formato, metanol y algunas metilaminas como se refleja en las reacciones presentadas en la Figura 1.4 (Gómez et al. 2007).

Durante esta etapa se pueden identificar dos grupos diferentes de microorganismos en función del sustrato que estos metabolizan, los hidrogenotróficos, los cuales consumen H_2/CO_2 y ácido fórmico. Por otra parte, los acetoclásticos, que son los encargados de consumir el acetato, metanol y aminas del proceso (Martí, 2006). Las principales reacciones que se generan son:

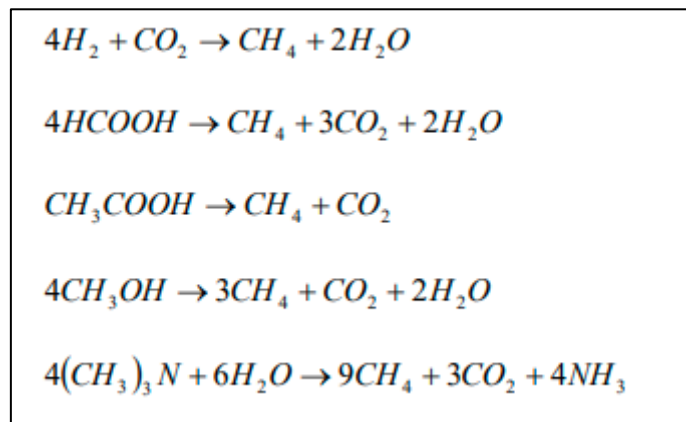


Figura 4.2. Reacciones en Metanogénesis (Fuente: Olaya, 2009)

4.2.2. Parámetros ambientales y operacionales que afectan el proceso

En el proceso de digestión anaerobia, el control de los parámetros ambientales y operacionales son fundamentales para un correcto funcionamiento del tratamiento, dado que de estas condiciones afectara la cinética de las reacciones que se dan a lugar y mantener en un estado estable los microorganismos involucrados en la producción de biogás.

4.2.2.1. *pH*

La biodegradabilidad de la materia orgánica está directamente influenciada por el pH del medio, debido a que depende de este la velocidad con la que se lleva a cabo el proceso y limita la actividad microbiana que influye en la química del tratamiento, ya que los distintos grupos de microorganismos se encuentran en un rango óptimo de tolerancia para un correcto crecimiento (Martí, 2006).

- Acidogénicos: 6-6,5
- Fermentativos: 7,2-7,4
- Acetogénicos: 7,0-7,2
- Metanogénicos:6,5-8,2

La determinación de pH es fundamental ya que condiciona la composición y cantidad de biogás que pueda llegar a producirse en la digestión anaerobia, debido a que los ácidos orgánicos producidos por las bacterias en la etapa acidogénica y acetogénica se generan a una mayor velocidad que las bacterias metanogénicas, lo que implicará que el pH del sistema tenderá al desequilibrio disminuyendo la capacidad de producción del sistema (Gourdon y Vermande, 1987)

Los sistemas de tampón o buffer para regular el pH son esencial para mantener una estabilidad en el proceso, el principal compuesto a utilizar es sales de sodio, principalmente bicarbonato donde usualmente se mide como alcalinidad en el digestor (Parkin y Owen, 1986).

4.2.2.2. *Temperatura*

La temperatura es un parámetro primordial para controlar el proceso de digestión anaeróbica, debido a que afecta la velocidad general del proceso de producción de biogás, la actividad microbiana y la constante de equilibrio y solubilidad de los gases (Romero, 2009). A modo de estabilizar el proceso, es muy importante mantener un medio constante de temperatura, ya que una variación importante de la temperatura podría desencadenar un desequilibrio en el sistema, por lo cual es primordial mantener un sistema de control de temperatura y agitación. (Marti, 2006)

Los microorganismos involucrados y el funcionamiento del sistema de digestión anaeróbica se caracterizan en tres rangos de acuerdo con el óptimo de crecimiento (Mosey, 1983).

- Psicrófilicos: ($T < 20$ [°C])
- Mesófilicos: ($20 < T < 45$ [°C])
- Termófilico: ($45 < T < 60$ [°C])

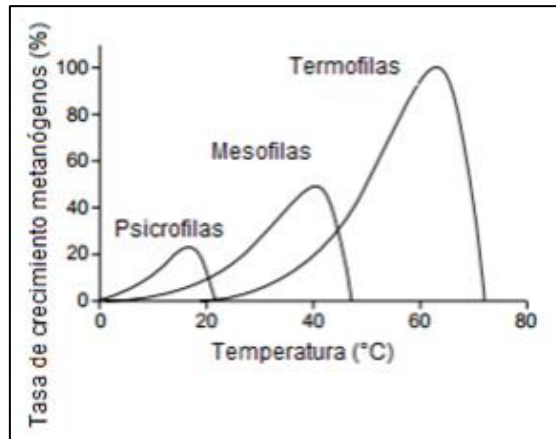


Figura 4.3 Relación de Temperatura y Crecimiento bacteriano (Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991)

A condiciones de elevadas temperaturas, los procesos de degradación son más veloces y con mayores producción de metano como se observa en el gráfico de la Figura 1.5, por lo cual los sistemas termófilicos presentan mejor capacidad a estos casos hasta cierto punto, ya que es el rango mesófilico el más aplicado a la realidad puesto que esta posee menos complicaciones de operación que el rango termófilico, que provoca un mayor consumo de energía, por lo cual la operación se vuelve menos rentable, además de la toxicidad de los compuestos como el nitrógeno amoniacal o ácidos orgánicos a altas temperaturas (Reyes, 2017)

4.2.2.3. Naturaleza del Sustrato y Relación de C:N

La composición, origen y estabilidad del sustrato es esencial en el proceso de digestión anaerobia, ya que las características de este debe permitir el crecimiento de la actividad microbiana del sistema. Los requerimientos de carbono y nitrógeno son imprescindibles ya que componen la vía de alimentación de las arqueas metanogénicas. En investigaciones determinaron lo que sería una razón óptima de estos elementos que componen la materia orgánica encontrándose en una proporción C:N de 30:1 a 20:1, ya que el carbono es la fuente primordial de energía y el nitrógeno es utilizado en las bacterias para la formación de nuevas bacterias, (Varnero y Arellano, 1991). Los residuos con altos contenido de lignina como los residuos vegetales no son directamente aprovechables por lo cual significa que debe incluir un pretratamiento (triturado, homogenización) a fin de liberar los compuestos para un mejor aprovechamiento y una mayor producción (García, n.f.).

Además de estos elementos esenciales, otro factor importante es la cantidad y composición de nutrientes y minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio magnesio, hierro, entre otros) que integra la materia orgánica en el sustrato ya que puede tener consecuencias en la producción de biogás (Varnero, 2011).

4.2.2.4. Contenido de Sólidos

El contenido de Sólidos Totales (ST) y Sólidos volátiles (SV) de la materia orgánica es otro limitante en el proceso de digestión anaeróbica, debido a que este determinará la movilidad de las bacterias metanogénicas en el sustrato, la cual se ve perjudicada a medida que incrementa el contenido de sólidos, por lo cual puede verse afectada la producción y eficiencia del proceso (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

4.2.2.5. Inhibición

La presencia de compuestos tóxicos e inhibidores en el proceso de digestión anaerobia es un factor que considerar para una eficaz producción de biogás. Estos compuestos pueden formar parte de la materia orgánica que se alimenta al biodigestor como pueden ser sustancias como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, fenoles entre otros o pueden ser subproductos derivados del metabolismo de los microorganismos anaeróbicos como por ejemplo sulfuro, amoníaco y ácidos grasos orgánicos. La dimensión de estas consecuencias se relaciona a la naturaleza y concentración de la sustancia tóxica que inhibe el proceso (Rivas, 2009). Se presenta en la Tabla 1.2 de los principales micronutrientes y sus concentraciones inhibitorias, hay que recalcar que son valores orientativos, ya que los microorganismos pueden adaptarse a diversas concentraciones y condiciones más desfavorables.

Tabla.4.1. Concentraciones inhibitorias. (Fuente: Gene y Owen, 1986).

Inhibidores	Concentración Inhibidora
Sulfuro	5000 [ppm]
Cu	100 [mg/L]
Cr	200 [mg/L]
Zn	350-1.000 [mg/L]
Ni	200-500 [mg/L]
Ca	2500-4500 [mg/L]
Mg	1000-1500 [mg/L]

Debido a situaciones de inhibición por los diferentes compuestos, se emplean diversas técnicas para evitar estas situaciones en el proceso, con el fin de disminuir la inhibición o toxicidad, una de ellas es diluir el sustrato para disminuir la concentración del toxico bajo los límites de toxicidad o usar los efectos antagonistas de otros compuestos y agregarlos al digestor anaerobio (McCarty, 1964)

Los ácidos grasos volátiles (AGV), como el acético, propiónico y butírico, pueden generar inhibiciones en la digestión anaeróbica cuando se acumulan en niveles elevados. En particular, concentraciones totales superiores a 4,000-6,000 [mg/L] pueden afectar significativamente la eficiencia del proceso. Por este motivo, resulta esencial implementar estrategias de

monitoreo y control para evitar que los AGV se acumulen y comprometan la estabilidad del sistema anaeróbico (Gao et al., 2023).

4.2.2.6. *Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)*

El tiempo en el cual el sustrato está sujeto a la acción de los microorganismos anaerobios corresponde al tiempo de retención hidráulica, donde el sustrato ingresa en un tiempo determinado para su posterior salida al acabar la biodegradación de la materia orgánica. Este se define según la siguiente formula:

Ecuación 1. Tiempo de Retención Hidráulica

$$TRH = \frac{\text{Volumen del Reactor}}{\text{Caudal}}$$

Para una correcta conversión de la materia orgánica a biogás en el proceso de digestión anaerobia es fundamental que exista una población suficiente de microorganismos y que el tiempo de retención sea apto para una adecuada descomposición de la materia orgánica (Ramos, 2014). La velocidad a la cual los microorganismos descomponen el sustrato se basa en la temperatura empleada, por lo que a una mayor temperatura es menor el tiempo de retención que se necesitará para la producción de biogás. Esto destaca la importancia del lugar geográfico donde se emplean este tipo de proyectos, la Tabla 1.3 nos indica las condiciones climáticas y de temperatura influyen en la variación del tiempo de retención hidráulica.

Tabla 4.2. Tiempo de Retención Hidráulica según condiciones climáticas. (Fuente: Manual del Biogás 2021)

Tiempo de Retención Hidráulico	Características Climáticas
30-40 días	Clima Tropical con regiones Planas
40-60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos
60-90 días	Clima temperado con inviernos fríos

Generalmente, este parámetro también dependerá del tipo de sustrato que se emplea en el proceso, ya que los materiales con un mayor contenido de carbono retenido como la celulosa necesitaran un mayor tiempo de retención para ser degradados completamente (Varnero, 1991).

4.2.2.7. *Velocidad de Carga Orgánica*

La cantidad de sustrato que se alimenta a un proceso de digestión anaerobia en un periodo determinado, se denomina la Velocidad de Carga Orgánica el cual es un parámetro fundamental a la hora de operar un biodigestor. Usualmente este parámetro se expresa en unidades de medida de [kgSV/m³ *día], ya que son los kg SV del sustrato la fracción susceptible a ser convertida en biogás. Determinar este parámetro es esencial ya que establece la cantidad de sustrato que la actividad microbiana debe degradar en el Tiempo de

Retención Hidráulica (TRH) establecido. (Ramos, 2017). Este parámetro se determina bajo la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Velocidad de Carga Orgánica

$$VCO = \frac{kg\ SV / dia}{Volumen\ de\ Digestor\ (m^3)}$$

Un elevado valor de Velocidad de Carga Orgánica puede ocasionar consecuencias respecto a la capacidad de los microorganismos de descomponer la materia orgánica, provocando un desequilibrio en el proceso de digestión anaerobia como por ejemplo la acidificación, acumulación de ácidos grasos volátiles, pérdida de la capacidad buffer, entre otros (Ramos, 2017).

De forma preliminar, este parámetro operacional se adecua para el tipo de sustrato y biodigestor en los ensayos de laboratorio o piloto. La VCO depende de la naturaleza del sustrato ya sea fácil o difícilmente biodegradable, contenido de nutrientes y otros parámetros de diseño (Ramos, 2014).

4.2.2.8. *Agitación*

La frecuencia de agitación del sistema de digestión anaerobia es esencial en la operación de un digestor, ya que mejora de forma considerable el tratamiento, ya que facilita el roce entre los microorganismos anaerobios y el sustrato empleado, además de impedir formación de espuma en la superficie (Miranda, 2022).

La velocidad a la cual se emplea la agitación se debe controlar ya que influye directamente en el desarrollo del proceso, estableciendo un balance entre la buena homogenización y la correcta formación de colonias de bacterias, una velocidad muy elevada, por encima de las 700 [rpm] puede disminuir la producción de biogás por la posible ruptura de poblaciones bacterianas (Needham, 2015).

4.2.2.9. *Diseño del Biodigestor*

El modelo de digestor que se emplea en el proceso de digestión anaerobia es indispensable para una eficaz producción de biogás, ya que este influye en los parámetros operacionales de Tiempo de Retención Hidráulica y la Velocidad de Carga Orgánica. El diseño preliminar del biodigestor depende de parámetros económicos y de la naturaleza del sustrato que se emplea (cantidad de sólidos, humedad, carga contaminante entre otros). Los parámetros de diseño principales serán el tipo de alimentación al digestor, temperatura de operación, volumen del digestor, el Tiempo de Retención Hidráulica y Velocidad de Carga Orgánica.

4.3. Biodigestor Anaeróbico

El Biodigestor o reactor es un sistema hermético el cual posibilita la descomposición de la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas y permite la extracción del biogás resultante para su posterior utilización. Esta estructura cuenta con un sistema de entrada del sustrato, una cámara para la descomposición de la materia orgánica, una válvula de salida y otra de control del sistema y un gasómetro (Guevara, 1996).

4.3.1. Tipos de Biodigestores

El diseño de los biorreactores tiene que asegurar las condiciones del sistema necesarias para la actividad microbiana y garantizar una mezcla homogénea en el digestor. Debido a esto, existe una diversidad de tecnologías de diseño de digestores.

4.3.1.1. Digestores de Mezcla Completa

Son los más utilizados en el mercado de la producción de biogás, que operan bajo un régimen estacionario, con un sistema de agitación constante en su sistema, estos pueden ser con recirculación y sin recirculación como se ilustra en la Figura 1.6.

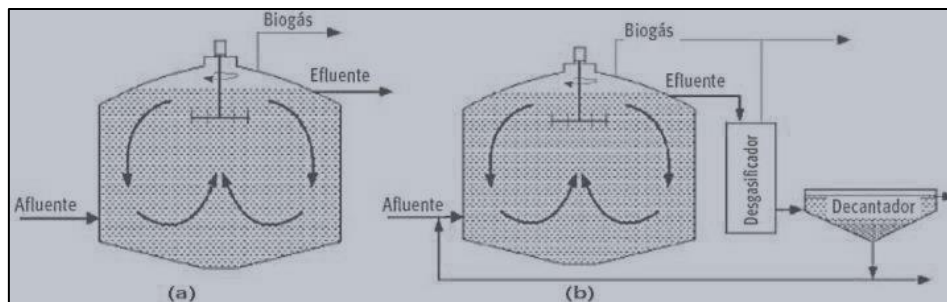


Figura 4.4. Esquema de Digestores de Mezcla Completa. (Fuente: IDEA, 2007)

- Con recirculación

Este se basa en el contacto, es distinguido por el tiempo de retención hidráulico, ya que es menor que los digestores sin recirculación; es un sistema comúnmente utilizado en el tratamiento de aguas residuales, que cuentan con un alto contenido de materia orgánica, como RILES de la industria azucarera y cervecera (IDAE, 2007).

- Sin Recirculación

Por otra parte, estos biorreactores son caracterizado por conservar uniformemente las concentraciones del sustrato y los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia, es el sistema más ocupado para el tratamiento de los residuos agrícolas y ganaderos, donde se mantiene un tiempo de retención hidráulico alto (IDAE, 2007).

4.3.1.2. Digestores de Flujo Pistón

Los digestores de sistema de flujo pistón se utilizan principalmente para el tratamiento de residuos orgánicos. Este tipo de digester funciona de manera longitudinal, permitiendo que el sustrato se desplace de un extremo al otro sin una mezcla continua, emulando el movimiento de un pistón en un cilindro como se demuestra en la Figura 1.7. Son especialmente adecuados para la digestión anaeróbica de sustratos con alto contenido de sólidos. En esta tecnología, las etapas del proceso de digestión anaeróbica se desarrollan en diferentes secciones a lo largo del reactor. Sin embargo, una de las principales dificultades es la falta de mezcla y homogenización (IDAE, 2007).

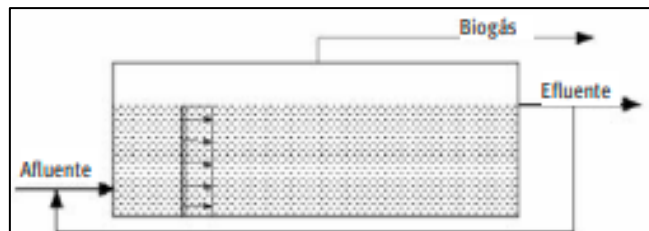


Figura 4.5. Esquema de Biodigestor de Flujo Pistón (Fuente: IDAE 2017)

4.3.1.3. Digestores con Retención de Biomasa sin Recirculación

Los digestores anaeróbicos con retención de biomasa son sistemas diseñados para maximizar la cantidad de microorganismos responsables de la digestión de la materia orgánica, reteniéndolos dentro del reactor. Esto mejora la eficiencia del proceso de producción de biogás y permite tiempos de retención más cortos.

- Inmovilización sobre un soporte (Filtros anaerobios y lechos fluidizados)
- Incorporación o floculación de la biomasa y retención por gravedad (lecho de lodos)

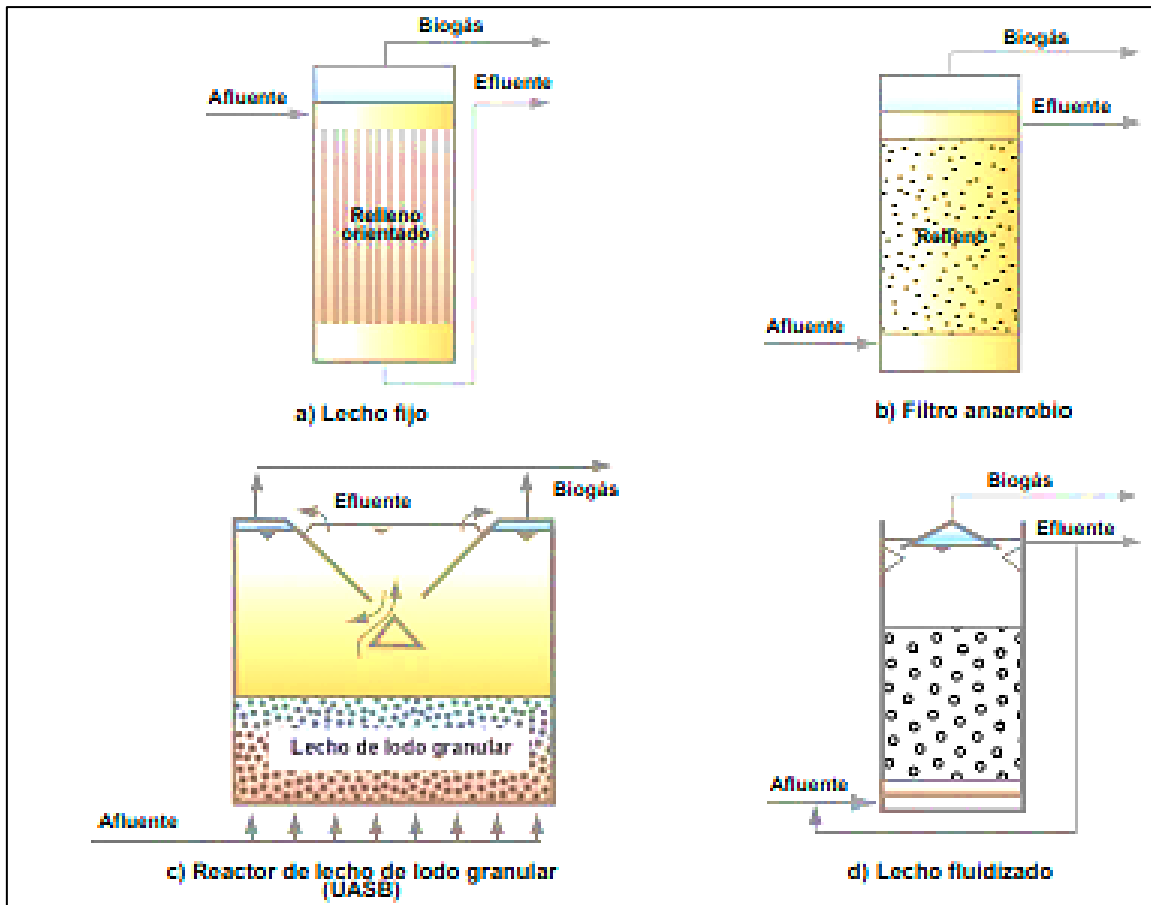


Figura 4.6. Esquemas de digestores con Retención de biomasa Fuente: IDAE (2017)

4.3.2. Modos de Operación del Digestor

4.3.2.1. Continuo

Son sistemas que son cargados de manera frecuente de sustrato, por lo que es caracterizado por una fermentación constante en el tiempo, produciendo de manera uniforme el biogás, siendo factible su control y monitoreo operacional a un nivel más industrializado, ya que se debe tener una importante disposición de materia orgánica diaria para llevarse a cabo. Para que estos sistemas funcionen de manera óptima, es crucial disponer de una cantidad significativa de materia orgánica diaria. Esto hace que sean especialmente adecuados para entornos donde los residuos orgánicos se generan de forma continua y en grandes volúmenes (ODEPA, 2009).

