



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA REUTILIZACIÓN, VALORIZACIÓN Y
DISPOSICIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

ANDRÉS NICOLÁS CUETO CODORNIÚ

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO OLIVERA NAPPA
RICARDO SCHLATTER BÖHM
PABLO GARRIDO SZEGEDI

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO
POR: ANDRÉS NICOLÁS CUETO CODORNIÚ
FECHA: 13 DE ABRIL DE 2017
PROF. GUÍA: SR. FELIPE DÍAZ ALVARADO

EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA REUTILIZACIÓN, VALORIZACIÓN Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS

En el mundo, la gestión de residuos se ha transformado en un desafío cada vez mayor; debido al crecimiento poblacional y la calidad de vida, cada año se generan más residuos, los cuales generan un gran impacto ambiental y social.

En Chile se generan más de 16 millones de toneladas de residuos al año, de las cuales 6,5 corresponden a residuos sólidos municipales, que a su vez están compuestos en más de un 50 % por residuos orgánicos. Estos residuos son principalmente dispuestos en rellenos sanitarios.

El trabajo tiene por objetivo evaluar, considerando aspectos sociales, ambientales y económicos, tecnologías de reutilización, valorización y disposición de residuos sólidos orgánicos, y entregar una propuesta que resuelva de mejor manera la problemática de los residuos en un contexto particular.

El contexto se enmarca en los residuos de poda y jardinería de la comuna de Santiago, comuna que cuenta con el 5 % de las áreas verdes del Gran Santiago, dónde se estima un caso base de 630.000 [kg] de residuos de poda y jardinería al año.

Considerando el caso base, se definen las tecnologías y sus procesos a evaluar, los cuales son: compostaje en un reactor PFR vertical, biodigestión seca termofílica y gasificación, además de la opción actual en la gestión de residuos, la disposición en un relleno sanitario en las zonas rurales de la Región Metropolitana.

Se realiza una evaluación económica a partir de un flujo de caja para cada proceso. Para ello, se consideran los ingresos por venta de los productos, la inversión en equipos y gastos operacionales en energía y personal, obteniendo un VAN a 15 años de 42,4 [MCLP] para el compostaje, -0,390 para la digestión, -72,8 para la gasificación y -73,4 para el relleno sanitario.

Por otro lado, la evaluación ambiental se basa en los indicadores de emisión de gases de efecto invernadero y uso de agua en el proceso, concluyendo que la tecnología del compostaje tiene los menores impactos relativos, obteniendo los valores mínimos en ambos indicadores con 164 [ton CO₂eq] emitidas y 0 [m³] de agua neta consumida anualmente.

Para la evaluación social se identifican los grupos de interés de los proyectos, que corresponden a los habitantes de la comuna, el municipio, y la empresa de rellenos sanitarios. Se evalúan olores, inseguridad y el rechazo de parte de los interesados, obteniendo que la opción de compostaje es la mejor evaluada con una satisfacción estimada del 77 %.

Los resultados muestran coherencia con la jerarquía estipulada en la ley de residuos, concluyendo que la mejor alternativa para tratar los residuos orgánicos de poda y jardinería es el compostaje en un reactor, recomendando realizar la ingeniería conceptual de esta opción.

*A quienes creen en una sociedad mejor
A quienes trabajan por el presente y el futuro
A quienes construyen por el bien común de todas y todos*

Agradecimientos

A Felipe, mi profesor guía, por permitirme realizar un trabajo de memoria que cumpliera mis expectativas, que fuera un trabajo bajo mis convicciones y mis intereses. A Pablo, Ricardo y Álvaro, por aceptar ser parte de la comisión, por sus comentarios en este proceso y por ser una parte importante en la realización de este trabajo.

A Claudia del Barrio Beauchef e Isabel de la I. Municipalidad de Santiago, por permitirme entrevistarlas y obtener sus opiniones para la realización de este trabajo.

A la OIS, Claudia, Cristi, Maca y Pablo, por acercarme al mundo de la sustentabilidad y permitirme desarrollarme en ese espacio.

A mis compañeras/os de la oficina de ProSus, por aguantarme y compartir ese espacio de forma tan fraterna y amigable.

A mis compañeras/os de las mesas directivas del CEPC 2011, CEI 2013, CEIQBT 2014 y CEIQBT 2016 por enseñarme tanto de mi como de mis capacidades.

A mis compañeras/os de Nueva Izquierda y Convergencia de Izquierdas, por sus consejos, por sus discusiones, por hacerme crecer y seguir luchando.

Al equipo FONGSP/Simbiosis por su felicidad, por su motivación, por hacerme creer que este mundo puede ser mejor.

A mis queridas/os compañeras/os de IQBT, con quienes compartí más de cuatro años, los más relevantes dentro del proceso académico, en especial a aquellos con los que he compartido tanto: Chelo, Ceci, Nati, Pato, Mavri, Mari, Feña, Nico, Javi y particularmente a Auro, compañera, amiga y confidente.

A los curiosos, por tanto cariño, por esas onces, juegos de mesa, risas, llantos y más. Gracias Paty, Rod, David, Tavo, Guaja, Cinto, Pablito, Luz, Cate, Sebita y especialmente a Vale, quien me acompañó y animó los últimos meses de trabajo de esta memoria.

A mi familia, por el amor, la comprensión y el apoyo en estos siete años de carrera.

A todas/os quienes fueron parte de este proceso, compañeros, alumnos, profesores y funcionarios.

Gracias.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Los Residuos	1
1.1.2. Estado de los Residuos Sólidos en Chile	2
1.1.3. Tecnologías de Tratamiento	5
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo General	6
1.2.2. Objetivos Específicos	6
1.3. Alcances	7
2. Metodología	8
3. Caso Base	10
3.1. Materia Prima	10
3.2. Contexto	11
3.3. Cuantificación del Caso Base	12
4. Selección de Tecnologías	14
4.1. Tecnologías Aeróbicas	14
4.1.1. Proceso de Descomposición Aeróbica	14
4.1.2. Factores que Afectan el Proceso de Compostaje	16
4.1.3. Tipos de Tecnologías Aeróbicas	17
4.1.4. Selección de Tecnología Aeróbica	20
4.2. Tecnologías Anaeróbicas	21
4.2.1. Proceso de Digestión Anaeróbica	21
4.2.2. Factores que Afectan el Proceso de Digestión Anaeróbica	22
4.2.3. Tipos de Tecnologías Anaeróbicas	23
4.2.4. Selección de Tecnología Anaeróbica	25
4.3. Tecnologías de Valorización Energética	25
4.3.1. Proceso de Valorización Energética	25
4.3.2. Factores que Afectan el Proceso de Valorización	26
4.3.3. Tipos de Tecnologías de Valorización	27
4.3.4. Selección de Tecnología de Valorización	28
4.4. Tecnologías de Disposición	28
4.4.1. Proceso de Disposición y Caso Actual	28
5. Dimensionamiento de Equipos Principales	31