4.3.2.2. *Semicontinuo*

Estos son sistemas cargados mediante periodos o lapsos de carga, son principalmente utilizados cuando la disponibilidad de la materia orgánica es constante en los días. La carga periódica permite optimizar el proceso de digestión anaerobia, ya que se puede controlar mejor la cantidad de materia orgánica introducida en el sistema, asegurando que haya suficiente inóculo y nutrientes para mantener la actividad microbiana en niveles óptimos. Además, el uso de sistemas con lapsos de carga permite una mejor planificación y gestión del tiempo, ya que las operaciones de carga y descarga pueden ser programadas en horarios específicos, optimizando así los recursos humanos y materiales (ODEPA, 2009).

4.3.2.3. *Batch o Discontinuos*

Este sistema de fermentaciones caracterizado por su operación mediante una carga por lotes, donde el sustrato es integrado al inicio del proceso al máximo de operativo, para posteriormente cerrarlos durante todo el proceso de biodigestión anaeróbica con periodos prolongados de retención hidráulica, llevándose a cabo de forma hermética, donde las bacterias no tendrán ningún tipo de contacto con el oxígeno (Atkinson, 1974).

Estos han sido diseñados principalmente para tratar residuos orgánicos con un elevado contenido de sólidos, por lo que son frecuentemente utilizados en el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos con una concentración entre 20 y 40% de ST (De Mes et al., 2003)

Estos son cargados al máximo nivel de operación y son cerrados durante todo el proceso de biodigestión, por lo que no existe ningún tipo de transferencia de masa durante el proceso, no tiene ni entrada ni salida de materia (Atkinson, 1974).

4.4. Ensayo Potencial Bioquímico del Metano

El ensayo implica la adición de uno o varios sustratos en botellas (batch) que contienen inóculo activo y medio mineral bajo condiciones operacionales controladas, con el propósito de generar metano mediante metodologías como el método manométrico o el método volumétrico. En estos métodos, se cuantifica el gas liberado hasta que la producción de gas casi se detiene (Cárdenas et al., 2016).

El Potencial Bioquímico de Metano (BMP) se calcula dividiendo la producción neta de metano por los gramos de residuo orgánico, expresado en unidades de demanda química de oxígeno (DQO) o sólidos volátiles agregados al reactor. Sus unidades son [mL CH₄/g SV] (González et al., 2015).

Además, la determinación del BMP no solo ayuda a evaluar la eficiencia de diferentes sustratos, sino que también proporciona información valiosa para la gestión de residuos. Al conocer el potencial de producción de metano de diferentes residuos, es posible priorizar aquellos con mayor potencial energético y diseñar estrategias de manejo de residuos que maximicen la recuperación de energía.

Previo a todo ensayo es necesario planificar en torno a la información disponible, donde mediante la observación y lógica nacen preguntas como ¿Cómo se produce el sustrato? ¿El sustrato es uniforme o presenta variaciones? ¿Cuál es el tamaño de las partículas? ¿Las

características del sustrato cambian diaria, semanal, mensual o anualmente? ¿Qué cantidad de muestra es necesaria? ¿Es necesario hacer un submuestreo? ¿Cuántos submuestreos son requeridos?

4.4.1. Parámetros que influyen en la BMP

El correcto desarrollo del proceso anaerobio puede verse afectado por diversos factores, los cuales se pueden categorizar en cuatro grupos principales: factores relacionados con el sustrato, el inóculo, las condiciones operacionales y las condiciones ambientales.

En primer lugar, los factores relacionados con el sustrato son cruciales. La naturaleza y composición del sustrato, como el tipo de materia orgánica, el contenido de nutrientes y la presencia de inhibidores potenciales, pueden influir significativamente en la eficiencia del proceso.

En segundo lugar, los factores relacionados con el inóculo, que es el material biológico inicial que contiene los microorganismos necesarios para el proceso anaerobio, también son fundamentales. La calidad y cantidad del inóculo, su actividad biológica, y su capacidad para adaptarse al sustrato específico son determinantes para el inicio y la estabilidad del proceso. Un inóculo bien seleccionado y preparado puede acelerar el arranque del proceso y mejorar la eficiencia general.

5. Materiales y Métodos

En el presente capítulo se abarcará el diseño metodológico y experimental de la generación de biogás, además de toda la instrumentación y herramientas necesarias para llevar a cabo el desarrollo de la investigación, permitiendo evaluar parámetros técnicos y económicos. La información será recopilada mediante mediciones y trabajo en terreno en el Mercado Cardonal de Valparaíso y de referencias bibliográficas.

5.1. Caracterización de los Residuos sólidos orgánicos generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso

Para caracterizar los residuos orgánicos, principalmente vegetales que son generados en el Mercado Cardonal, primero se evaluará la estabilidad periódica de los alimentos comercializados. Esto incluye considerar la constancia a lo largo del año, teniendo en cuenta que algunos productos son de carácter estacional y solo se venden durante los periodos estivales o invernales. Posterior a ello se hará el catastro de cada local del primer piso del Mercado, donde se generan principalmente los residuos de interés. Se utilizará una planilla, detallada en el Anexo E y Anexo F, para recopilar información sobre cada producto comercializado en los locales tanto del interior como el exterior.

5.2. Cuantificación de los Residuos sólidos orgánicos Generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso

En primer lugar se asistirá al lugar para recopilar toda la información y antecedentes necesarios de la forma en que se organiza Mercado Cardonal todo esto con el fin de no interrumpir las labores diarias de los locatarios, se buscó conocer sus horarios de funcionamiento, quien es el administrador a cargo del lugar, las herramientas y formas de operación con respecto a la recolección de residuos de los locales del Mercado y las costumbres que los comerciantes con respecto al manejo de sus desechos. Por lo que solicitó reuniones con el Administrador del lugar para conocer más a profundidad los locales y como se categorizan, realizándole una breve encuesta encontrada en el Anexo A.

Para poder cuantificar la cantidad de residuos generados se trabajará en el lugar, observando la rutina del manejo de los residuos en el Mercado, donde se identificará el principal punto de disposición que comúnmente son bateas con una capacidad estandarizada. Además, verificar el número de recolecciones diarias, lo que permitió una estimación de la generación diaria de residuos como se contempla en la ecuación, teniendo los datos recopilados necesarios que son establecidos en la Tabla 5.1

Ecuación 3. Cálculo de Residuos disponibles

$$\text{Residuos} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dia}} \right) = V * \rho * X * n^{\circ} \text{ de recolecciones}$$

Donde:

V: Volumen de Batea [m^3]

ρ : Densidad de Residuos [kg/m^3]

X: Fracción de Residuos orgánicos [%]

Tabla 5.1 Antecedentes de Residuos del Mercado Cardonal

Datos	Valores	Unidades
N° de Recolecciones		veces / día
Volumen de Batea		m^3
Residuos Generados		$m^3/día$
Residuos Generados de Interés		$kg/día$
Densidad aparente		kg / m^3

La densidad aparente, también conocida como densidad a granel, se define como la masa que ocupa un metro cúbico de material granular y se expresa en [kg/m^3]. Este parámetro es crucial para determinar la cantidad de biomasa que puede almacenarse en un volumen específico. Esta se determinará según referencias bibliográficas, que detallan que estas varían según la composición de los residuos vegetales, por lo que se encuentra en un rango de 250 a 450 [kg/m^3], permitiendo calcular la masa de los residuos generados (Francesc Giró, 2007)

5.3. Ensayo Potencial Bioquímico del Metano

El proceso se llevó a cabo en un sistema batch o discontinuo que consta de 12 reactores de 290 [mL] de capacidad cada uno, donde se le dispondrán tres diferentes mezclas de sustrato e inóculo, en proporciones de sustrato distintas escogidas según su disponibilidad, además de sus respectivas replicas y el blanco correspondiente. Para los reactores se utilizarán botellas de vidrio selladas herméticamente con una tapa de válvulas que permitirá conectar el sistema de mangueras para el paso del biogás

El biogás, fruto de la descomposición de materia orgánica, se mide usando un método volumétrico que consiste en medir el desplazamiento de un líquido que es en general agua por acción del biogás. Este gas fluye desde el digestor hacia un recipiente que contiene una solución alcalina de NaOH a 4 [M] que cumple la función de reducir los niveles de CO_2 y otros gases como nitrógeno e hidrógeno, generalmente en cantidades insignificantes, también pueden estar presentes al biogás.

Los sustratos para utilizar serán llevados a una trituradora previo a ingresar al reactor con el objetivo de tener una mezcla más homogénea y que los microorganismos tengan una mayor

superficie de contacto. Los reactores se integran en baños termostáticos que aseguran una temperatura constante, operando en un rango mesofílico, particularmente a 37 [°C]. El esquema del sistema utilizado para el desarrollo experimental se muestra en la Figura 5.2.

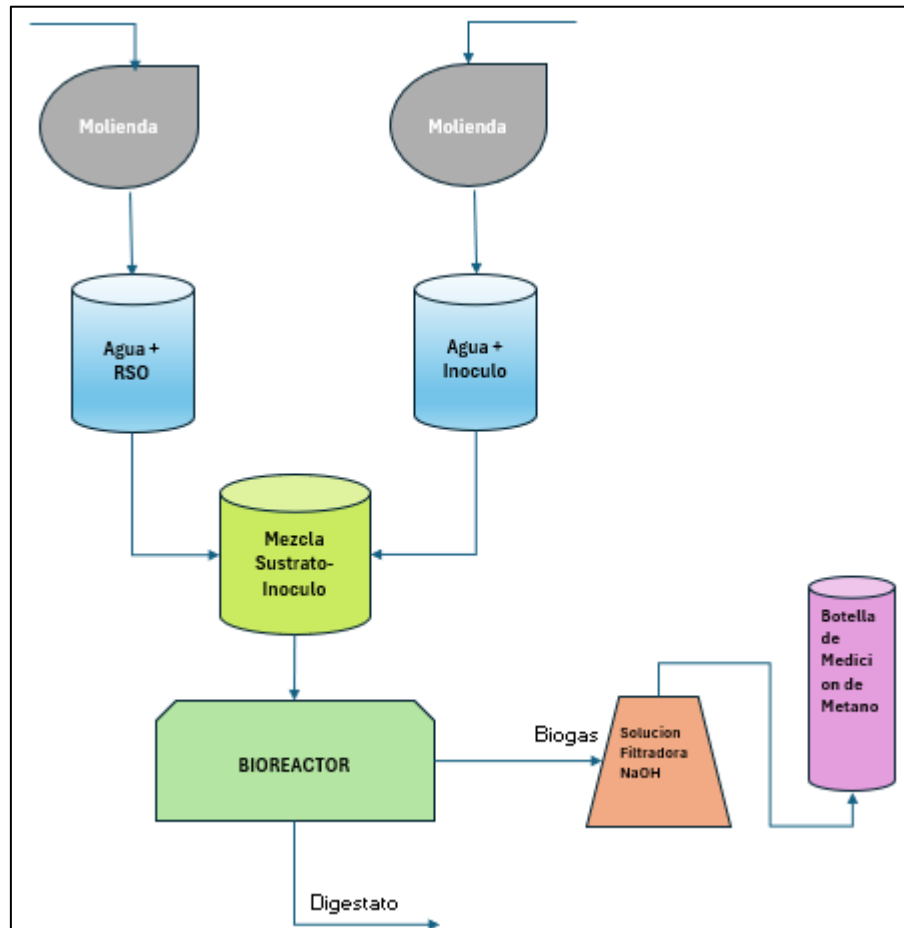


Figura 5.2. Diagrama del Proceso de BMP

5.3.1. Análisis del Inoculo y Sustrato

5.3.1.1. Inoculo

El inoculo que fue utilizado en los sistemas de digestión anaerobia fue recolectado en la Localidad de Colliguay, Comuna de Quilpué. Este corresponde a muestras de estiércol de equino. Debido a las características propias de la materia orgánica que contiene este inoculo componiéndose de una diversidad de microorganismos metanogénicos por lo que resulta viable realizar el ensayo de digestión anaerobia. Se recolectará la cantidad necesaria para caracterizar los parámetros fisicoquímicos (%ST, %SV, % Humedad y pH) que influyen en el proceso y almacenarlo en una botella de color ámbar con el fin de que evite el contacto con la luz.

Previo a la puesta en marcha del ensayo, el inóculo pasó por un pretratamiento en un proceso de predigestión que permitió la desgasificación del estiércol, con la finalidad de disminuir la producción endógena. Este proceso se llevó a cabo en una estufa a 37°C durante cinco días antes de poner en marcha el reactor, lo que permite que este inóculo se adapte a la temperatura a la que posteriormente operaran.

5.3.1.2. *Sustrato*

El sustrato empleado fue recolectado en las inmediaciones del Mercado Cardonal de Valparaíso, compuesto principalmente por residuos vegetales (frutas, verduras y hortalizas). Según Gualle (2021), estos presentan una relación C:N de 19:1 en el caso de las frutas y 8:1 para verduras y hortalizas. Una vez seleccionados y recolectados, los residuos fueron trasladados al laboratorio, donde se sometieron a un pretratamiento de molienda para obtener una pasta homogénea. A esta pasta se le determinó el contenido de humedad y los porcentajes de sólidos totales (%ST) y sólidos volátiles (%SV). Dado que la mezcla resultante es semisólida, se diluyó con agua destilada para mejorar la transferencia y el contacto entre los microorganismos y el sustrato, utilizando proporciones que se especificarán más adelante. Además, para el proceso de digestión anaeróbica, se incorporaron 36 [g] de sustrato por cada 16 [g] de inóculo, asegurando las condiciones necesarias para una eficiente interacción microbiana.

5.3.1.3. *Caracterización de Sustrato e Inóculo*

Para establecer la caracterización del sustrato e inóculo se determinaron parámetros como humedad, pH, ST, STV para llevar un monitoreo del proceso, los métodos analíticos para fijar los valores de los parámetros se encuentran descritos detalladamente en el Anexo D, los cuales se basaron según el Método 1684 de la U.S EPA

- **Humedad:** El porcentaje de agua presente en una muestra de biomasa. Consiste en secar la muestra en una estufa a una temperatura de 105 [°C]. Este parámetro es crucial debido a su impacto tanto en los procesos de transformación energética (como la combustión y la gasificación) como en la degradación del material.
- **pH:** Se refiere a una medida de la acidez o alcalinidad que indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en una solución o sustancia. Este parámetro se medirá utilizando un medidor de pH digital. Se es recomendable que sea un pH neutro en un rango entre 6,5 - 7
- **ST:** Se detalla el porcentaje del material a emplear, ya sea sustrato o inóculo, excluyendo el agua, abarcando tanto la materia orgánica como la inorgánica en un rango de 22-28 [kg/m³]
- **STV:** Proporcionan una estimación de la cantidad de materia orgánica presente en el material que se desea analizar, en el caso del inóculo se sugiere que la cantidad de SV sea a lo menos un 50%

5.3.1.4. Preparación de Mezclas

Se evaluarán tres mezclas distintas de residuos orgánicos, cada una con tres réplicas operando simultáneamente. La primera mezcla (M1) contiene un 38% de residuos de frutas y un 62% de residuos de verduras y hortalizas. La segunda mezcla (M2) se compone de un 71,79% de residuos de frutas y un 28,21% de verduras y hortalizas. Por último, la mezcla M3 incluye un 15,22% de frutas y un 84,78% de verduras. Estas combinaciones buscan analizar y comparar el rendimiento de cada mezcla en términos de producción de biogás bajo condiciones controladas.

Para lograr una mayor dilución del sustrato, se añadirá agua destilada, considerando las proporciones de biomasa a agua recomendadas en la bibliografía. Según Álvarez et al. (s.f.), cuando el material de alimentación incluye excreta humana, orina, estiércol o desechos agrícolas, es necesario mantener una relación de 1:1 a 1:2, es decir, entre 100 y 200 litros de agua por cada 100 kg de materia orgánica. Sin embargo, cuando el sustrato está compuesto principalmente por residuos vegetales, como en este caso, se requiere mayor dilución, con proporciones de 1:3 o 1:4. Estas consideraciones garantizan condiciones óptimas para el proceso de digestión anaeróbica, mejorando la eficiencia del sistema y la producción de biogás.

5.4. Dimensionar el Biodigestor preliminares del Sistema de generación de gas

5.4.1. Determinación de Rendimiento de las Mezclas

Tras calcular los volúmenes de biogás acumulado de cada mezcla evaluada durante el proceso de digestión anaeróbica, se procedió a determinar el rendimiento específico de cada una. Este análisis se llevó a cabo considerando la cantidad de biogás generado por cada gramo de sólidos volátiles (SV) presentes en el sustrato inicial. Este enfoque permite evaluar de manera más precisa la eficiencia del proceso de digestión en relación con la materia orgánica biodegradable disponible. Se utilizó la siguiente ecuación para determinar la productividad de las mezclas:

Ecuación 5. Rendimiento de Biogas

$$Prod. Biogas_{real} \left[\frac{mL}{gSV} \right] = \frac{Prod. Biogas_{sin-incoculo} [mL]}{SV_{sustrato} [g]}$$

5.4.2. Parámetros de Diseño

5.4.2.1. Volumen del Reactor

Para la estimación de el volumen de diseño del reactor se determinará según la velocidad de carga orgánica, la cual depende de las características del sustrato (como la biodegradabilidad y el tamaño de las partículas) y del diseño del digestor, para reactores de mezcla completa la VCO suele estar en un rango 1-3 [kgSV/m³*día] (MINENERGIA, 2012).

Ecuación 5. Volumen de Diseño

$$V = \frac{W_{odm} \left[\frac{kgSV}{dia} \right]}{VCO \left[\frac{kgSV}{m^3 * dia} \right]}$$

V: Volumen de Reactor

W_{odm} : Flujo de materia orgánica diaria de los residuos

VCO: Velocidad de Carga Orgánica

Se calculará la cantidad de sólidos volátiles (SV) generados diariamente mediante la caracterización del sustrato disponible. Posteriormente, se seleccionará el sustrato que haya demostrado mayor producción de biogás durante las pruebas realizadas. Esta mezcla seleccionada se utilizará como base para establecer los parámetros de diseño del sistema.

5.4.2.2. Gasómetro

Es el dispositivo acumulador de biogás es capaz de equilibrar las fluctuaciones en la producción, el consumo y los cambios de volumen, principalmente asociados a variaciones en la temperatura y producción. Además, se utiliza como almacenamiento de biogás para su uso posterior. Para ello, es crucial considerar la presión de trabajo, las condiciones climáticas, los posibles usos del biogás y la cantidad de biogás producido, entre otros factores.

Para calcular el volumen del gasómetro, se debe utilizar la siguiente ecuación, teniendo en cuenta un factor de seguridad (F.S.) entre el 10% y el 20% (Ávila et al, 2018).

Ecuación 6. Volumen Gasómetro

$$\text{Volumen Gasómetro} > Q_p \left[m^3/día \right] * (1 - tc) * 1,24$$

Dónde,

Q_p : caudal de biogás generado diario

tc : fracción del tiempo diario de consumo de biogás

5.4.3. Potencial Térmico del Biogás Producido

Se determinará el potencial térmico que tiene el biogás producido en el ensayo de biodegradabilidad, con el fin de extrapolarlo a la cantidad de residuos generados en el Mercado Cardonal, con el fin de establecer cuánto biogás se podría utilizar en las unidades de cocina de los locales de restaurants se estimara el gas mensual considerando la cantidad de cocinas reflejando un consumo mensual aproximado de 900 [Nm³/mes] por la totalidad de los comedores.

A partir de estos datos recopilados se podrá calcular el aporte de gas metano a incorporar a la red de gas del Mercado, permitiendo a los locatarios disminuir su consumo de gas natural

de la red de tuberías, por lo que implicaría un beneficio económico de acuerdo con la cantidad de biogás que se estimaría producir.

Para realizar una equivalencia en el rendimiento térmico del biogás producido, se utilizará el poder calorífico del biogás y el de gas natural que abastece al Mercado Cardonal.

Ecuación 8. Equivalencia de Biogás y Gas Natural

$$\text{Vol de GN equivalente [m}^3\text{]} = \frac{\text{Vol de Biogas [m}^3\text{]} * \text{Poder Calorifico de Biogas} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}\right]}{\text{Poder Calorifico del GN} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}\right]}$$

Con ello se permitirá estimar una equivalencia de cuánto biogás se necesitaría para reemplazar el gas natural.

Ecuación 9. Caudal promedio de biogás producido a Condiciones Normales

$$QN_{biogas} [Nm^3/d] = \left(T_N / T_{efec} \right) \cdot \left(P_{efec} / P_N \right) \cdot Q_{efec}$$

Donde:

P_{efec} : Presión absoluta efectiva del biogás en las condiciones de la medición [mbar]

P_n : Presión absoluta del biogás en condiciones normales [1013 mbar]

Q_{efec} : Caudal efectivo promedio de biogás producido en condiciones de presión y temperatura de la ubicación de la instalación

T_N : Temperatura en condiciones normales [0°C = 273°K]

T_{efec} : Temperatura efectiva en condiciones de la medición [°K]

5.4.4. Evaluación de Costos

Según Hilbert (2003), los costos asociados al aprovechamiento de la tecnología del biogás están vinculados a varios factores: la operación, los servicios públicos, la materia prima, el empleo del efluente y el uso del biogás, en la Tabla 5.3 se visualiza el tipo de costo y las actividades que reflejan la inversión y egresos asociados que fueron necesarios para determinar los indicadores económicos lo que indico si el proyecto era viable o no económicamente.

Tabla 5.3 Costos asociados a la producción de biogás

Tipo de Costo	Concepto del Costo
Asociados a la Operación	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño e instalación • Materiales • Mantenimiento • Mano de obra
Públicos	<ul style="list-style-type: none"> • Unidades demostrativas • Instalaciones de bajo riesgo comparativo y medidas de fomento • Asistencia técnica
Materia Prima	<ul style="list-style-type: none"> • Mano de obra • Equipo para transporte • Materia prima, si se compra
Empleo del efluente	<ul style="list-style-type: none"> • Mano de obra • Equipo para transporte • Almacenamiento • Transporte hasta el lugar del uso
Utilización del Biogás	<ul style="list-style-type: none"> • Almacenamiento • Distribución • Adaptación de equipos Purificación

5.4.4.1. Valor Actual Neto (VAN)

La utilización de este indicador financiero para evaluar la viabilidad de un proyecto de inversión. Este indicador se obtiene sumando los flujos de efectivo que se esperan generar durante la vida útil del proyecto, ajustados al valor presente mediante una tasa de descuento. La tasa de descuento, denotada como “r”, representa el costo de capital o la tasa de retorno mínima requerida que se espera obtener de la inversión, considerando el riesgo y las alternativas de inversión disponibles

Ecuación 11. Valor Actual Neto

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=0}^N \frac{F_i}{(1+r)^i}$$

Io: Inversión Inicial

Fi: Flujo de Caja

Un VAN positivo indica que el proyecto generará más valor de lo que cuesta, lo que significa que los ingresos esperados superan los costos, ajustados al valor presente. En otras palabras,

un VAN positivo sugiere que el proyecto aumentará el valor de la empresa propietaria, ya que se espera que los beneficios futuros, descontados a su valor presente, sean mayores que la inversión realizada.

5.4.4.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Se sugiere que cualquier proyecto con una TIR superior al costo de capitalización o financiamiento es conveniente de realizar. Esto se debe a que la TIR se relaciona directamente con el Valor Actual Neto (VAN), siendo la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. En esencia, la TIR convierte la rentabilidad del proyecto en un porcentaje, permitiendo su comparación con las tasas de retorno de inversiones de bajo riesgo

Ecuación 12. Tasa Interna de Retorno

$$= -I_0 + \sum_{i=0}^N \frac{F_i}{(1 + TIR)^i}$$

5.4.5. Evaluación de Ingresos

Los ingresos del proyecto provienen de tres fuentes principales: el ahorro en el consumo de gas natural o licuado, la venta de digestato y el tratamiento de basura. El componente más significativo de estos ingresos es el ahorro en el consumo de gas natural. Este ahorro se logra mediante la sustitución parcial o total del gas natural por biogás, que es producido internamente como parte del proyecto. Es importante considerar que es necesario aprovechar la energía térmica generada para mantener la temperatura regulada del digestor, por lo que se evaluará la cantidad de energía necesario para mantenerlo en operación

La venta de digestato, un subproducto del proceso de digestión anaeróbica también contribuye a los ingresos. El digestato se puede vender como fertilizante orgánico a los mismos agricultores relacionados al Mercado Cardonal. Además, los ingresos por tratamiento de basura provienen de los bonos de carbono, lo que no solo genera ingresos, sino que también contribuye a la reducción de la cantidad de desechos que terminan en los vertederos.

Por lo que se llevara a cabo un flujo de caja para realizar un correcto balance económico que permita analizar si es o no viable el llevar a cabo el proyecto, además, se realizaran los análisis de sensibilidad a los costos de inversión y operación, incluyendo también la venta de digestato y bonos de carbono.

6. Resultados

6.1. Caracterización de los Residuos Generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso

La caracterización de los residuos del mercado se diseñó en base al supuesto de que las frutas y verduras que presentan mayor estabilidad y disponibilidad en el año serán utilizados como residuos de interés para el proceso, sin embargo, esta aproximación no representa necesariamente la composición real de los residuos generados en el mercado, lo que podría introducir variaciones en los resultados esperados.

Después de una recopilación de antecedentes sobre los locales del Mercado Cardonal y mantener comunicación con el Administrador y el personal de aseo de la organización, se pudo detallar con precisión cuáles son los productos más comercializados en la totalidad del primer piso del establecimiento por medio de la planilla presentada en el Anexo E para el exterior y Anexo F para el interior del Mercado. Este proceso de recopilación de información incluyó entrevistas, observaciones en campo y la revisión de registros proporcionados por la administración del mercado. Sin embargo, durante las visitas de observación en terreno, se encontraron ciertas circunstancias que dificultaron una evaluación completa. No todos los locales estaban operativos en esos momentos específicos, lo que limitó la visibilidad total de las actividades comerciales en el mercado. Además, se observó que una parte significativa de los locales se utiliza como bodegas para almacenar diferentes frutas y vegetales

En el interior del mercado que abarca un total de 64 locales, se detectó una notable diversidad en la venta de productos. Las frutas como manzana, pera, limón, plátano y naranjas demuestran mayor disponibilidad

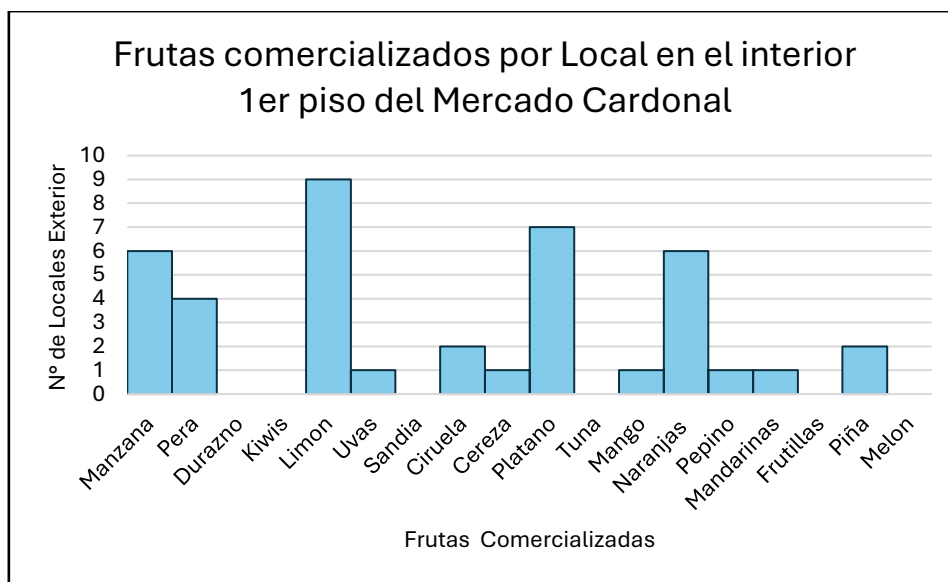


Figura 6.1 Frutas con mayor disponibilidad de venta en el interior del Mercado

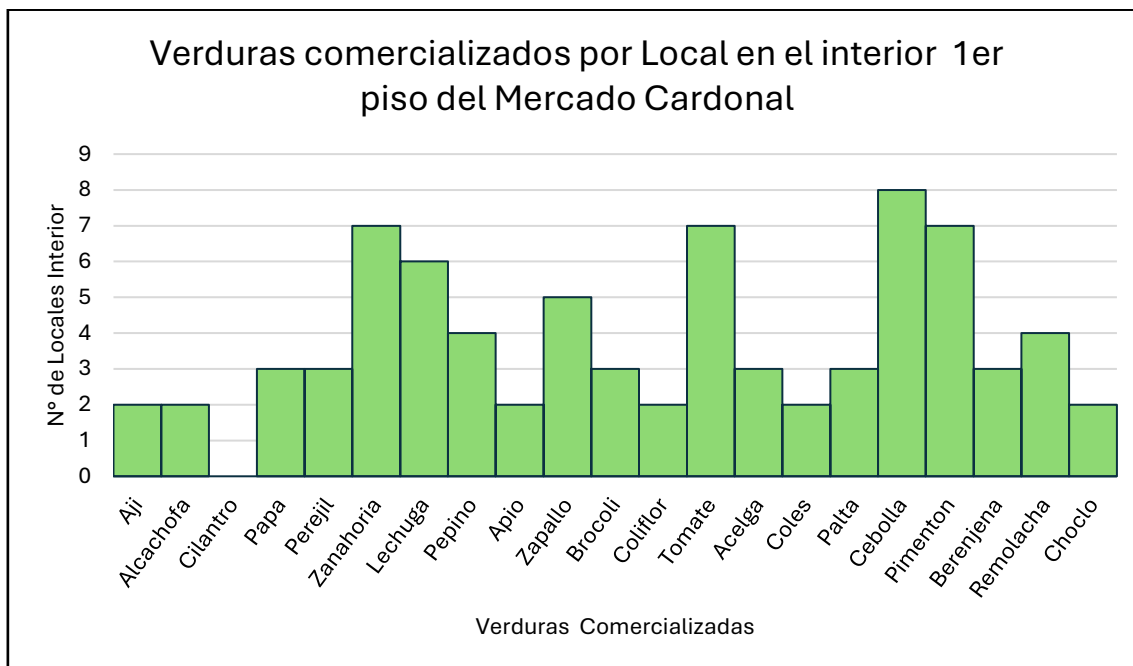


Figura 6.2 Verdura con mayor disponibilidad de venta en el interior del Mercado

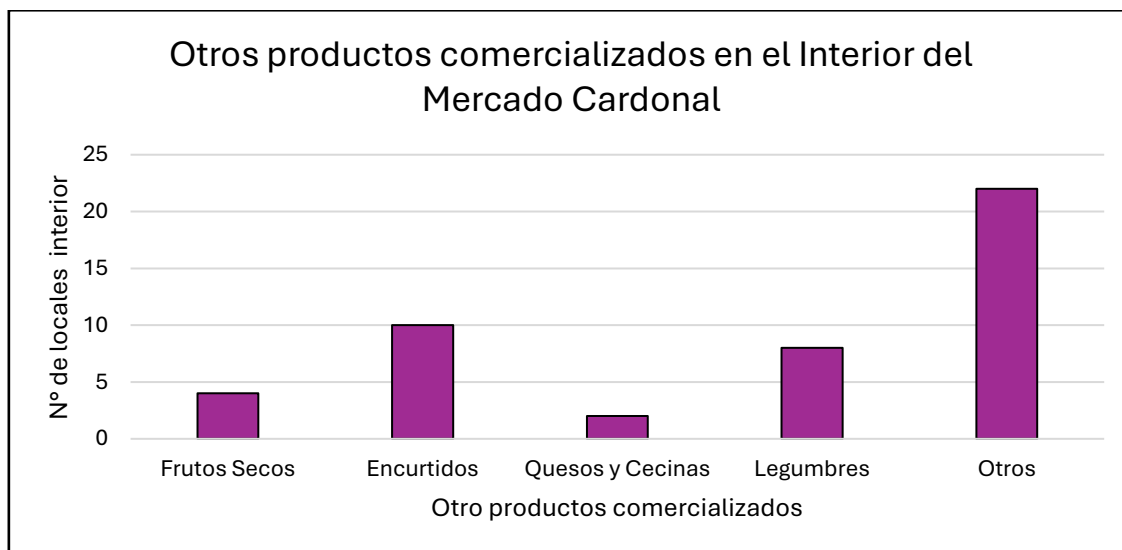


Figura 6.3 Otros productos de disponibilidad comercial en el interior del Mercado

Se puede observar que una parte significativa de los locales dentro del Mercado Cardonal se dedica a la venta de productos con composición no orgánica, en su mayoría alimentos no perecibles o que no son de interés ya que este tipo de productos no contribuye de manera relevante a la generación de residuos orgánicos, lo que disminuye su interés en el contexto de un análisis orientado a la caracterización de los desechos orgánicos predominantes en el mercado

En el exterior, que cuenta con 50 locales formales establecidos, predomina la venta de productos hortofrutícolas con diferente disponibilidad estacional, impera la venta de frutas en la Calle Uruguay, donde 10 de los 13 locales activos establecidos se dedica principalmente al comercio de frutas más que verduras y al que en el interior existe una mayor disponibilidad en frutas como manzana, pera, plátano y limones como se observa en la Figura 6.4, lo cual es importante considerar ya que se observó que en este sector donde más concurrencia de clientes y residuos se genera.

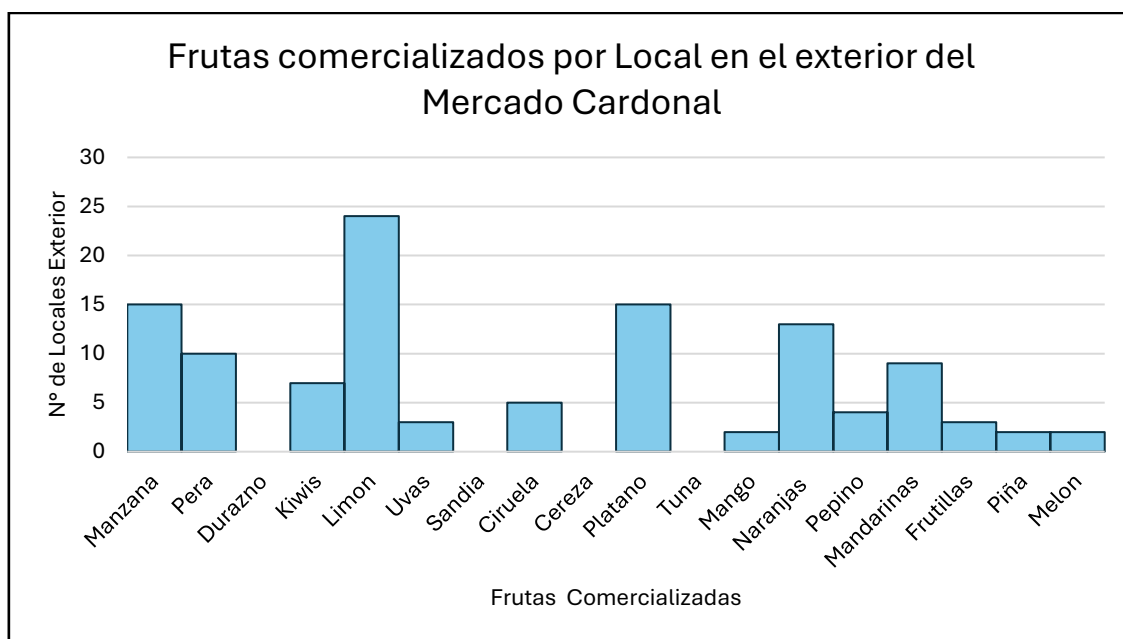


Figura 6.4 Frutas con mayor disponibilidad de venta en el exterior del Mercado

En el exterior, con respecto a las verduras, existe una mayor variedad en la disponibilidad como se observa en la Figura 6.5, donde predomina las excedencia de frutos como el tomate, papa, y zanahoria, además, se observa el lugar la abundancia de residuos de hojas de descarte de verduras y hortalizas.

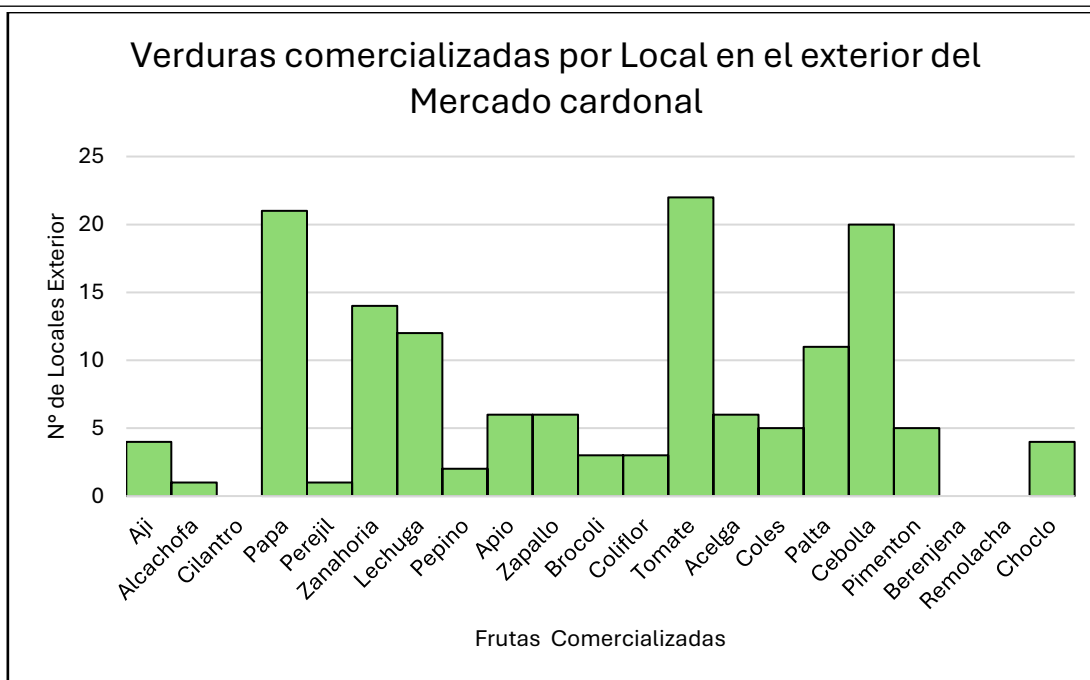


Figura 6.5 Verduras con mayor disponibilidad de venta en el exterior del Mercado

Es fundamental tener en cuenta que este registro puede experimentar fluctuaciones a lo largo del tiempo, ya que está influenciado por la estacionalidad de los productos comercializados. Las variaciones estacionales afectan la oferta y demanda de ciertos productos, lo que a su vez puede impactar la disponibilidad, composición y el volumen de residuos generados.