5.1.	Selección de Equipos Principales	31
5.2.	Dimensionamiento Proceso de Compostaje	31
5.3.	Dimensionamiento Proceso de Digestión Anaeróbica	33
5.4.	Dimensionamiento Proceso de Gasificación	34
5.5.	Dimensionamiento Relleno Sanitario en el Caso Actual	37
6.	Evaluación	38
6.1.	Evaluación Económica	38
6.1.1.	Evaluación Económica del Proceso de Compostaje	38
6.1.2.	Evaluación Económica del Proceso de Digestión Anaeróbica	39
6.1.3.	Evaluación Económica del Proceso de Gasificación	40
6.1.4.	Costos Actuales de Disposición en Relleno Sanitario	40
6.1.5.	Comparación y Discusiones	41
6.2.	Evaluación Ambiental	42
6.2.1.	Evaluación Ambiental Proceso de Compostaje	42
6.2.2.	Evaluación Ambiental Proceso de Digestión Anaeróbica	42
6.2.3.	Evaluación Ambiental Proceso de Gasificación	43
6.2.4.	Impacto Ambiental Actual del Relleno Sanitario	43
6.2.5.	Comparación y Discusiones	43
6.3.	Evaluación Social	44
6.3.1.	Grupos de Interés	45
6.3.2.	Metodología de Evaluación	45
6.3.3.	Olores Producidos	46
6.3.4.	Resultados de la Encuesta	48
6.3.5.	Resultados de la Evaluación	48
6.3.6.	Comparación y Discusiones	49
6.4.	Evaluación General Multicriterio	50
7.	Conclusión	52
	Bibliografía	54
A.	Caso Base	60
A.1.	Estimación del Caso Base	60
A.2.	Estimación Características Físicoquímicas Generales	62
B.	Dimensionamientos	64
B.1.	Dimensionamiento Reactor de Compostaje	64
B.1.1.	Balance de Masa del Reactor de Compostaje	66
B.2.	Dimensionamiento Digestor Anaeróbico	68
B.2.1.	Balance de Masa del Digestor Anaeróbico	69
B.3.	Dimensionamiento Gasificador	71
B.3.1.	Balance de Masa del Gasificador	76
B.4.	Código de Programas	77
B.4.1.	Función EDO Reacción Aeróbica	77
B.4.2.	Función EDO Reacción Anaeróbica	77
B.4.3.	Función EDO Reacción de Valorización	77
B.4.4.	Programa Central de la Simulación	78

C. Evaluaciones	81
C.1. Evaluación Económica	81
C.1.1. Evaluación Económica del Proceso de Compostaje	81
C.1.2. Evaluación Económica del Proceso de Digestión Anaeróbica	87
C.1.3. Evaluación Económica del Proceso de Gasificación	93
C.2. Evaluación Ambiental	98
C.2.1. Evaluación Ambiental del Proceso de Digestión Anaeróbica	98
C.2.2. Evaluación Ambiental del Proceso de Gasificación	98
C.2.3. Evaluación Ambiental del Relleno Sanitario	99
C.3. Evaluación Social	99
C.3.1. Encuesta para Grupos de Interés	99
C.3.2. Olores	99
C.3.3. Resultados de la Encuesta	100
C.3.4. Resultados de la Evaluación Social	102

Índice de Tablas

1.1. Composición en masa de los residuos sólidos municipales del año 2009	4
1.2. Porcentaje de valorización en Chile, desglosado por tipo de residuo	5
3.1. Propiedades fisicoquímicas de los residuos de poda y jardín	11
3.2. Grupos socioeconómicos de la comuna de Santiago	11
3.3. Grupos socioeconómicos del Gran Santiago	11
3.4. Datos técnicos para estimación del caso base	13
3.5. Caso base y características fisicoquímicas generales	13
4.1. Comparación de principales características de tecnologías de compostaje	20
4.2. Comparación de principales características de tecnologías de digestión anaeróbica	25
5.1. Resumen de los dimensionamientos	37
6.1. Resumen principales características económicas del proceso de compostaje	39
6.2. Resumen principales características económicas del proceso de digestión	40
6.3. Resumen principales características económicas del proceso de gasificación	40
6.4. Resumen resultados de la evaluación económica	41
6.5. Resumen resultados de la evaluación ambiental	44
6.6. Parámetros para indicador de olor	48
6.7. Indicadores para aspectos de inseguridad y rechazo	48
6.8. Ponderadores de los aspectos	48
6.9. Resumen indicadores sociales	49
6.10. Resultados de la evaluación social	49
6.11. Resultados por grupo de interés de la evaluación social	49
6.12. Resumen de la evaluación social	50
6.13. Resumen de las evaluaciones	50
6.14. Resultados de la evaluación multicriterio	51
A.1. Datos sobre poda y jardinería de la I. Municipalidad de Santiago	60
A.2. Propiedades fisicoquímicas de ramas, hojas y césped	62
A.3. Características fisicoquímicas generales del caso base	63
B.1. Datos y parámetros para cinética de compostaje	64
B.2. Datos de salida del proceso de compostaje	65
B.3. Resumen del balance de masa en reactor de compostaje	68
B.4. Datos y parámetros para cinética de biodigestión aneróbica seca termofílica	69
B.5. Datos de salida del proceso de digestión seca termofílica	69

B.6. Resumen del balance de masa en reactor de digestión seca termofílica	70
B.7. Productos de la reacción de pirólisis	71
B.8. Productos de la primera reacción de gasificación	72
B.9. Productos de la primera reacción de gasificación	72
B.10. Datos y parámetros para reacciones de gasificación	73
B.11. Composición de los gases del gasificador antes de la simulación	73
B.12. Concentración de los gases del gasificador antes de la simulación	75
B.13. Datos de salida del proceso de gasificación	76
B.14. Resumen del balance de masa en gasificador	76
C.1. Flujo de caja proceso de compostaje del año 0 al año 6	84
C.2. Flujo de caja proceso de compostaje del año 7 al año 13	85
C.3. Flujo de caja proceso de compostaje del año 14 al año 15	86
C.4. Costos de referencia de los equipos para el proceso de digestión anaeróbica .	87
C.5. Flujo de caja proceso de digestión anaeróbica del año 0 al año 6	90
C.6. Flujo de caja proceso de digestión anaeróbica del año 7 al año 13	91
C.7. Flujo de caja proceso de digestión anaeróbica del año 14 al año 15	92
C.8. Características energética de los gases combustibles del Syngas	94
C.9. Flujo de caja proceso de gasificación del año 0 al año 6	95
C.10. Flujo de caja proceso de gasificación del año 7 al año 13	96
C.11. Flujo de caja proceso de gasificación del año 14 al año 15	97
C.12. Parámetros para indicador de olor	100
C.13. Respuestas de la representante de la municipalidad	101
C.14. Respuestas del representante de empresa de relleno sanitario	101
C.15. Respuestas de la representante de los vecinos	101
C.16. Importancia de los aspectos según los interesados	101
C.17. Indicadores para aspectos de inseguridad y rechazo	102
C.18. Ponderadores de los aspectos	102
C.19. Resumen Indicadores Sociales	102
C.20. Resultados de la evaluación social	103
C.21. Ponderadores para representante de la municipalidad	103
C.22. Resultados de la evaluación social según Municipalidad	103
C.23. Ponderadores para representante de empresa de relleno sanitario	103
C.24. Resultados de la evaluación social según empresa de relleno sanitario	104
C.25. Ponderadores para representante de los vecinos	104
C.26. Resultados de la evaluación social según vecinos	104