En el proceso de selección de frutas para ser utilizadas como sustrato en el Ensayo Potencial Bioquímico de Metano, se identificaron y seleccionaron principalmente los siguientes tipos de frutas: plátano, manzanas y peras. La elección de estas frutas se basó en varios factores críticos, siendo el más destacado su estabilidad en la disponibilidad a lo largo de todo el año, además de contar con mayor presencia en comercio, por otra parte, se decidió evitar residuos de frutos más cítricos como el tomate, limón y naranja. Además de la disponibilidad constante, estas frutas también fueron evaluadas por sus características fisicoquímicas y nutricionales, que son adecuadas para el proceso de digestión anaeróbica ya que pueden presentar un alto contenido de azúcares disponibles

Por otra parte, se evidenció la significativa magnitud de ventas de diversas verduras, lo cual es fundamental para la selección de un sustrato continuo. Este hallazgo resalta la importancia de escoger productos específicos que aseguren un suministro constante y fiable. En este contexto, se decidió seleccionar el zapallo, remolacha, zanahoria, papa, así como diversas hojas descartadas de productos como el brócoli, coliflor, repollo y lechuga. Estas selecciones no solo son abundantes en el mercado, sino que también muestran una notable acumulación en las áreas circundantes del Mercado Cardonal. La elección de estas verduras se basa en varios factores clave. Primero, el zapallo, papa y zanahoria son productos de alta rotación y

disponibilidad constante, garantizando un suministro regular para el sustrato. Por otra parte, las hojas de descarte de brócoli, coliflor, coles, lechuga u otras hortalizas que representa una importante generación de residuos orgánicos que, de otra manera, no se aprovecharían, contribuyendo así a una gestión de residuos más sostenible.

Además, la observación de la acumulación significativa de estos desechos alrededor del mercado subraya la necesidad y la oportunidad de implementar un sistema efectivo de recolección y reutilización.

Tabla 6.1 Frutas y Verduras seleccionadas

Frutas	Plátano
	Pera
	Manzana
Verduras y Hortalizas	Zanahoria
	Remolacha
	Papa
	Hojas de descarte
	Zapallo

6.2. Cuantificación de los residuos generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso

Los residuos orgánicos generados en el Mercado Cardonal de Valparaíso, originados a partir de las actividades comerciales hortofrutícolas, fueron cuantificados a través de un meticuloso proceso de recopilación de datos. Este proceso se centró en cómo se gestionan y disponen estos residuos dentro del terminal. Para obtener una visión clara y precisa, se organizaron varias reuniones con el personal de administración del Mercado Cardonal, así como con el equipo de aseo responsable de la limpieza y manejo de residuos. Durante estas reuniones, se presentó detalladamente el plan de trabajo a seguir. El objetivo era comprender a fondo la operativa del mercado y cómo los locatarios, es decir, los comerciantes y vendedores del lugar, gestionan los desechos orgánicos que generan.

Se plantearon una serie de preguntas al personal del mercado, enfocadas en la dinámica diaria de los locatarios, los tipos de productos que manejan y las prácticas de manejo de residuos que utilizan. Estas preguntas fueron diseñadas para recabar información sobre la frecuencia de generación de residuos, las variaciones en la cantidad y tipo de residuos a lo largo del tiempo

Tabla 6.2 Datos de Cuantificación de Residuos en Mercado

Datos	Valores	Unidades
N° de Recolecciones	1	veces / día
Volumen de Batea	15	m ³
Residuos Generados	15	m ³ /día
Residuos Generados de Interés	70	%
Densidad aparente	450	kg / m ³
Masa de residuos generados	6750	kg/día
Residuos Orgánicos Generados	4750	kg/día

La densidad de estos residuos se revisó en bibliografía donde se establece que estos se encuentran en un rango de 250 a 450 [kg/m³], permitiendo calcular la masa de los residuos generados (Francesc Giró, 2007).

Se identificó que los residuos generados en las inmediaciones del Mercado Cardonal son recolectados diariamente por personal de aseo de la Municipalidad de Valparaíso. Estos se almacenan en una batea compactadora propiedad de la empresa COSEMAR, con una capacidad de 15 [m³]. Con base en estos antecedentes y considerando la fracción orgánica de los residuos sólidos domiciliarios y asimilables (RSDyA), se estima una generación diaria de aproximadamente 4.750 [kg] de residuos orgánicos potencialmente aprovechables para un proceso de digestión anaeróbica.

Además, a lo largo de este proceso de consulta y observación, se observó una notable diversidad en los productos hortofrutícolas comercializados día a día y semana a semana en el mercado. Sin embargo, se concluyó que esta diversidad no se traduce en grandes variaciones en los tipos de residuos orgánicos generados.

6.3. Ensayo de Potencial Bioquímico del Metano

Los biorreactores llevaron a cabo el proceso de digestión anaeróbica en un entorno completamente hermético, como se ilustra en la Figura 6.6. Para garantizar que se mantuvieran a una temperatura constante a 37° C, evitando pérdidas térmicas debidas a las variaciones de temperatura del ambiente, se empleó un contenedor aislante de termo espuma.

Este contenedor fue llenado con una cantidad de agua 3:1 con relación al sustrato, asegurando que los biorreactores quedaran completamente rodeados, lo que ayudó a estabilizar la temperatura interna. Además, se perforaron orificios en el contenedor para permitir el paso de los conductos a través de los cuales se extraería el biogás generado. Cada conducto fue equipado con una válvula, lo que ofrece la posibilidad de controlar el flujo de biogás, permitiendo abrir o cerrar las válvulas según sea necesario durante el proceso



Figura 6.6 Montaje de Biorreactores

La agitación de los biorreactores se llevó a cabo de forma manual una vez al día, coincidiendo con el momento en que se realizaba la medición diaria del volumen de biogás producido. Esta rutina diaria de agitación aseguraba una mezcla adecuada dentro de los biorreactores, optimizando así el proceso de digestión anaeróbica y garantizando una medición precisa del biogás generado.

6.3.1. Caracterización del Sustrato

Los parámetros evaluados en la caracterización del sustrato e inóculo, específicamente del estiércol de equino, proporcionan información fundamental sobre su composición y su idoneidad para el proceso de digestión anaeróbica. Entre los aspectos analizados se encuentran el contenido de humedad, que es crucial para evaluar la cantidad de agua presente y su impacto en el equilibrio del sistema. También se determinaron los sólidos totales (ST), que permiten conocer la proporción de materia seca en el inóculo, y los sólidos volátiles (SV), los cuales ofrecen un indicativo del contenido de materia orgánica disponible para ser degradada por los microorganismos. Además, se midió el pH, que es un parámetro esencial para garantizar condiciones óptimas de funcionamiento dentro del biorreactor

6.3.1.1. *Inoculo*

Se realizó la caracterización del inóculo o cosustrato utilizado en el proceso de digestión anaeróbica, correspondiente al estiércol de equino, con resultados que muestran una composición adecuada para la producción de biogás. Uno de los aspectos más destacados es la alta presencia de materia orgánica, que abarca aproximadamente el 66,7% de los sólidos volátiles. Esta cifra es relevante, ya que indica un alto contenido de sólidos volátiles, lo que significa que gran parte del material es degradable por los microorganismos anaeróbicos, maximizando el potencial de producción de biogás.

Además, el estiércol cuenta con un contenido considerable de humedad, lo que asegura que se mantengan las condiciones de hidratación necesarias para el buen funcionamiento del proceso. La presencia de agua es esencial para permitir el crecimiento y la actividad de las bacterias involucradas en la digestión

Tabla 6.3. Características del Inoculo

Parámetro	Valor
Humedad (%)	60,22% ±2,03
Solidos Totales (%)	39,77% ±2,03
Solidos Volátiles (%)	66,61% ±1,50
pH	6,83

6.3.1.2. *Residuos Orgánicos del Mercado Cardonal*

Para el análisis del sustrato de residuos orgánicos generados en el mercado, se elaboraron tres mezclas con diferentes proporciones de residuos de frutas y de verduras y hortalizas, con el objetivo de evaluar cómo varía la producción de biogás al modificar la composición de estos residuos. La mezcla M1 contiene un 38% de residuos frutales y un 62% de residuos de verduras y hortalizas, buscando una proporción equilibrada entre ambos tipos de residuos. En la mezcla M2, se priorizó la inclusión de residuos frutales con la intención de aumentar el contenido de azúcares, los cuales son fácilmente fermentables y favorecen la producción de biogás. Esta mezcla tiene un 71,8% de residuos frutales, como se detalla en la Tabla 6.4. Por otro lado, la mezcla M3 se diseñó con un mayor porcentaje de residuos de verduras y hortalizas, alcanzando un 84,8% de estos materiales. Estas variaciones en la composición de las mezclas fueron planteadas con el fin de estudiar cómo la relación entre los residuos frutales y de verduras influye en la producción de biogás, teniendo en cuenta que los residuos frutales, ricos en azúcares, tienden a ser más fácilmente digeridos por los microorganismos responsables de la digestión anaeróbica, mientras que las verduras y hortalizas aportan mayor

cantidad de nitrógeno y fibra, lo que podría impactar en la actividad microbiana y la eficiencia del proceso

Tabla 6.4 Composición de las Mezclas

Composición	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
	Masa [g]	Porcentaje Masico (%)	Masa [g]	Porcentaje Masico (%)	Masa [g]	Porcentaje Masico (%)
Plátano	43,63	12,84	107,81	29,84	29,28	7,42
Manzana	30,27	9,91	49,12	13,59	0	0
Pera	55,21	16,25	102,48	28,36	30,81	7,81
Remolacha	49,60	14,60	50,50	13,98	137,43	34,82
Hojas de descarte	20,13	5,92	0	0	21,07	5,34
Papa	50,06	14,73	0	0	0	0
Zanahoria	30,74	9,05	26,26	7,27	70,26	17,80
Zapallo	60,11	17,69	25,18	6,97	105,89	26,83

Alrededor del 15% de la humedad se pierde en las mezclas previamente establecidas, por lo que es necesario tratar las muestras antes de someterlas al proceso de digestión anaeróbica. Además, presenta un porcentaje de sólidos totales (ST) en un rango entre el 11,5-16,5% considerándose adecuado para el proceso de digestión considerando que son residuos sólidos, asimismo los porcentajes de SV indican una importante fracción de materia orgánica entre los rangos de 86-90%, los resultados de la caracterización se encuentran detallados en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. Características de las Mezclas utilizadas

Parámetros	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Humedad (%)	86,387	83,808	88,403
ST (%)	13,613	16,192	11,597
SV (%)	89,940	86,268	88,754
pH	5,21	5,66	6,42

6.3.2. Evaluación del rendimiento del biogás proveniente de diferentes mezclas

A continuación, se presenta un resumen detallado de los rendimientos obtenidos para cada mezcla, incluyendo los resultados correspondientes a sus repeticiones. Además, se ha calculado la media general de los rendimientos para cada mezcla, lo que proporciona una visión clara del comportamiento promedio de cada una.

En cuanto al monitoreo del volumen diario de biogás generado, se ha limitado al periodo de lunes a viernes, ya que no es posible realizar mediciones durante el fin de semana. Esto podría influir en la acumulación de biogás durante esos dos días, lo que debe ser considerado al interpretar los resultados.

6.3.2.1. Volumen de biogás diario y acumulado generado por Blanco

El volumen diario de biogás generado por la muestra de blanco sigue una tendencia similar en la curva de acumulación; sin embargo, la repetición B3 muestra un rendimiento superior a las otras repeticiones demostrado en la Figura 6.7.

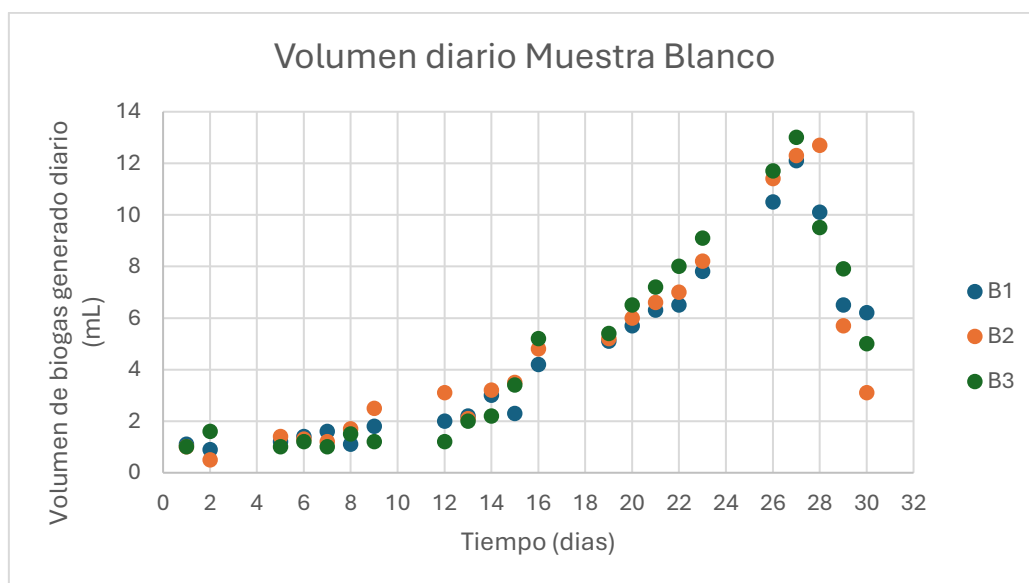


Figura 6.7 Volumen de generación diaria de biogás de Muestra blanco

El promedio de las tres repeticiones de la muestra blanco se muestra en la Tabla 6.8 observándose una producción máxima de biogás de 6,1 [mL], alcanzada cerca del día 27. Desde ese punto, se observa una disminución notable en la producción.

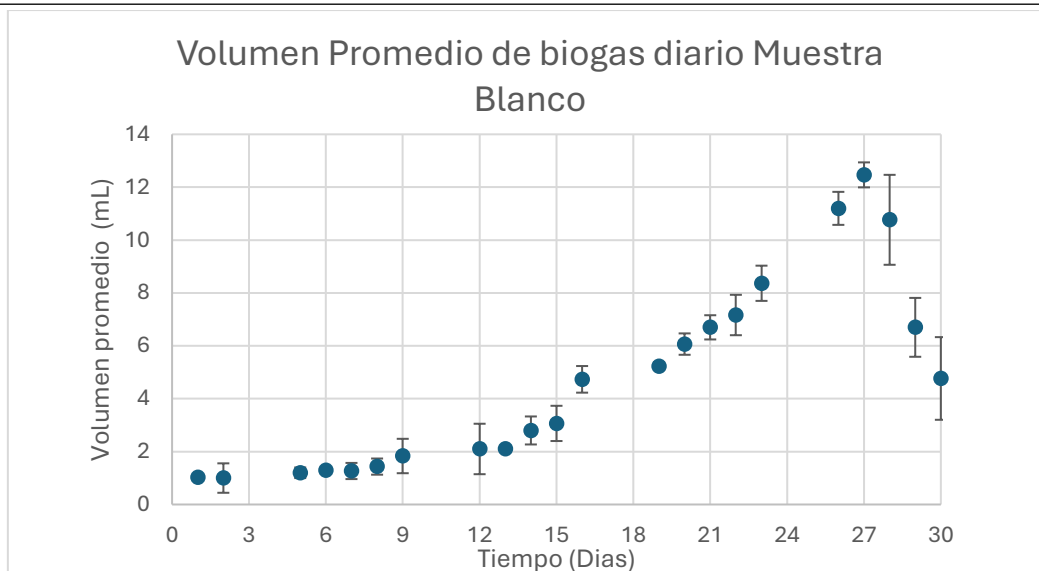


Figura 6.8 Volumen promedio de biogás generado diario de muestra blanca

Se ha calculado el promedio de producción acumulada de biogás durante los 30 días que el inóculo permaneció en los biorreactores, alcanzando una producción total de 48,78 [mL] al finalizar el proceso como se visualiza en la curva del gráfico de la Figura 6.9.

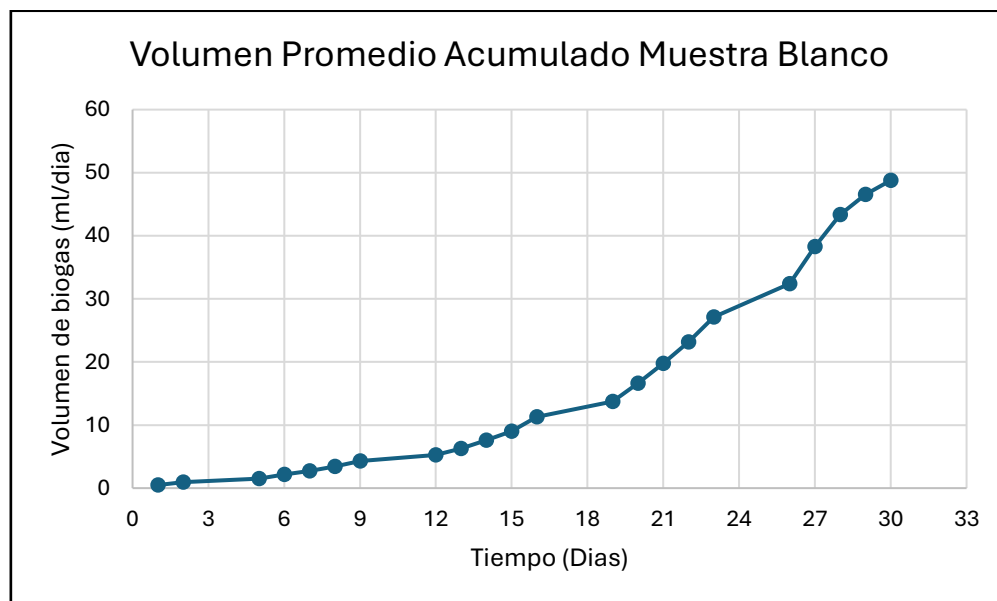


Figura 6.9 Volumen promedio acumulado de la Muestra blanca

Los resultados muestran que el uso de estiércol de equino como cosustrato e inóculo en la digestión anaeróbica genera una notable cantidad de biogás y enriquece los

residuos provenientes del mercado con un valioso aporte de materia orgánica. Este cosustrato mejora la actividad microbiana al equilibrar la proporción de carbono-nitrógeno, lo que facilita un proceso de degradación más eficiente y sostenido en el tiempo. La incorporación de estiércol de equino también contribuye a estabilizar la mezcla ya que presenta un pH de 6,83 que favorece más las condiciones de la fermentación

6.3.2.2. Volumen de biogás diario y acumulado generado por M1

La mezcla M1, con un pH ácido que no es ideal para la digestión anaeróbica, logró alcanzar una producción máxima de 96 [mL] de biogás en la repetición M1.3 dentro del tiempo estimado como se demuestra en la Figura 6.10. A partir del día 18, se observó una tendencia similar en las curvas de producción de biogás entre las repeticiones, lo que indica un comportamiento constante en el rendimiento de la mezcla a pesar de las condiciones de acidez. Este patrón de acumulación de biogás sugiere que, aunque el pH ácido puede haber limitado en parte la actividad microbiana, el sistema logró adaptarse y producir biogás de forma continua.

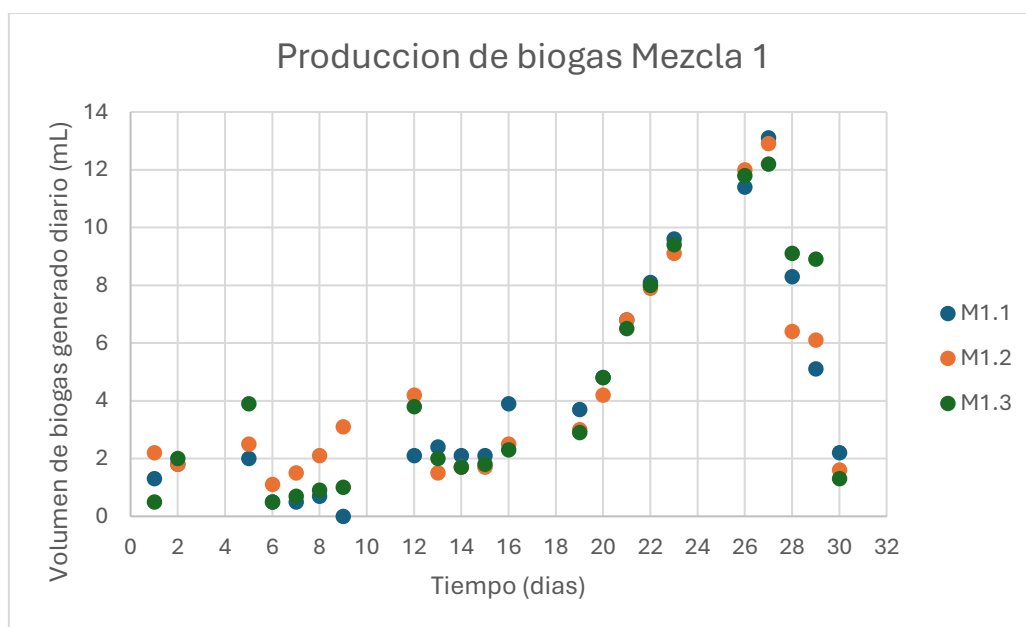


Figura 6.10 Volumen de generación diaria de biogás de M1

El volumen promedio de biogás generado por la mezcla M1 mostró pequeños aumentos de producción alrededor de los días 5 y 12, coincidiendo con los momentos de mayor acumulación de gas en el sistema. A partir del día 18, se observa un incremento considerable en la producción diaria como se aprecia en la Figura 6.11, lo que sugiere que la actividad microbiana se fue adaptando progresivamente a las

condiciones de la mezcla, permitiendo un aumento constante en la generación de biogás disminuyendo de forma considerable desde el día 27.

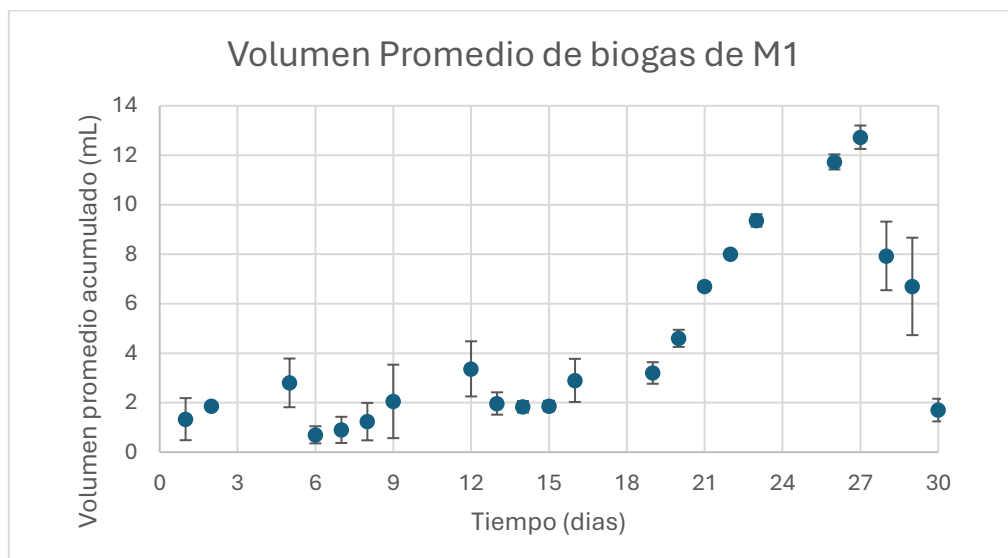


Figura 6.11 Volumen promedio de biogás generado diario de M1

El volumen acumulado de biogás generado por la mezcla M1 sigue una tendencia exponencial a lo largo del período de retención hidráulica demostrado en la Figura 6.12. Durante los primeros 15 días, se acumularon apenas 19,92 [mL] de biogás, lo que indica una fase inicial de adaptación y crecimiento de la actividad microbiana. Posteriormente, se observa un aumento significativo en la producción, lo que refleja una mayor eficiencia en la degradación de la materia orgánica disponible y una estabilización en las condiciones de gestión anaeróbica.

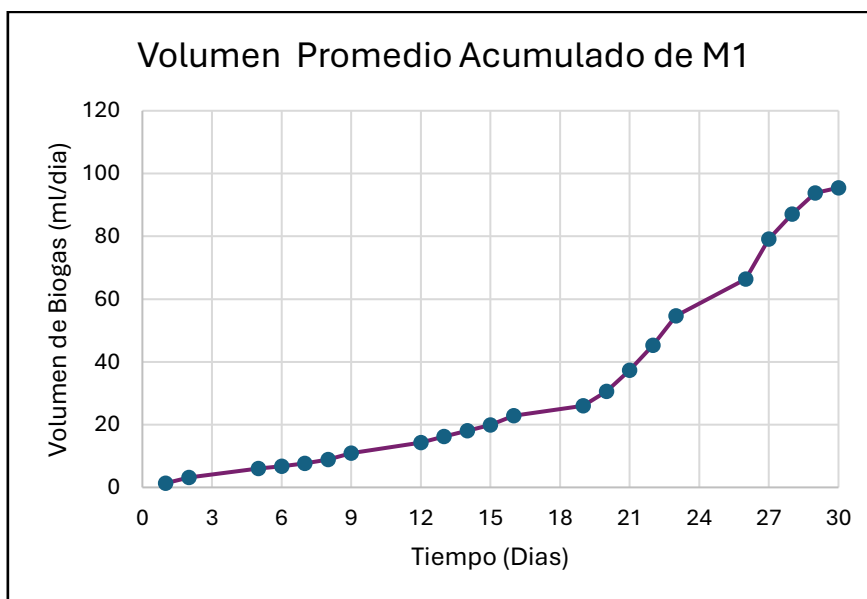


Figura 6.12 Volumen promedio acumulado de M1

6.3.2.3. Volumen de biogás diario y acumulado generado por M2

La mezcla M2, compuesta principalmente de residuos frutales, mostró un rendimiento superior en comparación con las otras mezclas debido a su alto contenido de azúcares disponibles ya que presenta una relación C:N a las verduras, que favorecen la degradación en el proceso de digestión anaeróbica. Sin embargo, también presenta el pH más ácido de las tres mezclas, lo que podría afectar la estabilidad del proceso a largo plazo. Las repeticiones de M2 manifestaron algunas variaciones en su comportamiento, destacándose la repetición M2.2, que alcanzó la mayor producción de biogás dentro del tiempo de retención hidráulica establecido que se demuestra en la Figura 6.13.

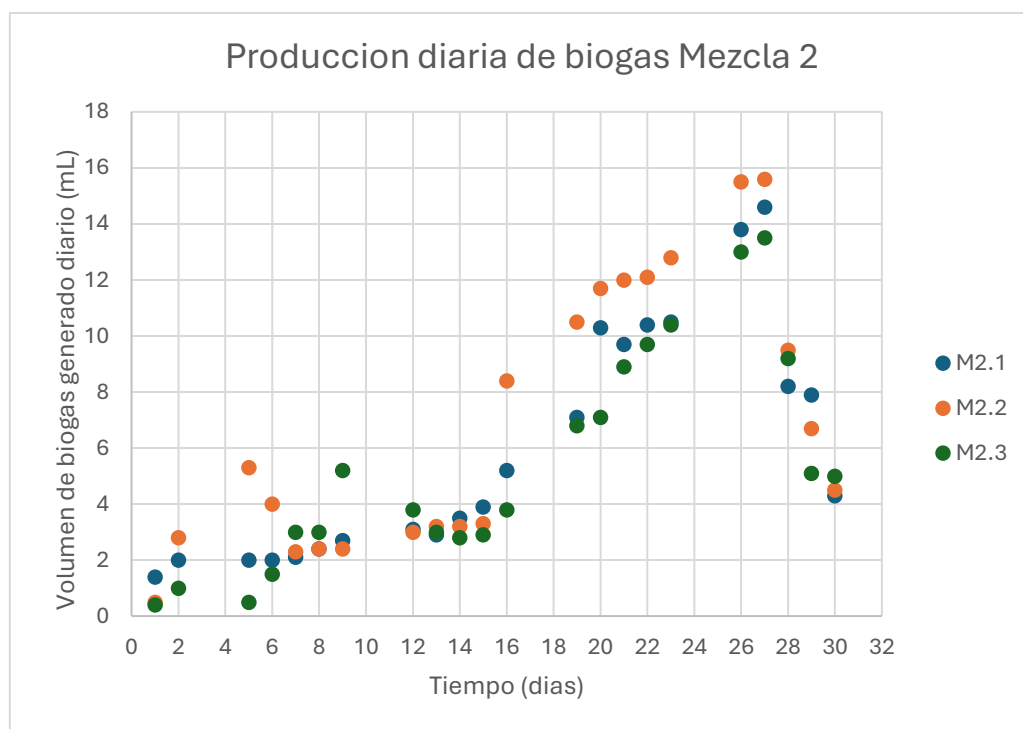


Figura 6.13 Volumen de generación diaria de biogás de M2

La producción de biogás experimenta una fase de crecimiento progresivo con algunas fluctuaciones en los primeros días, que desde el día 15 aproximadamente empieza a aumentar considerablemente su producción hasta alcanzar un pico máximo cercano a los 15 [mL/día] alrededor del día 27 demostrado en la Figura 6.14.

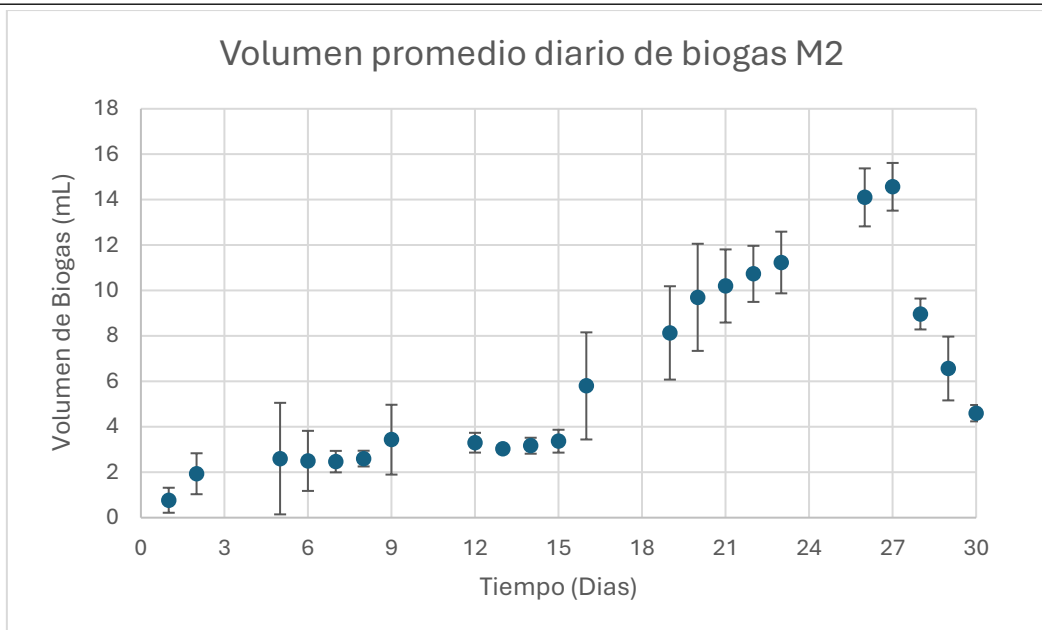


Figura 6.14 Volumen promedio de biogás generado diario de M2

En el volumen promedio acumulado de M2 demostró como anteriormente se mencionaba un crecimiento exponencial, especialmente a partir del día 15, indicando un incremento sostenido en la producción de biogás. Además, demuestra una importante variabilidad en los datos.

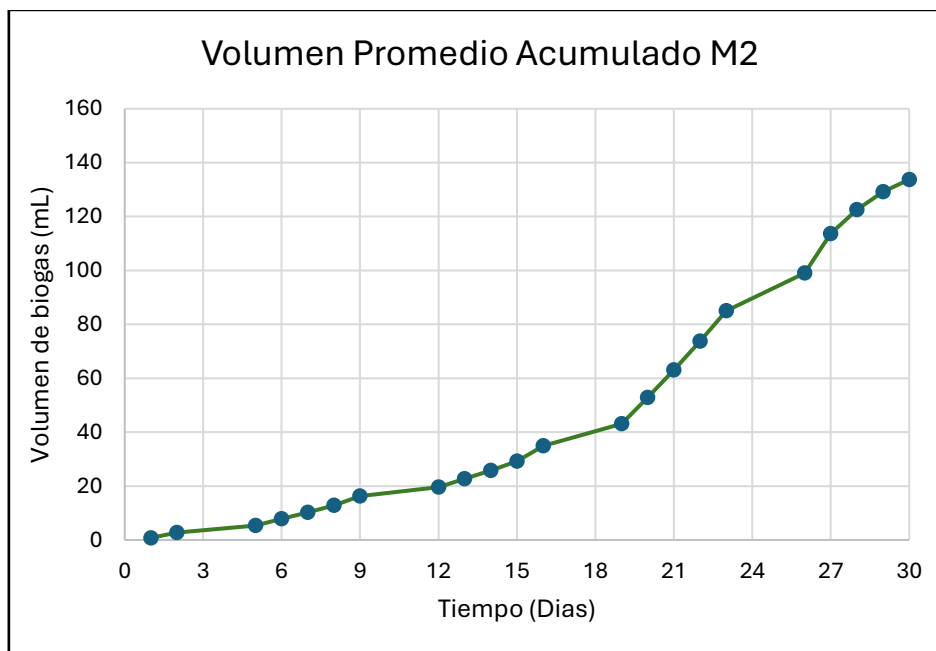


Figura 6.15 Volumen promedio acumulado de M2

6.3.2.4. Volumen de biogás diario y acumulado generado por M3

El rendimiento de la mezcla M3 muestra una tendencia consistente en las tres repeticiones realizadas, lo que indica una producción estable de biogás entre los distintos ensayos. Esta mezcla, compuesta principalmente por residuos de verduras y hortalizas, tiene un pH ligeramente más neutro en comparación con las demás mezclas evaluadas. Este pH neutro puede ser favorable para la digestión anaeróbica, ya que facilita un entorno más estable para la actividad microbiana.

Inicialmente, en los primeros días (hasta aproximadamente el día 10), la producción es baja y relativamente constante, lo cual es común en la fase inicial del proceso de digestión anaeróbica, donde los microorganismos se adaptan al sustrato. A partir del día 10, la producción comienza a aumentar gradualmente, alcanzando un máximo entre los días 25 y 27, donde se registra un pico de alrededor de 14 [mL/día] en todas las repeticiones.

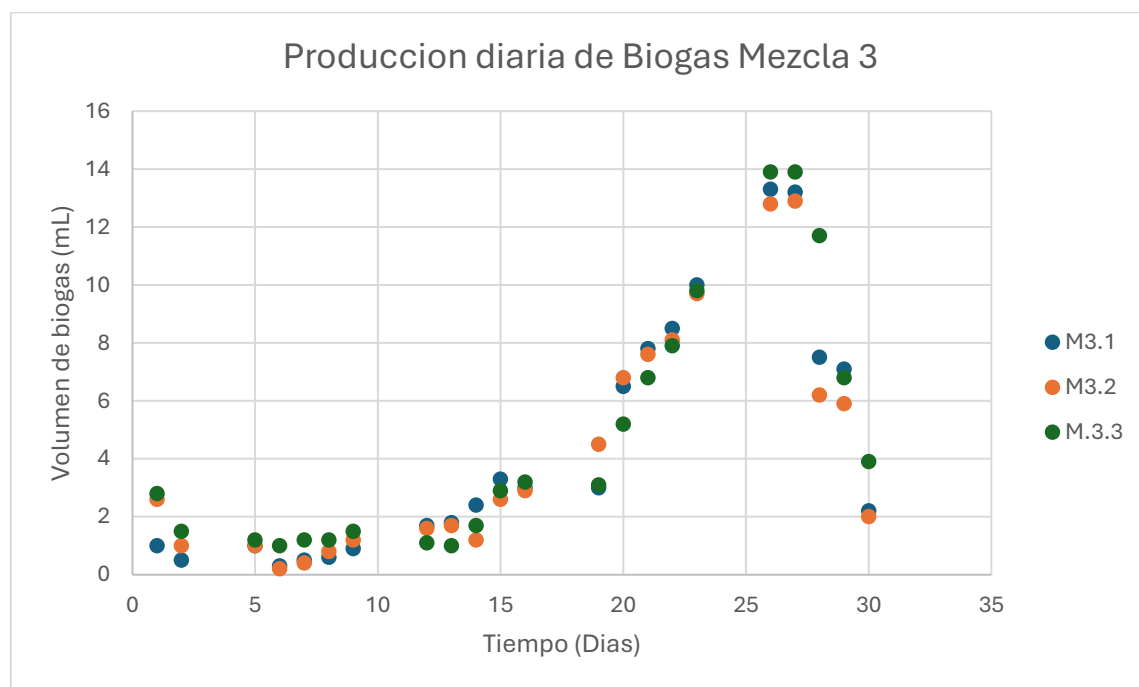


Figura 6.16 Volumen de generación diaria de biogás de M3

El volumen promedio diario de M3, se logra observar que la producción inicial es baja durante los primeros días, con algunos aumentos menores entre los días 5 y 10. A partir del día 15, se nota un incremento más constante en la producción diaria.