Índice de Ilustraciones

1.1. Residuos sólidos generados entre los años 2000 y 2009	2
1.2. Residuos sólidos generados por habitante entre los años 2000 y 2009	3
1.3. Estrategia jerárquica en la gestión de residuos	4
4.1. Resumen proceso de compostaje	15
4.2. Diagrama de bloques del compostaje	16
4.3. Esquema compostaje en pila	17
4.4. Esquema compostaje en pila con aireación forzada positiva y negativa	18
4.5. Esquema compostaje en reactor PFR vertical	19
4.6. Esquema compostaje en reactor PFR horizontal	19
4.7. Resumen proceso de digestión anaerobia	21
4.8. Diagrama de bloques de la digestión anaerobia	22
4.9. Diagrama de bloques del proceso de valorización energética	26
4.10. Resumen proceso de disposición	29
4.11. Esquema relleno sanitario	29
4.12. Proceso relleno sanitario	30
5.1. Variación másica en el compostaje en el tiempo	32
5.2. Variación másica en el digestor anaeróbico en el tiempo	34
5.3. Variación molar en el gasificador a través del largo	36
B.1. Diagrama de flujo reactor de compostaje	66
B.2. Diagrama de flujo reactor de digestión seca termofílica	70
B.3. Diagrama de flujo del gasificador	76

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. Los Residuos

Según la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), hoy Ministerio del Medio Ambiente, es posible definir los residuos como una *“sustancia u objeto que: se elimina o valoriza, está destinado a ser eliminado o valorizado, o debe, por las disposiciones de la legislación nacional, ser eliminado o valorizado”* [1]. También la Organización de Naciones Unidas (ONU) define a los residuos como *“materiales que no son productos primarios, a los que su productor no tiene ya más usos que dar en función de sus propios objetivos de producción, transformación o consumo, y que desea eliminar”* [2].

El crecimiento de la población e ingreso per cápita ha provocado una ampliación en el consumo de bienes, generando más residuos cada año [3]. Este escenario provoca una gran preocupación en diversos sectores, a causa de los posibles impactos en la naturaleza. Tales impactos pueden ser [4][5]:

1. En términos atmosféricos, los residuos pueden generar metano y dióxido de carbono por su descomposición además de dioxinas, furanos, sulfuro de hidrógeno, entre otros.
2. Cambios en la geomorfología como modificaciones a las propiedades físicas y químicas de los suelos como la erosión y la acidez, los cuales alteran la fertilidad de la tierra.
3. Alteraciones de la calidad del agua y de las características hidráulicas tanto de aguas superficiales como subterráneas.
4. Cambios en el tipo de flora y fauna de los ecosistemas, así como del total de biomasa presente.

Los residuos se pueden clasificar de diversas formas. Según su estado físico se clasifican como: sólidos, líquidos, gaseosos o pastosos. También se pueden clasificar según su estructura química y origen en [1][6]:

1. Orgánico: Se entiende por residuo orgánico aquel que proviene de un ser vivo, estos pueden ser de origen animal o vegetal.
2. Inertes: Son desechos no biodegradables e incombustibles, generalmente provienen de los procesos de construcción o demolición.
3. Peligrosos: Pueden pertenecer a cualquiera de las dos categorías anteriores, pero que por sus características químicas, físicas o biológicas presentan un riesgo para el medio ambiente o la salud humana.

Por otro lado se pueden clasificar según su procedencia y uso en: agrícolas, forestales, ganaderos, industriales y urbanos o municipales.

Los residuos urbanos, se entienden como los residuos generados por la actividad de la población y sus zonas de influencia. Los residuos urbanos tienen una naturaleza muy variada de las que se pueden encontrar [6]:

1. Gases producto de la incineración de combustibles, por su uso en calefacción y cocina.
2. Aguas residuales, principalmente de los procesos sanitarios domiciliarios.
3. Residuos sólidos de origen doméstico y de los mercados de la alimentación, donde se pueden encontrar: metales, papeles, cartones, vidrios, plásticos y orgánicos entre otros.

1.1.2. Estado de los Residuos Sólidos en Chile

Al igual que en el resto del mundo, en Chile se ha observado un crecimiento en la generación de residuos, en la Figura 1.1 se evidencia este crecimiento entre los años 2000 y 2009 [1].

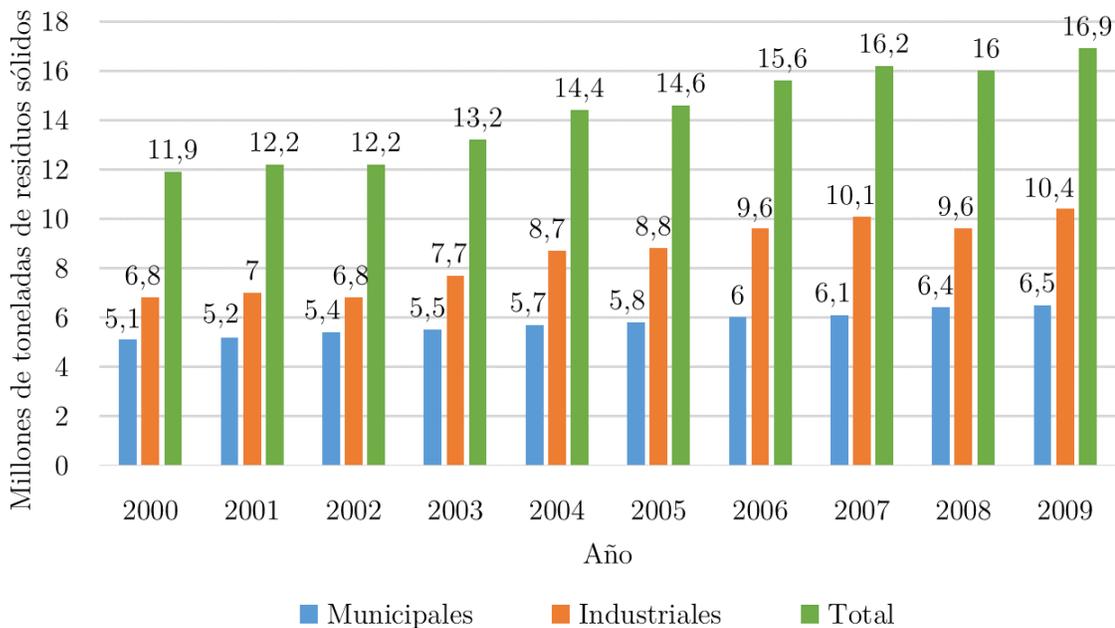


Figura 1.1: Residuos sólidos generados entre los años 2000 y 2009 [1]

Así también se puede observar que para el año 2009 se generaron más de 16 millones de toneladas de residuos sólidos de los cuales un 61,5 % (10,4 millones de toneladas) corresponden a residuos de origen industrial, mientras que el 38,5 % restante (6,5 millones de toneladas) son de origen municipal [1].

Los residuos urbanos en Chile son de exclusiva responsabilidad de los municipios, por lo que estos deben hacerse cargo de su gestión, derivando parte de sus recursos a esta actividad. Debido a los recursos limitados de algunas comunas, en general, éstas presentan dificultades para gestionar sus residuos de manera adecuada o eficiente; otras dificultades que presentan los municipios de gran tamaño, es la logística del transporte de los residuos, problema que comparte con comunas aisladas o con una alta dispersión poblacional. Estas dificultades y la falta de eficiencia en la gestión, permiten la aparición de basurales ilegales, e incumplimientos a las normas sanitarias y ambientales [7].

En Chile, el 2009 se produjeron 6,5 millones de toneladas de residuos sólidos municipales, presentando una tasa de crecimiento de la generación de estos residuos del 2,5 % anual entre los años 2000 y 2009. Esta tasa se debe en parte al crecimiento poblacional y a la mejora de la calidad de vida. En la Figura 1.2 se puede observar un crecimiento de la producción de residuos por persona en el periodo antes mencionado [1].