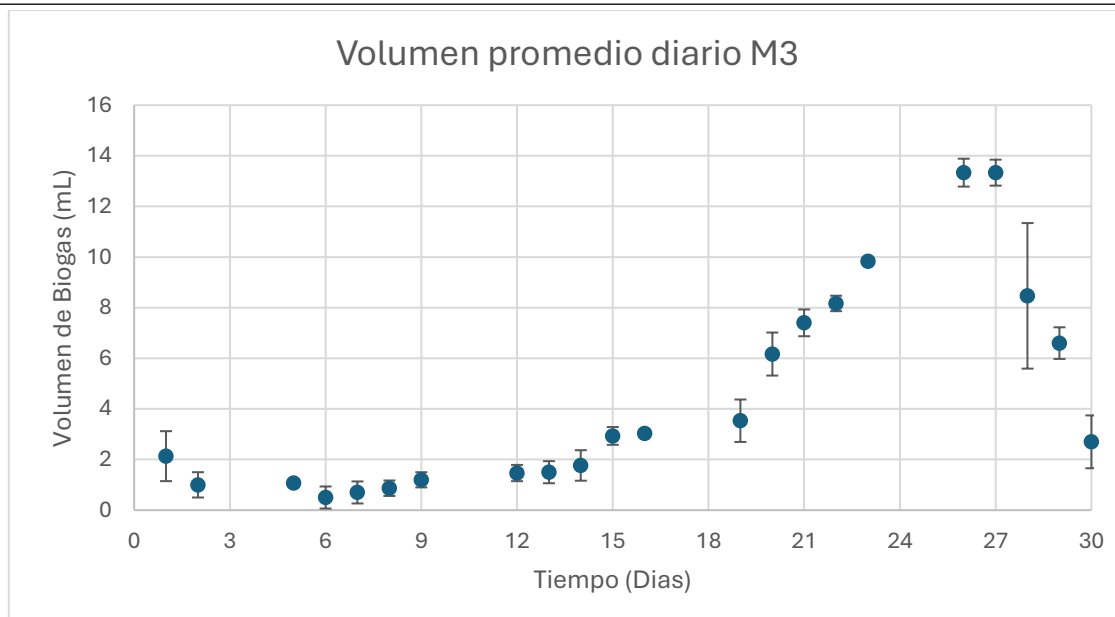


Figura 6.17 Volumen promedio de biogás generado diario en M3

Para el promedio de las tres repeticiones y su acumulación en el periodo de los 30 días, la curva de acumulación indica un crecimiento progresivo en la producción de biogás alcanzando los 97 [mL]. En los primeros días, el volumen acumulado de biogás es bajo, indicando una fase de adaptación en la que la actividad microbiana aún se está desarrollando, después del día 15, se observa un aumento más pronunciado en el volumen acumulado

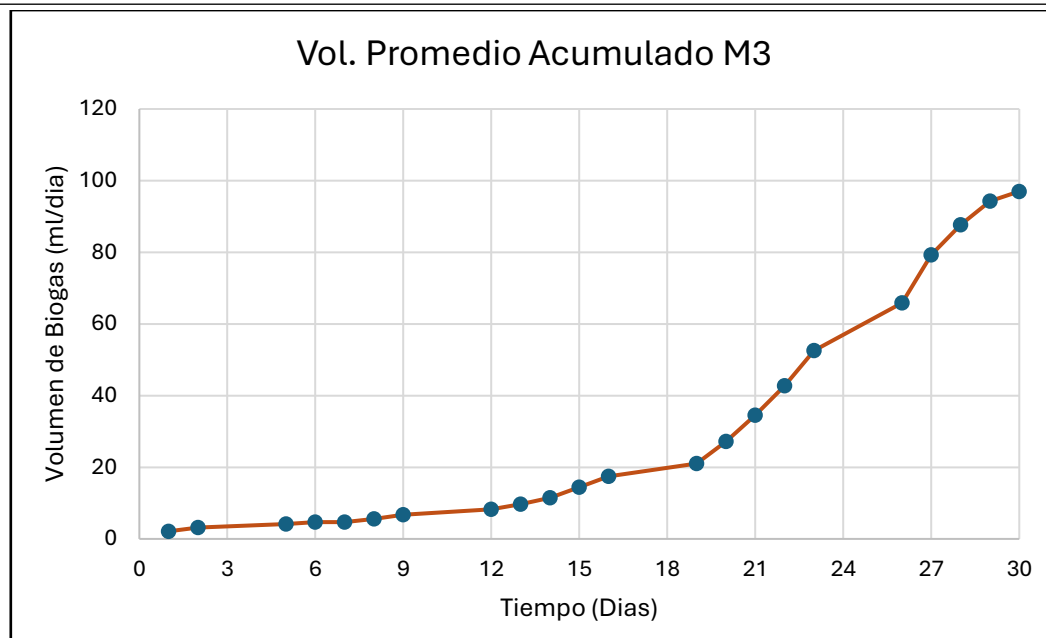


Figura 6.18 Volumen promedio acumulado de M3

6.3.2.5. Comparación de producción de Biogás entre las mezclas

Se observa en la Figura 6.19 se presenta una comparación de la producción acumulada de biogás para las mezclas estudiadas. Las curvas correspondientes a las mezclas M2 y M3 muestran una tendencia similar, reflejando comportamientos comparables en el tiempo. Sin embargo, M2 destaca por alcanzar una mayor producción acumulada de biogás durante el período que duró el proceso. Este rendimiento superior puede atribuirse a su mayor proporción de residuos de fruta, los cuales poseen características que favorecen la generación de biogás debido a su composición más rica en azúcares y relación en C:N y menor contenido de fibras lignocelulósicas (Manual de compostaje del Agricultor, 2013)

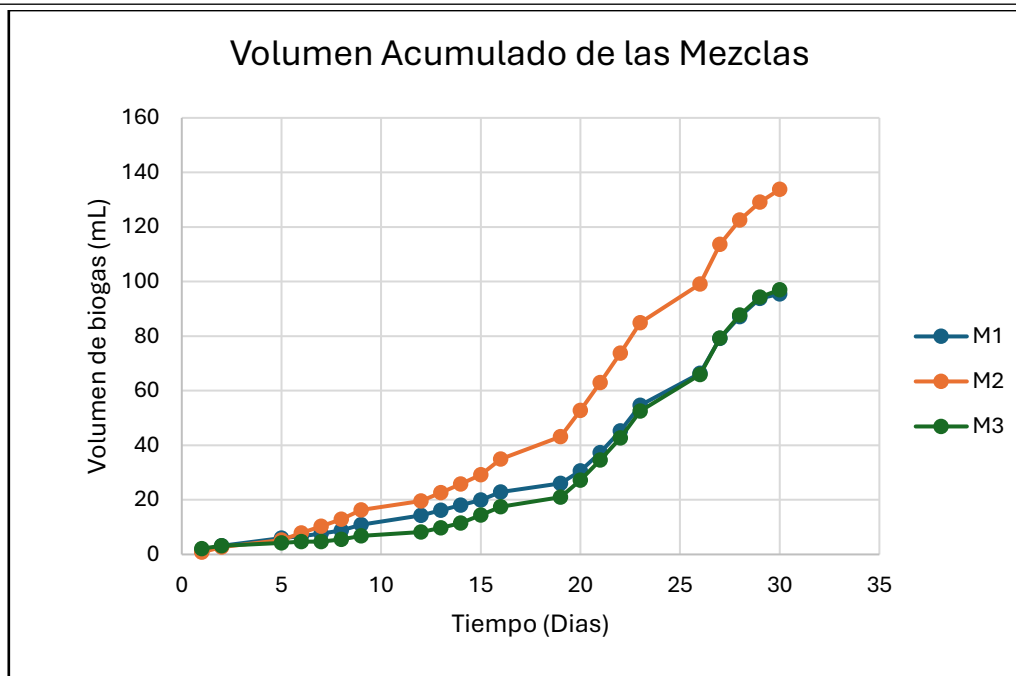


Figura 6.19 Comparación de Volumen acumulado de mezclas

6.3.2.6. Diferencia de pH en el proceso

Los niveles de pH registrados en los biorreactores reflejan la concentración de ácidos que se acumularon a lo largo del período de 30 días, que corresponde a la duración del proceso de digestión anaeróbica. El monitoreo del pH es un indicador clave para evaluar el grado de acidez generado, lo que permite obtener información crucial sobre las condiciones químicas dentro del sistema durante el transcurso de la digestión.

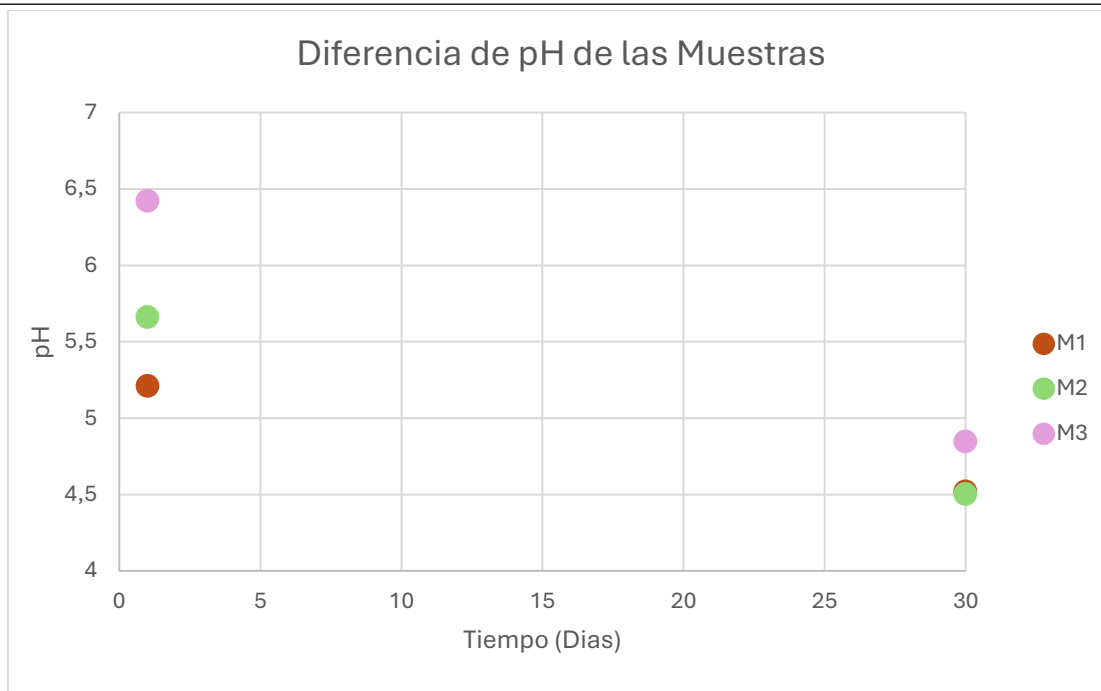


Figura 6.20 Grafico de Diferencia de pH de las Muestras

Los niveles de pH final de las tres muestras se encuentran por debajo de 5, como se observa en la figura. Sin embargo, la mezcla M3 experimenta el mayor aumento en acidez, lo cual indica una acumulación significativa de ácidos orgánicos que no se transforman en biogás. Este aumento en la acidez puede interferir con la actividad de las bacterias metanogénicas, inhibiendo la conversión de ácidos grasos volátiles en metano y afectando la producción eficiente de biogás.

6.4. Escala a las condiciones del Mercado Cardonal

Al analizar las curvas de acumulación de biogás generadas por las distintas mezclas experimentales, se realizó una extrapolación con el objetivo de estimar la cantidad de biogás que se produciría a partir del sustrato disponible diariamente en el Mercado Cardonal. Este proceso de extrapolación tomó en cuenta las tasas de generación observadas en las pruebas a escala laboratorio y las características del sustrato orgánico generado en el mercado. El procedimiento incluyó la selección de la mezcla que mostró el mayor rendimiento acumulado en las pruebas, permitiendo proyectar los resultados a una escala mayor que refleja las condiciones reales del mercado. A partir de esto, se estimó la producción diaria de biogás que se podría alcanzar, considerando los volúmenes significativos de desechos orgánicos generados en el mercado y ajustando las tasas de producción observadas en laboratorio según su rendimiento expresado en [mL/gSV] que se encuentran detallados en la Tabla 6.6.

$$Rend. Biogas_{real} \left[\frac{mL}{gSV} \right] = \frac{Prod. biogas \text{ sin inoculo } [mL]}{SV_{sustrato} [g]}$$

Tabla 6.6. Rendimiento de las Mezclas generadas

N° Reactores	Masa Sustrato [g]	Masa Inoculo [g]	SV sustrato [g]	SV inoculo [g]	Producción de Biogás [mL]	Producción Promedio de biogás [mL]	Producción de biogás sin inoculo [mL]	Rendimiento real de biogás [mL/gSV]
B1	0	17	0	4,50	47,0	48,77	-	-
B2	0	17	0	4,50	49,3			
B3	0	17	0	4,50	50,0			
1.1	36	17	4,41	4,50	92,5	94,80	46,03	10,44
1.2	36	17	4,41	4,50	95,9			
1.3	36	17	4,41	4,50	96,0			
2.1	36	17	5,03	4,50	130,0	133,77	85,00	16,90
2.2	36	17	5,03	4,50	151,7			
2.3	36	17	5,03	4,50	119,6			
3.1	36	17	3,71	4,50	96,1	97,70	48,93	13,19
3.2	36	17	3,71	4,50	93,7			
3.3	36	17	3,71	4,50	103,3			

Se observa que la mezcla M2 presenta el mayor rendimiento en términos de aprovechamiento de la materia orgánica disponible entre las tres mezclas evaluadas. Por esta razón, se selecciona M2 para un análisis más detallado en la evaluación económica, considerando su potencial para maximizar la producción de biogás y optimizar el uso de recursos en el proceso de digestión anaeróbica. Según la disponibilidad del sustrato en el mercado que aborda aproximadamente los 4,75 [ton/día], existe un potencial de generación de biogás cercano a los 11,21 [m³/día] equivalente a 336,40 [m³/mes]

6.4.1. Potencial térmico del Biogás generado

Para evaluar el rendimiento térmico del biogás generado, se tomará en cuenta la mezcla con mayor producción durante el tiempo de retención hidráulica establecido. En este caso, la mezcla M2 ha demostrado un nivel más elevado de producción de biogás acumulado. Además, se asumirá que el biogás producido tiene un 60% de metano, lo cual proporciona un poder calorífico de 5335 kcal/m³ (Varnero, 2011).

En comparación, el Mercado Cardonal de Valparaíso está parcialmente alimentado por la red de distribución de GasValpo, cuya composición de gas natural tiene un poder calorífico de 9185 kcal/m³ según los datos del CIMET. De esta manera, se puede evaluar la viabilidad del uso de biogás frente al gas natural en términos de eficiencia energética y costos operativos.

$$\text{Volumen de gas natural equivalente [m}^3\text{]} = \frac{336,4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \right] * 5335 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \right]}{9185 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \right]}$$

$$\text{Volumen de gas natural equivalente [m}^3\text{]} = 195,39 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Con una generación mensual estimada de 336,4 m³ de biogás, el proyecto podría reducir el consumo de gas natural en aproximadamente 195,39 m³ al mes. Sin embargo, este cálculo preliminar no contempla factores críticos como la eficiencia de los equipos utilizados para la combustión del biogás ni el rendimiento energético exacto del sistema. La eficiencia de conversión del biogás en energía útil puede variar según las características técnicas de los dispositivos y la calidad del biogás producido, especialmente si contiene impurezas o gases que reducen su poder calorífico efectivo.

Por otra parte, se hace necesario conocer el Volumen de biogás generado a condiciones normales, el cual se calculó de la siguiente forma

$$Vol. de biogas a Cond Normales = 336,4 [m^3/mes] * \frac{1 [atm]}{1 [atm]} * \frac{273,15 [K]}{(35 + 273,15) [K]}$$

$$Vol. de biogas a Cond Normales = 298,19 \left[\frac{Nm^3}{mes} \right]$$

6.4.1.1. Cogeneración de energía

Los requerimientos de energía en una planta de biodigestión variarán en función de la tecnología empleada y el nivel de automatización del sistema. Según experiencias operativas en plantas de biodigestión, se estima que el consumo de electricidad puede oscilar entre un 5% y 15% de la energía generada. En cuanto a la demanda de energía térmica para calefacción, esta dependerá de factores climáticos del lugar de instalación, el tipo de biodigestor y el nivel de aislamiento térmico. En condiciones normales, la demanda térmica puede alcanzar entre un 10% y un 35% de la energía térmica generada, según el diseño y eficiencia del sistema (MINENERGIA, 2018).

En la Tabla 6.7 que se muestra a continuación se detalla los requerimientos para el evaluar el potencial energético donde.

Tabla 6.7. Requerimiento de Autoabastecimiento y Potencial de Energía

ITEM	Total
Biogás Generado Año [m ³ /año]	4.036,80
Producción de Metano (60%) [m ³ /año]	2.422,08
Contenido Energético Metano [kW/ m ³]	9,96
Energía de Generada anual [kW/año]	24.123,92
Eficiencia eléctrica [%]	35
Eficiencia Térmica [%]	40
Horas anuales de Operación	7500
Generación Eléctrica [kWh/año]	8.446,52
Generación Térmica [kWh/año]	9.653,17
Potencial Eléctrico [kW]	1,13
Potencial Térmico [kW]	1,29

Requerimiento eléctrico de la planta [kWh/año] (40% autoconsumo)	3.378,61
Requerimiento térmico de la planta [kWh/año] (30% de autoconsumo)	2.895,95
Generación eléctrica disponible [kWh/año]	5.067.91
Generación térmica disponible [kWh/año]	6.757,32

Fuente: Elaboración Propia

6.4.1.2. Emisiones de CO₂ ligadas al proceso

El almacenamiento de residuos orgánicos implica una notable generación de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente debido a la descomposición de estos materiales en ambientes no controlados. A medida que se descomponen al aire libre bajo el supuesto de su acumulación en los rellenos sanitarios, los desechos como restos de alimentos emiten metano, uno de los gases de efecto invernadero con mayor impacto en el calentamiento global. Se estima que una tonelada de estos residuos genera cerca de 1899 kg de CO₂ equivalente (USEPA). Este valor sirve como base para calcular las emisiones de CO₂

$$CO_2 \text{ por disposición de residuos} = 4,750 \text{ [ton]} * 1899 \left[\frac{\text{kg de } CO_{2eq}}{\text{ton}} \right] = 9.020,25 \text{ kg de } CO_{2eq}/\text{dia}$$

Por lo que se estima aproximadamente 9,02 [ton/día] de CO_{2eq} al evitar que gran cantidad de residuos lleguen a su disposición final en los rellenos sanitarios, donde en su descomposición emiten gran cantidad de GEI debido a la naturaleza del residuo.

6.5. Dimensionamiento y Diseño del Biorreactor

Dada la naturaleza operativa del Mercado Cardonal y el tipo de residuos orgánicos que se generan constantemente en esta instalación, se ha decidido optar por el diseño de un digester anaerobio semicontinuo. Esta elección responde principalmente al flujo constante de desechos orgánicos que se producen. Un digester semicontinuo permite una operación flexible, ya que el ingreso de material orgánico y la extracción del digestato no ocurren de manera simultánea ni continua, sino que se realizan en intervalos, ajustándose mejor a la cantidad y ritmo de producción de residuos. Además, este tipo de diseño facilita las labores de mantenimiento y limpieza, ya que se puede operar por lotes, permitiendo así realizar pausas para el servicio técnico cuando sea necesario sin comprometer por completo la operación del sistema.

6.5.1. Volumen de Diseño de Digester

Para el volumen preliminar del digester, se considero la velocidad de carga orgánica (VCO) como parámetro de diseño, que como se reviso este variara entre 1 a 3 [kg SV/m³d], por lo que se ocupara un valor de 1,5 [kg SV/m³d] para el cálculo, además, se considera un 86,3%

de SV para un flujo diario de 4,75 [t/día] estimándose una cantidad de 663,48 [kgSV/día]. Se procedió a calcular de la siguiente forma:

$$V_{reactor} = \frac{663,48 \left[\frac{kgSV}{día} \right]}{1,5 \left[\frac{kgSV}{m^3 * día} \right]} = 442,32 m^3 \approx 443 m^3$$

Se determinó un volumen preliminar de 443 m³ para el biodigestor, el cual se diseñó bajo el modelo semicontinuo y tipo mezcla continua. Este tipo de biodigestor está previsto para recibir la carga de materia orgánica una vez por semana, programándose esta tarea para el último día hábil de cada semana

6.5.2. Volumen del Gasómetro de almacenamiento

Para el volumen de diseño del Gasómetro se establecerá el día con mayor rendimiento de la mezcla seleccionada, que corresponde a M2, que logra alcanzar aproximadamente 134 ml en el periodo de tiempo de retención hidráulica y se contempla el día con mayor generación de biogás. Además, se contempla un consumo de 6 horas de consumo por parte de las cocinas. Además, se considera un factor de seguridad del 24%

$$\text{Volumen de Gasómetro} > Q_p \text{ [m}^3\text{/día]} * (1 - tc) \text{ [día]} * 1,24$$

$$11,21 \text{ [m}^3\text{/día]} * (1 - 0,25) * 1,24$$

$$\text{Volumen de Gasómetro } 10,43 > \text{ [m}^3\text{]}$$

6.6. Evaluación Económica

6.6.1. Inversión

Para el financiamiento del proyecto, se evaluaron diversas estrategias y beneficios disponibles para proyectos de esta magnitud. Se decidió postular al Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR), otorgado por la Gobernación de la Región de Valparaíso. Este fondo está destinado a financiar iniciativas que promuevan el desarrollo económico, social y cultural en las diferentes regiones de Chile. Además, incluye la participación de organizaciones sin fines de lucro, permitiendo la cobertura de al menos un 20 % del costo total del proyecto, según los requisitos y criterios establecidos en las bases del fondo.

Por otra parte, en Chile, varias instituciones bancarias ofrecen opciones de financiamiento para proyectos relacionados con energías renovables e infraestructuras sostenibles. Estas

alternativas permitirán cubrir el 80% restante de la inversión total del proyecto, complementando el apoyo del Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR). Las condiciones y plazos de estos préstamos suelen estar diseñados para fomentar la transición hacia tecnologías limpias y proyectos sostenibles, proporcionando tasas competitivas y periodos de amortización flexibles.

Los detalles de la inversión y los montos se presentan en la Tabla 6.9, y más detallados en el Anexo I

Tabla 6.9. Detalle del Monto de Inversión

Ítem	Monto de Inversión (\$CLP)
Sistemas de bomba y tuberías	\$23.124.000
Equipos y Maquinarias	\$354.850.000
Instrumentación y Montaje eléctrico	\$42.300.000
Ingeniería del proyecto	\$71.446.580
Activos Intangibles	\$28.200.000
Total	\$519.920.580

Fuente: Elaboración Propia

La cotización de maquinarias y equipos se llevó a cabo a través de plataformas especializadas en la venta de equipos industriales, así como de la empresa “Zorg Biogás”, que ofrece una amplia gama de implementos y servicios en el mercado de biogás.

Se desestima la inversión en obras físicas, ya que se planea utilizar el subterráneo del mercado cardonal, sin embargo, los ajustes y modificaciones a la infraestructura es contabilizada y estimada en el monto de inversión

Por otra parte, se contabilizan los activos intangibles necesarios para el proyecto, entre las permisos sanitarios y certificaciones para vender bonos de carbono que otorgan entidades de validación como “Verified Carbon Standard”, además de estudios técnicos y estructurales.

6.6.2. Ingresos y Ahorros

Los ingresos del proyecto se obtendrán a partir de varias fuentes y estos son detallados en la Tabla 6.10. En primer lugar, se generará un ahorro importante en costos de gas natural mediante la utilización de biogás en el Mercado Cardonal, disminuyendo la dependencia de la red de gas convencional en las cocinas del segundo piso, además de beneficiarse de la producción de energía térmica y la venta de fertilizante y bonos de carbono y se detalla en la Tabla 6.10.

En esta área operan 23 restaurantes de tamaño mediano, cada uno equipado con dos cocinas que consumen entre 3 y 5 Nm³/h de gas natural. Se estima que el consumo mensual total para este conjunto de restaurantes ronda los 900 [Nm³/mes]

Tabla 6.10. Detalle de Ingresos

Producto	Precio	Cantidad/año	Total anual \$ CLP
Energía eléctrica	192 [\$CLP/kWh]	8.447 [kWh/año]	\$1.621.824
Energía térmica	0,125 [\$USD/kWh]	9654 [kWh/año]	\$1.134.345
Ingreso por sustitución de GN	1.412 [\$CLP/Nm ³]	3.578,28 [Nm ³]	\$5.052.531
Fertilizante	63.000 [\$CLP/ton]	1.457 [ton/año]	\$91.540.336
Bonos de Carbono	25 [\$USD/tonCO ₂]	3282,39 [ton/año]	\$77.136.165

Fuente: Elaboración Propia

Los precios de referencia para los productos generados son establecidos por autoridades nacionales; en el caso de la electricidad, estos valores provienen de la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2024). Para la energía térmica, se utiliza el precio del gas natural como base de cálculo, dado que este combustible representa el estándar en el mercado

Además, el digestato, un subproducto rico en nutrientes resultante del proceso de digestión anaeróbica podrá comercializarse como fertilizante orgánico, ofreciendo una alternativa sostenible para el sector agrícola local y agregando valor al sistema de gestión de residuos. Los abonos orgánicos generales, incluyendo derivados del digestato, tienen precios que rondan los \$50.000 a \$120.000 CLP por tonelada dependiendo de su composición y presentación comercial (LEDS, 2020).

Por último, la venta de bonos de carbono contribuirá a los ingresos del proyecto, aprovechando el beneficio ambiental de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. A nivel mundial, el precio promedio de los bonos de carbono en 2024 se sitúa entre 20 y 40 USD por tonelada de CO₂ equivalente, aunque puede variar ampliamente dependiendo del estándar de certificación (Union Europea, 2024)

6.6.3. Egresos

Los costos operacionales de una planta de biogás incluyen varios elementos esenciales: materias primas como sustratos para la digestión anaeróbica, insumos de operación necesarios para optimizar el proceso y el personal contratado que supervisa y mantiene la planta en funcionamiento. Además, es crucial considerar los servicios externos especializados, el mantenimiento preventivo y correctivo de equipos para asegurar su rendimiento, y los gastos generales de planta, que incluyen costos de energía, agua, seguros y permisos detallados en la Tabla 6.11. Estos ítems son fundamentales para la operación eficiente y el cumplimiento de normas del proyecto.

Con respecto a los servicios de energía eléctrica y térmica se considera un 40% y 30% de autoabastecimiento respectivamente para mantener las condiciones de temperatura del proceso.

. Tabla 6.11 Detalle de los Costos

Producto	Precio	Cantidad/año	Total anual \$ CLP
Energía eléctrica	192 [\$CLP/kWh]	3.379 [kWh/año]	\$648.768
Energía térmica	0,125 [\$USD/kWh]	2.896 [kWh/año]	\$340.280
Agua	801,63 [\$CLP/m3]	427,5 [m3/mes]	\$4.112.362
Preparación compost normado	1.650 [\$CLP/ton]	1.457[ton/año]	\$2.416.230
Capital de Trabajo	-	-	\$30.000.000
Mantenimiento	-	-	\$30.000.000
Insumos del Proceso	-	-	\$5.000.000
Programa de Segregación de Residuos	-	-	\$25.000.000

Fuente: Elaboración Propia

Se presenta la necesidad de implementar un plan de segregación de residuos orgánicos en la organización del Mercado Cardonal. Este programa es esencial para optimizar los procesos de digestión anaeróbica y garantizar que los sustratos empleados sean los más adecuados para la generación de biogás. La segregación permitirá clasificar de forma eficiente los residuos, separando aquellos que presentan un alto contenido de materia orgánica de otros desechos no biodegradables. Este programa contempla en sus costos la implementación de capacitaciones y equipo necesario para el correcto desarrollo de este.

6.6.4. Resultado del Flujo de Caja

En el análisis económico del proyecto se emplean dos indicadores clave: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Estos indicadores permiten evaluar la rentabilidad del proyecto, ofreciendo una visión clara sobre su viabilidad financiera.

La depreciación de los equipos y maquinaria es aproximadamente 15 años como lo establece el Servicio de Impuesto Internos (SII), por las condiciones de la infraestructura del mercado no se considerará la depreciación de las obras civiles ni ampliaciones.

6.6.4.1. VAN y TIR

Para evaluar el proyecto, se aplicará una tasa de descuento del 10% anual, que es una referencia comúnmente utilizada en proyectos energéticos. Esta tasa permitirá analizar la viabilidad financiera y comparar los beneficios futuros en términos de valor presente, asegurando consistencia con otras evaluaciones de proyectos similares en el sector energético. Se llevo a cabo el flujo de caja a un periodo de 15 años y un financiamiento del 80% de la inversión inicial con un crédito a 10 años con una tasa de interés del 8%.

En este se incluyen la inversión del proyecto, los ingresos y ahorros mencionados anteriormente, los costos operacionales y el pago de la amortización de la deuda.

Tabla 6.12. Indicadores económicos

VAN	\$34.218.418
TIR	13%
Payback	10,6

Los resultados obtenidos para el proyecto en el caso base son bastante favorables. Tanto el Valor Actual Neto (VAN) como la Tasa Interna de Retorno (TIR) indican un desempeño económico positivo como se logra apreciar en la Tabla 6.12. El VAN es mayor que cero, lo que sugiere que el proyecto generará beneficios netos superiores a los costos y la inversión inicial, y por lo tanto es rentable. Además, la TIR supera el 10%, lo que implica que la tasa de rentabilidad del proyecto está por encima del umbral mínimo que se considera aceptable para la toma de decisiones de inversión

6.6.4.2. Análisis de Sensibilidad

Se presenta un análisis de sensibilidad del proyecto, que consiste en evaluar cómo varía el Valor Actual Neto (VAN) al modificar ciertos factores clave que influyen significativamente en el resultado del proyecto. Este análisis permite identificar los parámetros que tienen mayor impacto en la rentabilidad, ofreciendo una visión más clara de los riesgos asociados y de la respuesta del proyecto ante posibles cambios en condiciones del mercado, a la cual se evaluará la variación en los costos de operación, en la venta de digestato y bonos de carbono.

- Variación en los Costos de Operación

Al variar los costos en un 20% se logra observar la importante diferenciación en el VAN, varando un 316,5% lo que implica la importancia de los costos de operación en la evaluación, ya que un aumento en los costos representa que el proyecto no tiene ninguna viabilidad como se logra divisar en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13. Sensibilidad ante la variación del Costo de Operación

Variación en los Costos de Operación	Monto Anual de Costos de Operación (\$CLP)	VAN	Variación del VAN	TIR
-20%	\$78.014.112	\$142.510.549	316,5%	25%
0	\$97.517.640	\$34.218.418	0%	13%
20%	\$117.021.168	-\$74.073.712	-316,5%	3%

- Variación en el Monto de Inversión

Al igual que los costos de operación, se evaluó la inversión inicial del proyecto que asciende a los \$519.920.580, al variar un 20% en los costos se logra demostrar su significancia, alcanzando una variación del VAN de 261,3% como se demuestra en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14. Sensibilidad ante la variación del Monto de Inversión

Variación en los Costos de Inversión	Inversión Inicial (\$CLP)	VAN	Variación del VAN	TIR
-20%	\$415.936.464	\$123.619.896	261,3%	25%
0	\$519.920.580	\$34.218.418	0%	13%
20%	\$623.904.696	-\$55.183.059	-261,3%	6%

- Variación en la venta de Digestato

El digestato, uno de los principales ingresos del proyecto, muestra una alta sensibilidad en el análisis como se contempla en la Tabla 6.15. Una variación del 20% en sus ventas provoca un cambio de aproximadamente 302 % en el VAN, lo que indica que una disminución en las ventas de este subproducto podría hacer inviable el proyecto.

Tabla 6.15. Sensibilidad ante la variación de las ventas de Digestato

Variación en la Venta de Digestato	Precio de Digestato [\$CLP/ton]	Monto Anual de Ventas de Digestato(\$CLP)	VAN	Variación del VAN	TIR
-20%	50.400	\$73.432.800	-\$66.322.553	-301,9%	4%
0	63.000	\$91.540.336	\$34.218.418	0%	13%
20%	75.600	\$110.149.200	\$137.542.983	301,9%	24%

- Variación en la venta de Bonos de Carbono

Otro de los ingresos anuales principales proviene de la venta de bonos de carbono. Al igual que el digestato, una variación del 20% en su precio por tonelada de CO₂eq tendría un impacto significativo en el VAN del proyecto, afectando directamente su rentabilidad, esto se logra observar en la Tabla 6.16.

Tabla 6.16. Sensibilidad ante la variación de las ventas de Bonos de Carbono

Variación en la Venta de Bonos de Carbono	Precio de Bono de Carbono [USD/tonCO ₂ eq]	Monto Anual de Ventas de Bonos de Carbono (\$CLP)	VAN	Variación del VAN	TIR
-20%	20	\$61.708.932	-\$51.440.337	-250,3%	5%
0	25	\$77.136.165	\$34.218.418	0%	13%
20%	30	\$92.563.398	\$119.877.174	250,3%	22%

7. Discusión

Este estudio permitió identificar el potencial metanogénico y la capacidad de generación de biogás de los residuos disponibles en el Mercado Cardonal de Valparaíso. A través del método de fermentación de frutas y verduras, se evaluó la viabilidad de aprovechar estos sustratos para la producción de energía renovable. Los análisis realizados evidenciaron que las muestras presentaban un alto contenido de materia orgánica, oscilando entre un 85% y 90% en SV, lo que representa un recurso significativo para procesos de valorización energética. En investigaciones previas, como las de García (2016), se destaca la importancia de evaluar la producción de biogás en mercados y centrales de abastos, subrayando la necesidad de maximizar el aprovechamiento de la materia orgánica.

Según los catastros generales de residuos de la región (SUBDERE), alrededor del 70% de los RSDyA generados en la comuna de Valparaíso corresponden a residuos orgánicos. No obstante, en el Mercado Cardonal donde abunda la generación de estas puede presentar porcentajes mayores, en algunos casos llegando hasta un 87,74%, como se observó en un estudio realizado sobre el Mercado Modelo de Satipo, Perú (Condori et al, 2024). Debido a la diversidad y variabilidad en la composición de estos desechos, influenciada por factores estacionales y la dinámica propia del mercado, es esencial realizar una caracterización más precisa. Esto permitirá identificar con mayor exactitud las propiedades y variaciones de los residuos, optimizando su gestión y asegurando que las estrategias de valorización, como la digestión anaeróbica, se diseñen en función de las características específicas del flujo de desechos del mercado.

El trabajo realizado por Gualle (2021), donde evalúa la metanización de los residuos vegetales, determinando un rendimiento máximo de 30,2 [mLCH₄/gSV] en residuos orgánicos de mercados de abastos, muy por sobre encima de lo obtenido en este trabajo donde se alcanzó un máximo de 16,90 [mLCH₄/gSV], sin embargo esto es atribuible a que el sustrato utilizado en el estudio de Gualle (2021) corresponde a residuos frutales, donde en sus resultados de los rendimientos disminuyen a medida que se le incluyen residuos de verduras en la composición de las mezclas, considerando que su relación C:N es menor al de las frutas. Además, teóricamente diversos estudios, como el de Lorenzo y Obaya (2005), señalan que la producción de biogás suele alcanzar valores promedio cercanos a los 250 [mL/gSV]. Este rendimiento es significativamente mayor en comparación con los resultados obtenidos en el presente estudio.

Con respecto al pH del sustrato en el proceso, que se encontraba en un rango de 5.3 a 6.5. Dado que el consorcio metanogénico se desarrolla mejor en un ambiente neutro en rango s de 6,5 a 7,5 como detalla Varnero (2011), es probable que el pH ácido haya afectado la actividad de las bacterias responsables de la producción de metano.

El método de diseño utilizado para los tanques de digestión y el gasómetro es una estimación simplificada, basada en criterios básicos de dimensionamiento, que busca ofrecer una referencia aproximada del tamaño requerido. Sin embargo, Pérez (2010) indica que se requiere de un estudio técnico más profundo y detallado para definir con mayor precisión las especificaciones de estos equipos y otros equipos suplementarios para el proceso, aunque con los resultados obtenidos se permite obtener un tamaño preliminar según las condiciones y dinámica de los residuos.

8. Conclusión

- La caracterización de los residuos orgánicos generados en el mercado demostró una significativa cantidad de desechos biodegradables aproximadamente el 80% de su composición másica, sin embargo, se utilizó el 70% para evaluar condiciones menos favorables, representando un recurso valioso para la producción de biogás a través de digestión anaeróbica. Con un promedio de 4,75 [ton/día] de residuos orgánicos disponible de los cuales en gran parte son descartes de frutas y verduras
- Otro punto con respecto a la caracterización en las fases estacionales y el considerable comercio informal que se genera en el sector que puede generar una importante variación en la composición y cantidad de los residuos orgánicos.
- Los ensayos de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) realizados con las mezclas de residuos seleccionadas mostraron que M2 con alto contenido en azúcares, derivada de residuos frutales, registró un rendimiento superior de 16,90 [mL/gSV] en comparación con las otras combinaciones, por lo que se dimensiono que con la disponibilidad de residuos del mercado se estima una generación 4.036,80 [m³/año] de biogás
- La mezcla M1 presentó un rendimiento de biogás menor en comparación con la muestra control, lo que lleva a concluir que el tiempo de retención hidráulica empleado en el proceso fue insuficiente para permitir una descomposición completa y eficiente de los sustratos o residuos del mercado. Este tiempo inadecuado pudo haber limitado la actividad microbiana necesaria para maximizar la generación de biogás. Además, el pH de las mezclas podría haber influido de manera significativa en esta baja producción, ya que un pH fuera del rango óptimo para la digestión anaeróbica puede afectar negativamente la actividad de las bacterias metanogénicas
- En relación con el diseño del biodigestor, se estima un volumen aproximado de 443 [m³]. Sin embargo, este cálculo es preliminar y simplificado, por lo que, al llevarlo a la práctica, será imprescindible desarrollar modelos más avanzados, respaldados por un análisis técnico detallado y un trabajo de ingeniería más exhaustivo.
- Es crucial realizar un análisis de sensibilidad sobre los principales ingresos proyectados, ya que este permitió evaluar cómo las variaciones en factores clave pueden afectar la rentabilidad y viabilidad del proyecto. A través de este análisis, se pudo identificar aquellos ingresos que tienen un mayor impacto en los resultados financieros, por lo que se analizó la variación en las ventas de digestato y venta de bonos de carbono

- Con respecto a la evaluación económica, el Mercado Cardonal de Valparaíso presenta un potencial significativo para la generación de biogás bajo las condiciones actuales. Esto permite vislumbrar la posibilidad de desarrollar energías eficientes y sostenibles a largo plazo. No obstante, es fundamental maximizar la producción de biogás con el fin de satisfacer las demandas eléctricas y térmicas

8.1. Recomendaciones

- Dada la dinámica del mercado y la gestión actual de los residuos orgánicos, se recomienda implementar planes y estrategias de segregación de residuos. Esto permitirá identificar y seleccionar aquellos residuos de mayor interés, optimizando así el proceso de digestión anaeróbica y maximizando los beneficios del tratamiento.
- Se debe llevar a cabo el pesaje de los camiones de basura que transportan los residuos del Mercado Cardonal al relleno sanitario El Molle. El objetivo es obtener un registro histórico de los pesos, lo que permitirá realizar un dimensionamiento adecuado para la posible instalación de una planta de biogás
- Es fundamental realizar pruebas experimentales adicionales utilizando diversas mezclas y composiciones de residuos vegetales como sustrato que mejoren la relación C:N, con el objetivo de incrementar la cantidad de gas generado en el proceso de digestión anaeróbica. Además, de otros tipos de inóculo, que permitan un mayor agregado de población bacteriana metanogénica
- Dado el alto nivel de acidez de los sustratos provenientes del mercado, se recomienda añadir una mezcla de CaCO_3 con un pH más básico, que actúe como un tampón y ayude a regular el pH del sistema.
- Se recomienda el utilizar un equipo más sofisticado o de mayor exactitud en la medición de biogás, que permita leer las producciones con un menor grado de error

9. Bibliografía

- Arguelles-Castillo. J.A. (2005). Estudio de la hidrólisis enzimática en la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos mediante la digestión anaerobia. Tesis de maestría. Escuela
- Arrieta, W. 2016. Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado.
- Atkinson, B. (1974). Reactores bioquímicos.
- Cantanhede, A., Monge, G., Sandoval Alvarado, L. y Caycho Chumpitaz, C. 2009. Procedimientos estadísticos para los estudios de caracterización de residuos sólidos. Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga
- Chile precios del gas natural, marzo 2024 | *GlobalPetrolPrices.com*. (s. f.). *GlobalPetrolPrices.com*.
- EPA. (2001). Method 1684. Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids. Washington, DC: Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division.
- Gene P. y Owen W. 1986. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. *Journal of Environmental Engineering*
- Gómez X., Cuetos M. J., Moran A., García A. I. (2007). Digestión anaerobia en dos fases: solubilización de las partículas mediante recirculación del digerido
- Gourdon R. Vermande P. (1987). Effect of propionic acid concentration on anaerobic digestion of pig manure
- Gourdon, R., & Vermande, P. (1987). Effects of propionic acid concentration on anaerobic digestion of pig manures. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=7429629>
- Gualle Bermeo, Geovanny Miguel; (2021) Evaluación de la producción de biogás utilizando los residuos orgánicos del Mercado Amazonas de Ibarra mediante digestión anaerobia
- Guevara A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente
- Guevara, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Lima.
- Hilbert, J., Eppel, J. (2007) Desafíos y Estrategias para Implementar la Digestión Anaeróbica en los Agrosistemas.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE (2007): Biomasa: Digestores anaerobios. Madrid, España.