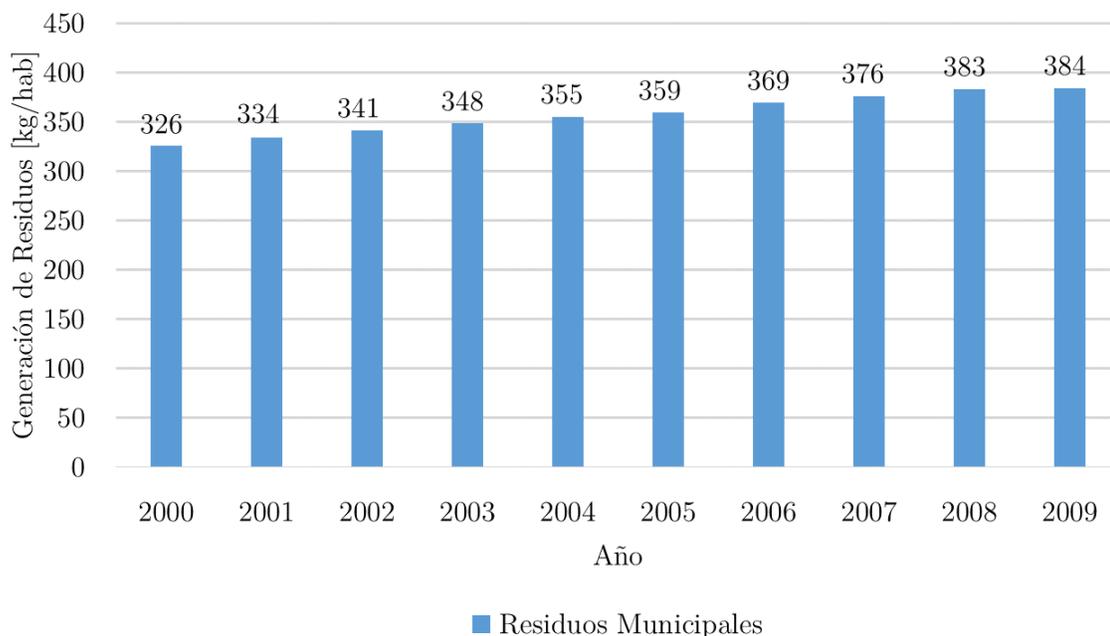


Figura 1.2: Residuos sólidos generados por habitante entre los años 2000 y 2009 [1]

Los residuos municipales generados en el año 2009 fueron entorno a los 6,5 millones de toneladas, que tiene una composición como la presentada en la Tabla 1.1, de la cual es posible destacar que los residuos orgánicos comprenden el 53,3 % [1].

Tabla 1.1: Composición en masa de los residuos sólidos municipales del año 2009 [1]

Tipo de residuo	Composición [%]
Papeles y Cartones	12,4
Textiles	2,00
Plásticos	9,40
Vidrios	6,60
Metales	2,30
Orgánicos	53,3
Otros	14,0

La práctica más común, en términos de gestión de residuos, es la contratación de servicios externos de recolección y disposición final. Los costos de estos servicios son cobrados por la municipalidad a los habitantes de la comuna mediante derechos de aseo [7].

Sin embargo, se ha evidenciado que resolver el problema de los residuos por medio de su disposición final no es suficiente, por lo que se ha vuelto una necesidad redirigir el enfoque en la gestión de residuos municipales [4]. Es por esto que la CONAMA el año 2005 planteó una política de gestión integral de residuos sólidos, que pone como meta lograr un manejo de los residuos con el mínimo riesgo para la salud de las personas y el medio ambiente, asegurando un desarrollo sustentable y eficiente [8].

De esta política se destaca una jerarquización de las actividades a realizar en base a una estrategia en la gestión de los residuos, la cual se ilustra en la Figura 1.3 [8][9]:

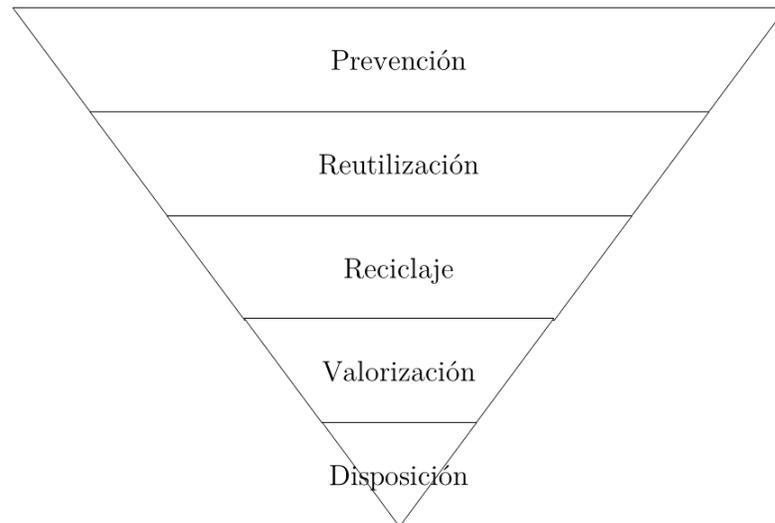


Figura 1.3: Estrategia jerárquica en la gestión de residuos [8]

1. Prevención: Son las medidas o acciones cuyo objetivo es evitar o reducir la generación de residuos o disminuir la concentración de sustancias peligrosas en ellos.
2. Reutilización: Consta del re-uso de un producto o material, sin cambiar su naturaleza original.

3. Reciclaje: Corresponde a la utilización de los residuos como materia prima para procesos productivos.
4. Valorización Energética: Uso del residuo como combustible en un proceso productivo.
5. Eliminación: Disponer en forma definitiva los residuos en lugares habilitados según las normas sanitarias.

En Chile el 54 % de los residuos municipales tienen como destino rellenos sanitarios. Por otro lado, el 36 % están dispuestos en vertederos y basurales, mientras que sólo al rededor del 10 % de los residuos son valorizados [4]. Esta valorización se desglosa según tipo de residuo municipal como se observa en la Tabla 1.2 [1].

Tabla 1.2: Porcentaje de valorización en Chile, desglosado por tipo de residuo [1]

Tipo de residuo	Valorización [%]
Papeles y Cartones	41,0
Plásticos	4,00
Vidrios	29,0
Aluminio	40,0
Orgánicos	10,0
Otros	2,50

Se puede destacar que de los residuos orgánicos generados, sólo el 10 % se valoriza, para lo cual se utilizan principalmente las técnicas de compostaje y lombricultura [1]. Este porcentaje de valorización de residuos orgánicos muestra que aún existen desafíos en esta materia, considerando en más, que son precisamente los residuos de carácter orgánico los que tienen mayor presencia entre los residuos municipales.

1.1.3. Tecnologías de Tratamiento

Actualmente existen diversas formas de tratar los residuos orgánicos, entre las cuales se pueden destacar las siguientes [7][10]:

1. Incineración: Consiste en la oxidación de las materias combustibles presentes en los residuos, a través de temperatura, con el objetivo de generar energía. Para esto generalmente se utilizan hornos. Es común que se agregue otro combustible para facilitar la incineración, el flujo de este combustible dependerá de las características del residuo.
2. Gasificación: Es un proceso térmico que consiste en la oxidación parcial de los residuos, donde éstos se convierten en un gas con un alto poder calorífico, este gas es comúnmente conocido como gas de síntesis o Syngas, el cual es utilizado como combustible.
3. Fermentación: Consiste en la reacción de la materia orgánica con microorganismos anaeróbicos, de la cual se genera biogás y fertilizantes.
4. Compostaje: Es un proceso natural en que se permite la degradación de los residuos orgánicos por acción de microorganismos presentes en la tierra. De este proceso se obtiene el compost.