- LEDS. (2020). Análisis técnico-económico de alternativas de gestión de digestato y producción de fertilizantes.
- López G. (1998). Análisis del proceso de digestión anaerobia acelerada para la estabilización de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales. UNAM, Facultad de estudios superiores Zaragoza
- Lorenzo, Y. Obaya, C. (2005). La Digestión Anaerobia, Aspectos Teóricos. Parte 1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA).
- Martí, N. (2006). Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. Florida, USA
- McCarty, P. L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals. Part III: Toxic materials and their control.
- Mejía, C., Mejía, C., & Ramírez, D. (2005). Estudio de factibilidad técnico económico para la implantación de una planta productora de biogás a partir de desechos orgánicos. Universidad de El Salvador
- Ministerio de Energía. (2012). Guía de Planificación para proyectos de Biogás en Chile
- Ministerio de Energía. (2018). Guía para el instalador de plantas de biogás de mediana y gran escala.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (2020) Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos Chile 2014
- Ministerio del Medio Ambiente. (2018). Política Nacional de Residuos 2018-2030.
- Miranda. (2022). Evaluación de la co-digestión anaerobia de residuos orgánicos de feria y fecas de perro mediante el análisis del potencial bioquímico de metano. Universidad Técnica Federico Santa María
- Monago, J., Condori, L., & Ayuque, R. (s. f.). Análisis de la valorización de los residuos orgánicos municipales en el mercado de abastos: "Modelo", ubicada en la Municipalidad Provincial de Satipo, departamento de Junín - Perú. Universidad Continental
- Mosey, F. E. (1983). Mathematical Modelling of the Anaerobic Digestion Process: Regulatory Mechanisms for the Formation of Short-Chain Volatile Acids from Glucose. *Water Science & Technology*, 15(8-9), 209-232. <https://doi.org/10.2166/wst.1983.0168>
- Mundial, B. (2018, 20 septiembre). Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes. World Bank. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>
- Needham. (2015). Estudio de producción de biogás para aprovechar los residuos orgánicos. Universidad Técnica Federico Santa María
- Parkin, G. F. and Owen, W.F. (1986). "Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges
- Pavlostathis, S., & Giraldo-Gomez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: A critical review

- Pérez Medel, J. A. (2010). Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros.
- Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos | Revista ION. (s. f.). <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/5629>
- Pizzoleo, P. J. (2024, 5 abril). Generación eléctrica en base a ERNC llegó al 41% en lo que va de 2024 - Reporte Minero | El portal de minería en Chile. Reporte Minero | el Portal de Minería En Chile. <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2024/04/generacion-electrica-ernc-41-por-ciento-2024>
- Ramos, J. L. (2014). Producción de Biogás a partir de Biomasa de la Microalga Scenedesmus sp. Prodecente de diferentes procesos
- Redagrícola. (2023, 21 abril). Biogás en Chile y el mundo: Tecnología que transforma un costo en beneficio. Redagrícola. <https://redagricola.com/biogas-chile-mundo-tecnologia-transforma-costo-beneficio/>
- Restrepo, J. (2007). Código API 650 y 630: Diseño, montaje y construcción de tanques soldados de acero
- Reyes Aguilera, E. A. (2018). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. Revista Científica Estelí
- Tarifas de Consumo GasValpo. (s. f.). <https://www.gasvalpo.cl/tarifas.aspx?foote>
- University of Wisconsin-Madison. (s. f.). Thermal Properties of Foods.
- Varnero, M. (2011). Manual del Biogás. Santiago de Chile: FAO.
- Varnero, M.T. 1991. Manual de Reciclaje Orgánico y Biogás. Ministerio de Agricultura (FIA) – Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
- Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
- Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
- Verma, S. (2002). Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Columbia University: Master of science degree in earth resources engineering
- Vincent, T. (1997). Digestión anaerobia, bases cinéticas y microbiológicas. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona
- Waste-to-Energy. (2011). Marc J. Rogoff, Francois Screve
- ZORG. (2024). Zorg Biogás GmbH | Catálogo de equipos y materiales. <https://zorg-biogas.com/es/catalogo-de-equipos>

10. Anexos

Anexo A. Encuesta a Administrador del Mercado Cardonal

Los días en que se retiran los residuos son siempre los mismos	SI	X	NO	
Favor he de indicar los días de la semana	Todos los días			
Favor he de indicar que sucede si un día cae festivo	Se retira de la misma forma			
¿En qué rango horario se produce el retiro de residuos?	Entre las 18:00 y 20:00			
En las fechas pick (fiestas patrias, navidad, etc) ¿existe una mayor frecuencia de retiro de residuos?	No, pero si una mayor cantidad de residuos generados			
Los container de disposición de residuos generados por cada puesto son comunes (o sea todos usan el container hasta que se llena) o cada locatario usa un container de su propiedad	Existe un container común que retira el servicio de aseo de la comuna			
¿Podría usted indicar la capacidad (m ³) o dimensiones y forma de los container	Es un container de 15 m3			
¿Existe un catastro de la totalidad de puestos operantes en la actualidad y si existe un registro de los principales productos vendidos?	SI		NO	X

Anexo B. Batea Compactadora de Recolección del Mercado Cardonal



Anexo F. Planilla de Productos para cada locatario del Mercado Cardonal Interior

		Uruguay					Brasil						Rawson																	
		51	52	53	54	55	56	81	82	83	85	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73		
Frutas	Manzana																													
	Pera																													
	Durazno																													
	Kiwis																													
	Limon	■																■						■	■					
	Uvas																													
	Sandía																													
	Cirueta																													
	Cereza																													
	Platano										■							■						■						
	Tuna																													
	Mango																													
	Naranjas										■							■							■					
	Pepino																													
	Mandarinas																													
	Frutillas																													
	Piña																													
Melon																														
Verduras	Aji																													
	Alcachofa	■																												
	Cilantro																													
	Papa																											■		
	Perejil																								■					
	Zanahoria	■																					■		■					
	Lechuga	■																					■		■			■		
	Pepino																							■			■			

Anexo G. Métodos Analíticos

Parámetro	Humedad
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Crisol Cerámica • Balanza analítica • Pinza • Estufa • Desecadora
Procedimiento	a) Colocar una muestra previamente pesada en el crisol b) Insertar la muestra a 105 [°C] en la estufa por 24 hrs c) Sacar de la estufa y dejar enfriar en la desecadora por 4 hrs d) Volver a pesar la Muestra para determinar la cantidad de agua evaporada
Calculo	$\% \text{Humedad} = \frac{(M - m)}{M} * 100$ <p><u>Donde:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - M: Masa inicial de la muestra [g] - m: Masa final de la Muestra [g]

Parámetro	Solidos Totales
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Crisol Cerámico • Estufa • Pinza • Desecadora • Balanza Analítica
Procedimiento	a) Colocar los crisoles de cerámica a utilizar en la estufa a una temperatura de alrededor de 105 [°C] durante un tiempo que se estime conveniente b) Retirar los recipientes con una pinza y dejar enfriar en la desecadora c) Pesar cada recipiente en la balanza analítica y registrar su valor d) Agregar la muestra bien homogenizada a cada recipiente e) Colocar los recipientes en la estufa a 105 [°C] durante 24 hrs. f) Pesar las muestras hasta verificar un peso constante
Calculo	$ST = \frac{W(seco) - W(crisol)}{W(total) - W(crisol)} * 100$ <p><u>Donde:</u></p> <p>ST: Concentración de solidos totales (%masico)</p> <p>Wt: Masa final del recipiente con la muestra antes de secar [g]</p> <p>Ws: Masa de la muestra seca más el crisol [g]</p> <p>Wc: Masa eso del recipiente seco [g]</p>

Parámetro	Sólidos Totales Volátiles
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Crisol Cerámico • Mufla • Desecadora
Procedimiento	<p>a) Colocar el crisol cerámico que contiene los sólidos totales secos en temperatura de 550 [°C] por una hora</p> <p>b) Dejar enfriar en la desecadora</p> <p>c) Pesarse el recipiente hasta obtener un peso constante</p>
Calculo	$STV = \frac{W(total) - W(volatil)}{W(total) - W(crisol)} * 100$ <p><u>Donde:</u> STV: Concentración sólidos totales volátiles (%masico) Wv: Masa de la muestra incinerada más el crisol. [g] Wt: Masa de la muestra antes de incinerar más el crisol [g]</p>

Anexo H. Determinación de las características de las Muestras

Muestra	Parámetro	Calculo
Control o Blanco	Humedad (%)	$\frac{2,536 [g] - 1,045[g]}{2,536 [g]} * 100 = 58,79\%$ $\frac{2,929 [g] - 1,123[g]}{2,929 [g]} * 100 = 61,879\%$
	ST (%)	$\frac{1,045[g]}{2,536 [g]} * 100 = 41,21\%$ $\frac{1,123[g]}{2,929 [g]} * 100 = 38,34$
	STV (%)	$\frac{1,045 - 0,360 [g]}{1,045[g]} * 100 = 65,55\%$ $\frac{1,123 [g] - 0,363 [g]}{1,123 [g]} * 100 = 67,68\%$
M1	Humedad (%)	$\frac{12,194 [g] - 1,660[g]}{12,194 [g]} * 100 = 86,387\%$
	ST (%)	$\frac{1,660 [g]}{12,194 [g]} * 100 = 13,613\%$
	STV (%)	$\frac{1,660 [g] - 0,167 [g]}{1,660 [g]} * 100 = 89,940\%$
M2	Humedad (%)	$\frac{7,331[g] - 1,187[g]}{7,331 [g]} * 100 = 83,808\%$
	ST (%)	$\frac{1,187 [g]}{7,331 [g]} * 100 = 13,613\%$
	STV (%)	$\frac{1,187 [g] - 0,163 [g]}{1,187 [g]} * 100 = 89,940\%$
M3	Humedad (%)	$\frac{7,821[g] - 0,907 [g]}{7,821 [g]} * 100 = 88,403\%$
	ST (%)	$\frac{0,907 [g]}{7,821 [g]} * 100 = 11,597\%$
	STV (%)	$\frac{0,907 [g] - 0,102[g]}{0,907 [g]} * 100 = 88,754 \%$

Anexo I. Detalle de la Inversión

ITEMS	Precio (USD)	Precio \$ Ch	Fuente de Cotización	
Sistema de Bombas y tuberías	\$24.600	\$23.124.000	Alibaba.com	
Bomba de gas	\$3.500	\$3.290.000		
Tuberías	\$5.000	\$4.700.000		
álvula neumática	\$500	\$470.000		
Detector de fugas	\$1.500	\$1.410.000		
Analizador de Gases	\$13.000	\$12.220.000		
Caudalimetro	\$600	\$564.000		
Transmisor de temperatura/presion	\$500	\$470.000		
Equipos y Maquinaria	\$377.500	\$354.850.000	ZORG Biogas	
Digestor	\$100.000	\$94.000.000		
Trituradora	\$40.000	\$37.600.000		
Mezclador	\$4.000	\$3.760.000		
Estanque pre-mezcla	\$3.000	\$2.820.000		
Agitador	\$3.000	\$2.820.000		
Pasteurizador	\$10.000	\$9.400.000		
Gasómetro	\$15.000	\$14.100.000		
Sistema de Calefacción (Intercambiador de Calor)	\$15.000	\$14.100.000		
Desulfuración del Biogás	\$10.000	\$9.400.000		
Torre de absorción CO2	\$8.000	\$7.520.000		
Compresor de Gas	\$8.000	\$7.520.000		
Generador eléctrico de biogás 400 Kw	\$100.000	\$94.000.000		
Antorcha	\$40.000	\$37.600.000	Alibaba.com	
Bomba de fluidos solidos	\$3.000	\$2.820.000		
Enfriador de gas	\$8.000	\$7.520.000		
Secador Rotatorio	\$7.500	\$7.050.000		
Tanque de Digestato	\$3.000	\$2.820.000		
Instrumentación y montaje eléctrico	\$45.000	\$42.300.000		Alibaba.com
Servicio de Programacion y tableros	\$40.000	\$37.600.000		
Sala de Control				
Conexiones eléctricas	\$5.000	\$4.700.000	17% de la Inversión Inicial	
Ingeniería de Proyecto				
Contingencia				
Ingenieria basica y detalle	\$76.007	\$71.446.580		
Activos Intangibles	\$30.000	\$28.200.000		
Certificación de Venta de Bonos de Carbono	\$10.000	\$9.400.000		
Estudio Técnico	\$10.000	\$9.400.000		
Campañas de Marketing (Digestato)	\$5.000	\$4.700.000		
Permisos Sanitarios	\$5.000	\$4.700.000		
Total	\$553.107	\$519.920.580		
*Precio USD: 940 \$CLP Fecha: 15 Octubre 2024				

Anexo J. Depreciación y Amortización de la deuda

- Depreciación

Bienes	Depreciación	Valor Inicial [\$CLP]	Depreciación Anual [\$CLP/año]
Maquinaria y Equipos	15 años	\$354.850.000	\$23.656.667

- Amortización

Tasa de Interés	8%
Tiempo [años]	10 años
Inversión Inicial	\$519.920.580
Financiamiento	80%
Monto Por Financiar	\$415.936.464

TABLA DE AMORTIZACION				
	Saldo Deuda	Cuota	Interés	Amortización
Año 0				\$415.936.464
Año 1	\$415.936.464,00	\$61.986.798,56	\$33.274.917,12	\$28.711.881,44
Año 2	\$387.224.582,56	\$61.986.798,56	\$30.977.966,60	\$31.008.831,96
Año 3	\$356.215.750,60	\$61.986.798,56	\$28.497.260,05	\$33.489.538,51
Año 4	\$322.726.212,09	\$61.986.798,56	\$25.818.096,97	\$36.168.701,59
Año 5	\$286.557.510,50	\$61.986.798,56	\$22.924.600,84	\$39.062.197,72
Año 6	\$247.495.312,78	\$61.986.798,56	\$19.799.625,02	\$42.187.173,54
Año 7	\$205.308.139,24	\$61.986.798,56	\$16.424.651,14	\$45.562.147,42
Año 8	\$159.745.991,82	\$61.986.798,56	\$12.779.679,35	\$49.207.119,21
Año 9	\$110.538.872,60	\$61.986.798,56	\$8.843.109,81	\$53.143.688,75
Año 10	\$57.395.183,85	\$61.986.798,56	\$4.591.614,71	\$57.395.183,85

Anexo K. Monitoreo diario de Biogás

Dia	Blanco [mL]			M1 [mL]			M2 [mL]			M3 [mL]		
	B1	B2	B3	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
1	0,5	0,5	0,5	1,3	2,2	0,5	1,4	0,5	0,4	1,0	2,6	2,8
2	0,4	0,2	0,8	1,8	1,8	2,0	2,0	2,8	1,0	0,5	1,0	1,5
5	0,6	0,7	0,5	2,0	2,5	3,9	2,0	5,3	0,5	1,0	1,0	1,2
6	0,7	0,6	0,6	0,5	1,1	0,5	2,0	4,0	1,5	0,3	0,2	1,0
7	0,8	0,6	0,5	0,5	1,5	0,7	2,1	2,3	3,0	0,5	0,4	1,2
8	0,5	0,8	0,7	0,7	2,1	0,9	2,4	2,4	3,0	0,6	0,8	1,2
9	0,9	1,2	0,6	1,4	3,1	1,0	2,7	2,4	5,2	0,9	1,2	1,5
12	0,9	1,5	0,6	2,1	4,2	3,8	3,1	3,0	3,8	1,7	1,6	1,1
13	1,0	1,0	0,9	2,4	1,5	2,0	2,9	3,2	3,0	1,8	1,7	1,0
14	1,4	1,5	1,0	2,1	1,7	1,7	3,5	3,2	2,8	2,4	1,2	1,7
15	1,1	1,7	1,6	2,1	1,7	1,8	3,9	3,3	2,9	3,3	2,6	2,9
16	2,0	2,3	2,5	3,9	2,5	2,3	5,2	8,4	3,8	3,0	2,9	3,2
19	2,4	2,5	2,6	3,7	3	2,9	7,1	10,5	6,8	3,0	4,5	3,1
20	2,7	2,8	3,1	4,8	4,2	4,8	10,3	11,7	7,1	6,5	6,8	5,2
21	3,0	3,1	3,4	6,8	6,8	6,5	9,7	12,0	8,9	7,8	7,6	6,8
22	3,1	3,3	3,8	8,1	7,9	8,0	10,4	12,1	9,7	8,5	8,1	7,9
23	3,7	3,9	4,3	9,6	9,1	9,4	10,5	12,8	10,4	10,0	9,7	9,8
26	5,0	5,4	5,5	11,4	12	11,8	13,8	15,5	13,0	13,3	12,8	13,9
27	5,7	5,8	6,1	13,1	12,9	12,2	14,6	15,6	13,5	13,2	12,9	13,9
28	4,8	6,0	4,5	8,3	6,4	9,1	8,2	9,5	9,2	7,5	6,2	11,7
29	3,1	2,7	3,7	5,1	6,1	8,9	7,9	6,7	5,1	7,1	5,9	6,8
30	2,9	1,5	2,4	2,2	1,6	1,3	4,3	4,5	5,0	2,2	2,0	3,9
Total	47,0	49,3	50,0	92,5	95,9	96,0	130,0	151,7	119,6	96,1	93,7	103,3
Prom	48,77			94,80			133,77			97,60		

Anexo L. Flujo de Caja

FLUJO DE CAJA										
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ingreso por energía termica		\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345
Ingreso por energía electrica		\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824
Ahorro por Sustitucion de Combustible (+)		\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531
Ingreso por venta de fertilizante(+)		\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336
Venta Bonos de Carbono (+)		\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165
Costos fijos (Operacionales) (-)		-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640
Costos Variables										
Gastos administrativos (-)										
Interés de préstamo		-\$33.274.917	-\$30.977.967	-\$28.497.260	-\$25.818.097	-\$22.924.601	-\$19.799.625	-\$16.424.651	-\$12.779.679	-\$8.843.110
Depreciación		-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667
Amortización intangible		-\$5.640.000	-\$5.640.000	-\$5.640.000	-\$5.640.000	-\$5.640.000				
R' ANTES DE IMPUESTOS		\$16.395.977	\$18.692.928	\$21.173.634	\$23.852.797	\$26.746.293	\$35.511.269	\$38.886.243	\$42.531.215	\$46.467.785
Impuesto (27%)		-\$4.426.914	-\$5.047.090	-\$5.716.881	-\$6.440.255	-\$7.221.499	-\$9.588.043	-\$10.499.286	-\$11.483.428	-\$12.546.302
R' DESPUES DE IMPUESTOS		\$11.969.063	\$13.645.837	\$15.456.753	\$17.412.542	\$19.524.794	\$25.923.227	\$28.386.958	\$31.047.787	\$33.921.483
Depreciación		\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667
Amortización		\$5.640.000	\$5.640.000	\$5.640.000	\$5.640.000	\$5.640.000				
Valor libro										
Inversión inicial	\$519.920.580									
Inversión de reemplazo										
Inversión de ampliación										
Inversión de capital de trabajo										
Préstamo	\$415.936.464									
Amortización de deuda		- 28.711.881,44	- 31.008.831,96	- 33.489.538,51	- 36.168.701,59	- 39.062.197,72	- 42.187.173,54	- 45.562.147,42	- 49.207.119,21	- 53.143.688,75
Valor de desecho (contable comercial)										
Capital de trabajo										
FLUJO DE CAJA	-\$103.984.116	\$12.553.849	\$11.933.672	\$5.623.881	\$4.900.507,15	\$4.119.263,20	\$7.392.719,73	\$6.481.476,78	\$5.497.334,39	\$4.434.461
FLUJO DE CAJA ACUMULADO	-\$103.984.116	-\$91.430.267	-\$79.496.595	-\$73.872.714	-\$68.972.207	-\$64.852.944	-\$57.460.224	-\$50.978.747	-\$45.481.413	-\$41.046.952

10	11	12	13	14	15
\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345	\$1.134.345
\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824	\$1.621.824
\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531	\$5.052.531
\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336	\$91.540.336
\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165	\$77.136.165
-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640	-\$97.517.640
-\$4.591.615					
-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667	-\$23.656.667
\$50.719.280	\$55.310.894	\$55.310.894	\$55.310.894	\$55.310.894	\$55.310.894
-\$13.694.205	-\$14.933.941	-\$14.933.941	-\$14.933.941	-\$14.933.941	-\$14.933.941
\$37.025.074	\$40.376.953	\$40.376.953	\$40.376.953	\$40.376.953	\$40.376.953
\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667	\$23.656.667
- 57.395.183,85					
\$3.286.557	\$64.033.620	\$64.033.620	\$64.033.620	\$64.033.620	\$64.033.620
-\$37.760.395	\$26.273.224	\$90.306.844	\$154.340.463	\$218.374.083	\$282.407.702