5. Vermicompostaje: Corresponde a un proceso parecido al compostaje, pero en este caso se adicionan lombrices para la degradación de la materia orgánica. Como resultado se tiene el humus.
6. Relleno sanitario: Técnica de disposición de residuos en el suelo sin causar impactos sobre el medio ambiente y la salud. Para esto se utilizan herramientas de ingeniería para almacenar residuos de manera tal que sean confinados y el impacto ambiental de estos no escape de los límites del relleno sanitario.

1.2. Objetivos

Como se explicó en la sección anterior los residuos están siendo depositados en su mayoría en rellenos sanitarios, aplicando la técnica menos recomendable según la jerarquización, por esto es necesario buscar alternativas de tratamiento de residuos que permita utilizar técnicas más recomendables, en particular con los residuos orgánicos, los cuales comprenden la mayor proporción de residuos que se generan en los municipios.

En base a lo anterior, se plantea realizar una evaluación preliminar de diferentes tecnologías de reutilización, valorización o disposición de residuos orgánicos en un caso particular con el objetivo de mostrar mejores opciones para el tratamiento de los residuos orgánicos a nivel municipal. A continuación, se plantean el objetivo general y los objetivos específicos de éste trabajo.

1.2.1. Objetivo General

Evaluar tecnologías de reutilización, valorización y disposición de residuos sólidos orgánicos, considerando aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Comparar tecnologías disponibles para la reutilización, valorización y disposición de residuos sólidos orgánicos.
2. Definir un caso base de estudio.
3. Decidir las tecnologías a evaluar en función del caso base y la factibilidad técnica.
4. Definir operaciones unitarias involucradas en los procesos técnicamente factibles.
5. Decidir y dimensionar las operaciones unitarias principales de cada tecnología.
6. Evaluar los procesos considerando aspectos sociales, ambientales y económicos, utilizando herramientas de medición comparativa.

1.3. Alcances

Cabe mencionar que el presente trabajo tiene un alcance en función al caso base a determinar, que incluye las propiedades de la materia prima; además del contexto social, económico y ambiental.

Por otro lado el trabajo comprenderá 3 formas de evaluar las tecnologías, las cuales serán aplicadas particularmente sobre las operaciones unitarias relevantes a dimensionar, por lo que se podrían omitir ciertas diferencias entre tecnologías que no estén involucradas en dichas operaciones unitarias.

La evaluación a realizar será preliminar y corresponderá a un estudio que permita comparar las alternativas y proponer una opción para las siguientes etapas de ingeniería.

Capítulo 2

Metodología

La metodología a aplicar en este trabajo se desglosa de la siguiente manera:

1. **Identificación del Caso Base:** El trabajo se enfocará en un contexto particular. Este caso base debe contener tanto características de la materia prima a estudiar, como del contexto económico, social, cultural y medioambiental en cual está inmerso. Esta etapa es fundamental para el desarrollo del trabajo ya que entrega el marco de acción y el alcance del mismo. Para la obtención del caso base se realizará lo siguiente:
 - (a) Identificar tipos de residuos orgánicos que sean segregados en el origen.
 - (b) Cuantificar o estimar la proporción, entre los residuos orgánicos, de los residuos segregados en el origen. Sobre la cuantificación anterior, decidir el tipo de residuo orgánico o mezcla de residuos con el cual trabajar.
 - (c) Seleccionar el contexto en base a la disponibilidad del residuo seleccionado, la existencia de políticas ambientales enfocada en residuos y la distribución socioeconómica.
2. **Selección de Tecnologías:** A partir de las características del residuo orgánico seleccionado como materia prima se escogerán las tecnologías que sean más factibles técnicamente para su tratamiento. Para tomar esta decisión se seguirán los siguientes pasos:
 - (a) Identificar las tecnologías que sean técnicamente factibles con el caso base.
 - (b) Agrupar las tecnologías según el tipo de producto que generan: compost, humus o fertilizantes; combustibles o energía; o simplemente disposición del residuo.
 - (c) Seleccionar una tecnología por grupo, tomando en cuenta las ventajas y desventajas de cada tecnología en el contexto identificado.
3. **Dimensionamiento de Operaciones Unitarias Relevantes:** Se dimensionarán las operaciones unitarias más relevantes de cada proceso que servirán como base para las evaluaciones posteriores. Para ello se realizará lo siguiente:
 - (a) Seleccionar las operaciones unitarias relevantes. Éstas serán las operaciones donde ocurra algún cambio molecular en la materia, es decir, una reacción química.
 - (b) Identificar las cinéticas de las reacciones que sean acordes a las características del caso base.

- (c) Dimensionar, en base al flujo de materia prima a tratar, las operaciones unitarias seleccionadas utilizando herramientas computacionales pertinentes.
4. **Evaluación de Posibilidades:** Se evaluarán económica, ambiental y socialmente las tecnologías seleccionadas, para lo cual se seguirán los siguientes pasos para cada una de las evaluaciones:
- (a) Identificar alcances y principales aspectos a evaluar en consideración a las tecnologías, el contexto y los principales impactos que podrían generar.
 - (b) Seleccionar herramientas de medición que permitan comparar dichas tecnologías, en caso de no existir, se crearán dichas herramientas.
 - (c) Aplicar la evaluación sobre las tecnologías, en particular sobre las operaciones unitarias dimensionadas.
 - (d) Comparar las tecnologías con los resultados de la evaluación.
- Aplicada la metodología para cada tipo de evaluación, se realizará una evaluación multicriterio que integre en un solo resultado la tres evaluaciones anteriores, para lo cual se seguirán los mismos pasos antes expuestos.
5. **Generación de una Propuesta:** En base a los resultados obtenidos de los procesos anteriores se realizará una propuesta sobre qué tecnología sería la mejor alternativa para el tratamiento de los residuos orgánicos en el contexto.

Capítulo 3

Caso Base

3.1. Materia Prima

Los residuos orgánicos corresponden entorno al 53 % de los residuos municipales. Estos generalmente se encuentran mezclados con los demás residuos domiciliarios que se generan, sin embargo, existen algunos tipos de residuos orgánicos que se encuentran segregados desde su origen. Ese es el caso de los residuos de poda y jardinería, y los residuos de ferias libres. Esta característica los hace más llamativos para su reutilización o reciclaje, ya que no son necesarios esfuerzos extra para separarlos de otros tipos de residuos.

En la región Metropolitana se generan aproximadamente 70 toneladas anuales de residuos provenientes de las ferias libres, por otro lado, los residuos de poda y jardín que se generan corresponden a más de 105 mil toneladas anuales en la región. Esto genera un mayor interés sobre los residuos de poda y jardín debido a que corresponden a mil veces los residuos generados por las ferias libres [11][12].

En base a lo anterior se selecciona a los residuos de poda y jardinería como la materia prima a utilizar en este trabajo, tanto por su característica de ser un residuo segregado desde su origen y como por su magnitud, llegando a ser hasta el 9 % de los residuos orgánicos generados en la región Metropolitana [12][13].

Los residuos de poda y jardinería municipal están conformados principalmente por ramas, hojas y césped. Las principales características fisicoquímicas, como densidad, humedad, razón C:N¹ y contenido de cenizas de los residuos de poda y jardinería se encuentran resumidas en la Tabla 3.1.

¹La relación Carbono-Nitrógeno corresponde a un cociente entre el carbono y el nitrógeno presente en el material[10]

Tabla 3.1: Propiedades fisicoquímicas de los residuos de poda y jardín

Propiedad	Ramas	Hojas	Césped	Unidad	Referencia
Densidad sin comprimir	101	101	237	[kg/m ³]	[14]
Relación C:N	55,0	30,0	17,0	[kg C/kg N] en base seca	[15]
Humedad	50,0	50,0	60,0	[%] peso	[16]
Cenizas	3,45	8,92	7,24	[%] peso en base seca	[16]

3.2. Contexto

Con el fin de evaluar este proyecto en un contexto, se ha escogido la comuna de Santiago como el lugar donde se emplace el caso base.

Una de las razones para elegir a la comuna de Santiago es que su Ilustre Municipalidad cuenta hoy con políticas para la gestión de residuos, siendo capaz de reciclar 2.800 toneladas de residuos inorgánicos y 490 de residuos orgánicos en el año 2015 [17].

Esta comuna cuenta con una población de 311.415 personas, las cuales se distribuyen según grupos socioeconómicos como se muestra en la Tabla 3.2 [18].

Tabla 3.2: Grupos socioeconómicos de la comuna de Santiago [19]

Grupo	Proporción [%]
ABC1	10,3
C2	31,3
C3	28,9
D	25,0
E	4,50

En términos generales la comuna de Santiago tiene una proporción que muestra una mayor presencia de los grupos C2 y C3 lo que correspondería a una comuna con una buena situación socioeconómica si se compara con la realida del Gran Santiago que se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Grupos socioeconómicos del Gran Santiago [19]

Grupo	Proporción [%]
ABC1	11,1
C2	19,5
C3	24,9
D	35,6
E	9,00

Los sectores C2 y C3 que corresponden a las clases medias, son quienes tienen un ingreso familiar promedio de 1.000.000 [CLP] y 600.000 [CLP] respectivamente y cuentan con un estilo de vida más modesto sin ostentación. En este sector se encuentran profesionales jóvenes, profesores, empleados públicos y privados sin categorías de alto grado [19].

Dentro del espectro socioeconómico también destaca el sector D (con un 25%), quienes tienen un ingreso familiar promedio de 300.000 [CLP], generalmente con solo una persona como proveedor, además de recibir aportes del estado. Cuentan con niveles de educación que no superan la enseñanza media completa, ejerciendo generalmente como empleados domésticos, aseadores y mensajeros [19].

Otra razón para elegir a Santiago, es porque cuenta con un total de 191 hectáreas de áreas verdes, siendo la séptima comuna con más áreas verdes en el Gran Santiago, lo que además corresponde al 5% del total de áreas verdes de la ciudad, dentro de las cuales se destacan: Parque O'Higgins, Quinta Normal, Parque de los Reyes, Cerro Santa Lucía, Parque Forestal y Parque Almagro [20][21].

Resumiendo, la comuna de Santiago cuenta una superficie de áreas verdes y una gestión de sus residuos que la hace atractiva para un proyecto que utilice residuos de poda y jardinería. Además de contar con un perfil socioeconómico centrado en los estratos medios.

3.3. Cuantificación del Caso Base

Debido a que la ilustre municipalidad no cuenta con los datos exactos de producción de residuos orgánicos de poda y jardinería, se realiza la estimación del caso base a partir del número de camiones que se utilizan para la recolección.

Según informa la Dirección Ornato, Parques y Jardines, para la recolección de los residuos de poda (correspondiente a hojas y ramas) se utilizan 2 camiones de $3/4$ ² diarios durante el periodo de poda, el cual corresponde entre los meses de marzo y septiembre. Con respecto a jardinería, la Ilustre Municipalidad cuenta con contrato con 5 empresas que se encargan de la jardinería y corte del césped, cada empresa utiliza $1/4$ de camión de $3/4$ por ciclo de corte de pasto; estos ciclos son de 1 semana en verano (de noviembre a marzo) y de 2 semanas en invierno (de abril a octubre), es decir, en verano se corta el césped una vez a la semana, mientras que en invierno cada dos semanas. Estos datos y los datos técnicos del camión se detallan en la Tabla 3.4 [22].

²Corresponden a camiones no compactadores capaces de soportar $3/4$ de tonelada

Tabla 3.4: Datos técnicos para estimación del caso base [22][23]

Dato	Valor	Unidad
Volumen Camión	12	[m^3 /camión]
Proporción de ramas en residuos de poda	60	[%] en volumen
Número de camiones poda	2	[camión/día]
Número de camiones jardinería	1/4	[camión/(ciclo-empresa)]
Número de empresas jardinería	5	[empresa]
Número de ciclos de jardinería en verano	4	[ciclos/mes]
Número de ciclos de jardinería en invierno	2	[ciclos/mes]
Meses de poda	7	[mes]
Meses de invierno	7	[mes]
Meses de verano	5	[mes]

En base a los datos de las Tablas 3.1 3.4 se calcula el caso base y sus características fisicoquímicas generales como se muestran en la Tabla 3.5, el detalle del cálculo se puede ver en el Anexo A.

Tabla 3.5: Caso base y características fisicoquímicas generales

Dato	Valor	Unidad
Caso Base	630	[ton/año]
Porción de ramas	48,5	[%] en peso
Porción de hojas	32,3	[%] en peso
Porción de pasto	19,2	[%] en peso
Densidad sin comprimir	167	[kg/m^3]
Relación C:N	39,6	[kg C/kg N]
Humedad	51,9	[%] peso
Cenizas	5,89	[%] peso en base seca

Según informa la CONAMA, el 2009, en la comuna de Santiago se generaron 70.690 toneladas de residuos al año, de los cuales el 53,3 % corresponden a residuos orgánicos, es decir 37.700 toneladas [1]. Se puede observar que el caso base calculado correspondería a sólo el 1,67 % de los residuos orgánicos, algo menor al porcentaje esperado, debido a que a nivel regional el 9 % de los residuos orgánicos corresponden a residuos de poda y jardinería, entonces, se esperaba que los residuos en contexto de la comuna de Santiago contaran con una proporción similar al caso regional, considerando además, que la comuna destaca por la extensión de sus áreas verdes. Así, se puede considerar que el caso base podría estar subestimado.

En Chile, Reciclaje Industriales S.A. (RISA) empresa dedicada al procesamiento de residuos orgánicos, procesa más de 6.000 toneladas de residuos al mes. El caso base calculado corresponde a menos del 1 % de lo que procesa RISA [24].

Capítulo 4

Selección de Tecnologías

En el capítulo anterior se presentó el caso base, el cual corresponde a residuos de poda y jardinería. Para procesar los residuos existen diversas opciones, que deben ser analizadas técnicamente antes de ser evaluadas.

Las opciones de tecnologías para tratar los residuos sólidos orgánicos, de las cuales se pueden obtener diferentes productos, como compost, biogás, syngas, fertilizantes y energía. En función de este trabajo, se definirán 4 grupos de tecnologías a estudiar, entre las cuales se encuentran [7][10]:

1. Tecnologías de descomposición aeróbica:
 - (a) Compost: Es un producto orgánico estabilizado, proveniente del proceso del compostaje, y es utilizado como enmienda orgánica.
 - (b) Humus: Es un producto de similar al compost, pero proveniente del proceso de vermicompostaje.
2. Tecnologías de descomposición anaeróbicas:
 - (a) Biogás: Mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono, que es utilizado como combustible.
 - (b) Bioabono: Producto sólido y orgánico del proceso de biodigestión anaeróbica, el cual tiene características similares al del compost.
3. Tecnologías de valorización energética: producción de combustibles y energía.
4. Tecnologías de disposición: confinamiento permanente de los residuos.

4.1. Tecnologías Aeróbicas

4.1.1. Proceso de Descomposición Aeróbica

La descomposición aeróbica se realiza a través de microorganismos y hongos aeróbicos que descomponen la materia orgánica. Esta descomposición ocurre comunmente en la naturaleza,

pero cuando es llevada a un proceso productivo se le conoce como un proceso de compostaje; dicho proceso está definido en la Norma Chilena 2.880 como un proceso físico, químico y microbiológico cuyo objetivo es la producción de compost. Éste proceso se resume en la Figura 4.1 [25].

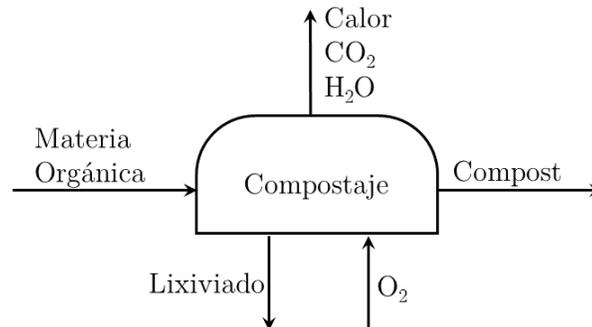


Figura 4.1: Resumen proceso de compostaje [10][26]

El compost, es el principal producto del compostaje y está constituido por partículas finas y oscuras de materia orgánica estabilizada. Es utilizado como fertilizante y enmienda orgánica para fortalecer el suelo para agricultura, silvicultura, mantenimiento de parques y jardines, reforestación, entre otros [7][25].

El proceso del compostaje se realiza en 3 etapas las cuales se representan en el diagrama de bloques de la Figura 4.2 [10]:

1. **Preparación de la Materia Prima:** Esta etapa busca generar cambios en algunas propiedades físicas de la materia prima como el tamaño de partícula, a partir de algún equipo de conminución.
2. **Compostaje Activo:** Es la etapa donde ocurre una rápida descomposición de la materia orgánica, debido a una alta actividad biológica que además tiene la mayor demanda de oxígeno de todo el proceso. Si las condiciones de operación son óptimas, en esta etapa la materia orgánica puede alcanzar una temperatura entre los 55 [°C] y 65 [°C], temperatura a la que se eliminan varios agentes patógenos e inactiva las semillas de hierbas y plantas.
3. **Maduración:** En esta etapa diversos microorganismos degradan estructuras orgánicas más complejas, por lo que es una etapa más lenta que la anterior, alcanza temperaturas más bajas y tiene una menor demanda de oxígeno. De este proceso se obtiene un compost maduro y estabilizado.

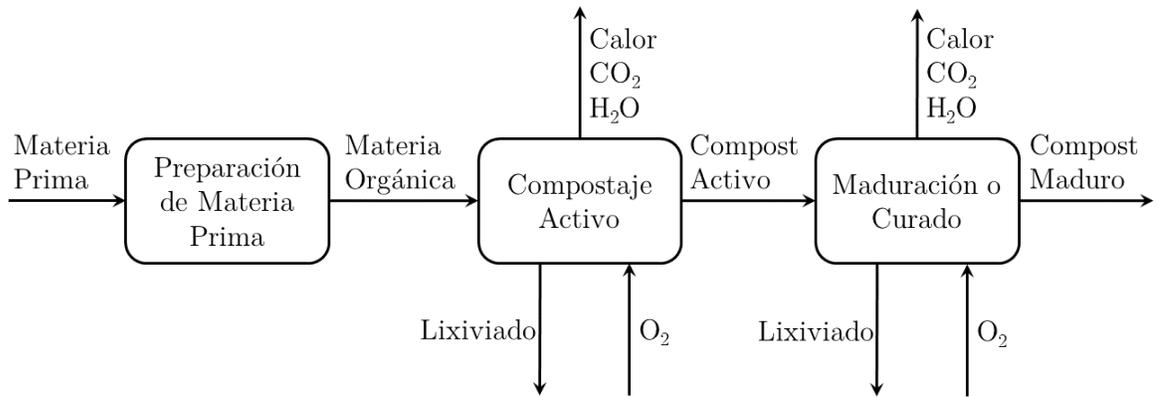


Figura 4.2: Diagrama de bloques del compostaje

4.1.2. Factores que Afectan el Proceso de Compostaje

Existen diversos factores, tanto físicos como químicos que afectan el correcto funcionamiento del proceso de compostaje, particularmente por las condiciones que necesitan los microorganismos para su óptimo desempeño, estos factores son [10][12][26][27]:

1. **Relación Carbono-Nitrógeno:** Tanto el carbono como el nitrógeno son elementos necesarios para funcionamiento y crecimiento de los microorganismos. La relación C:N para un buen proceso debe estar entre los 25:1 a los 40:1, siendo la óptima de aproximadamente 30:1. A mayor ratio la descomposición es más lenta, ya que no hay suficiente nitrógeno para que los microorganismos generen los aminoácidos necesarios; mientras que un menor ratio se generan otros compuestos nitrogenados como amoníaco produciendo malos olores.
2. **Humedad:** Además de los nutrientes, los microorganismos requieren agua, especialmente para asimilar estos nutrientes, por lo que niveles de humedad bajos (menores a 40 %) se dificulta la asimilación, mientras que un exceso de agua (sobre el 70 %) impide la oxigenación dando condiciones anaeróbicas indeseadas. Así, un intervalo adecuado de humedad se encuentra entre 50 % y 70 %.
3. **Aireación u Oxigenación:** La presencia de oxígeno como requisito para que la descomposición sea aeróbica, determina que la aireación sea un factor relevante en el proceso. Existen diversas formas para mantener la materia orgánica oxigenada, las cuales dependen del tipo de tecnología utilizada para el compostaje.
4. **pH:** El pH además de ser un factor que afecta la presencia de ciertos compuestos y microorganismos en la materia orgánica, es además un indicador que permite observar si el proceso se desarrolla correctamente, ya que al principio del compostaje este se encuentra en un rango de pH ácido (entre los 4,5 y 5) mientras que al final del proceso alcanza niveles alcalinos (entre los 8,5 y 9).
5. **Temperatura** La temperatura es un factor que afecta la proliferación y supervivencia de los microorganismos, en particular de los que participan en la generación del compost, los cuales tienen un intervalo óptimo entre los 45°C y los 59°C. A bajas temperaturas los microorganismos no proliferan, por otro lado si la temperatura es superior a los

65°C algunos microorganismos pueden inhibirse o morir, en ambos casos se traduce en que el proceso se ralentice.

6. **Tamaño de partícula** Este factor determina la acción microbiana sobre la materia orgánica, ya que a menor tamaño de partícula se tiene mayor área aumentando la velocidad de la descomposición. Sin embargo, si el tamaño de partícula es muy fino, éste se puede compactar dificultando la aireación. Un tamaño de partícula óptimo es de 2 [cm] aproximadamente.

Con esto, se observa que el caso base descrito en la Tabla 3.5 cumple con todos los requerimientos, tanto de humedad como de de la relación C:N. Sin embargo ésta última se encuentra muy cerca del límite superior recomendado, por lo sería recomendable mezclar los residuos de poda con otros residuos más nitrogenados como los provenientes de ferias libres o disminuir el uso de ramas en el proceso. Pese a esto el proceso es factible técnicamente si se usa el caso base sin alteraciones, por lo que no se descartará este proceso en primera instancia.

4.1.3. Tipos de Tecnologías Aeróbicas

Para la realización del proceso antes descrito, existen diversos métodos y tecnologías, los cuales se describen a continuación:

Compostaje en pila

Corresponde a un sencillo método al aire libre donde se apila la materia orgánica, con una altura y ancho suficiente que permita mantener la temperatura óptima en el interior, donde ocurre el proceso de descomposición [26]. En la Figura 4.3 se esquematiza el proceso de compostaje en una pila.

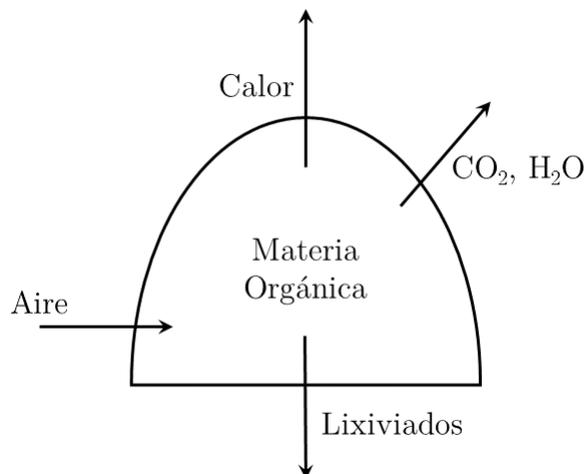


Figura 4.3: Esquema compostaje en pila [10]

La aireación se produce de forma pasiva por difusión del oxígeno al interior de la pila. Para facilitar el proceso de aireación, también se realizan volteos a la pila, para lo cual se pueden usar maquinas o personal con palas, dependiendo del volumen, número de pilas y del espacio donde se esté realizando el proceso de compostaje.

El volteo también cumple un rol homogenizador, ya que al momento del volteo, se mezcla el interior y exterior de la pila, la cuales se encuentran en otras condiciones de temperatura, concentración de oxígeno y conversión de la materia prima.

Existen otros métodos de aireación para las pilas, los cuales son sistemas de aireación activa donde se integran tuberías con perforaciones al interior de la pila por donde puede pasar aire y suministrar oxígeno desde el interior (aireación positiva), o se puede extraer el aire del interior de la pila generando una difusión forzada desde el ambiente al seno de la pila (aireación negativa)[10]. Ambos casos se muestran en la Figura 4.4.

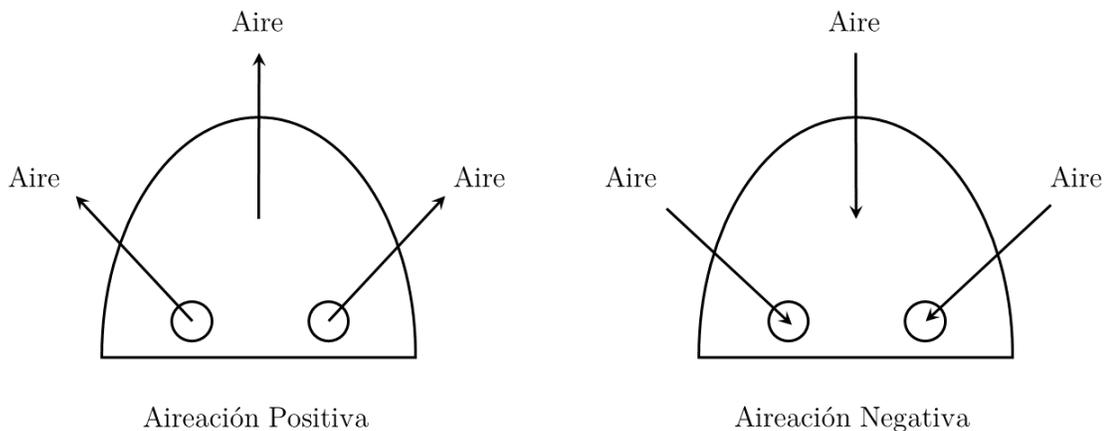


Figura 4.4: Esquema compostaje en pila con aireación forzada positiva y negativa [10]

La aireación forzada permite que el proceso sea más rápido que en el caso del volteo ya que existe un control de la concentración de oxígeno en el interior de la pila.

Los lixiviados generados en el proceso escurren a la tierra o a la superficie donde se encuentre la pila. Por lo general no existe gestión de estos, sin embargo si la pila se encuentra sobre una superficie no terrosa es posible controlar los posibles problemas que puedan generar los lixiviados.

En general la inversión y los costos de operación son bajos debido a que no son necesarias máquinas sofisticadas o específicas, sin embargo, es necesario contar con una superficie extensa para apilar la materia orgánica [10][26].

Compostaje en Reactor

Estas tecnologías son más sofisticadas e involucran un reactor de acero, concreto o fibra de vidrio reforzada y pueden operar en un lugar cerrado. En estos reactores es posible controlar

diversos aspectos del proceso, como la humedad mediante la recirculación de lixiviados y la concentración de oxígeno a través de la aireación. Existen diversos tipos de reactores que pueden realizar el proceso, pero estos se pueden resumir en dos [28]:

1. **Reactor de Flujo Pistón Vertical:** En este reactor se introduce la materia orgánica por la parte superior y va desendiendo con ayuda de la gravedad mientras el compost se retira por la parte inferior del reactor, así mismo la aireación ocurre a contracorriente siendo inyectada desde la parte inferior del reactor, todo esto se esquematiza en la Figura 4.5.

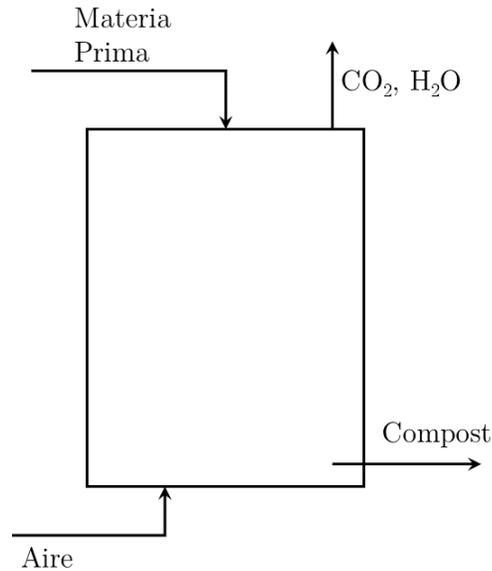


Figura 4.5: Esquema compostaje en reactor PFR vertical [29]

2. **Reactor de Flujo Pistón Horizontal:** En este caso la materia prima entra por un costado del reactor, mientras que por el otro costado sale el compost, la aireación se realiza a través de todo el reactor como se muestra en la Figura 4.6. Además para el movimiento de la materia orgánica se pueden utilizar tornillos sin fin, una cinta transportadora o que el reactor sea del tipo tambor rotatorio.

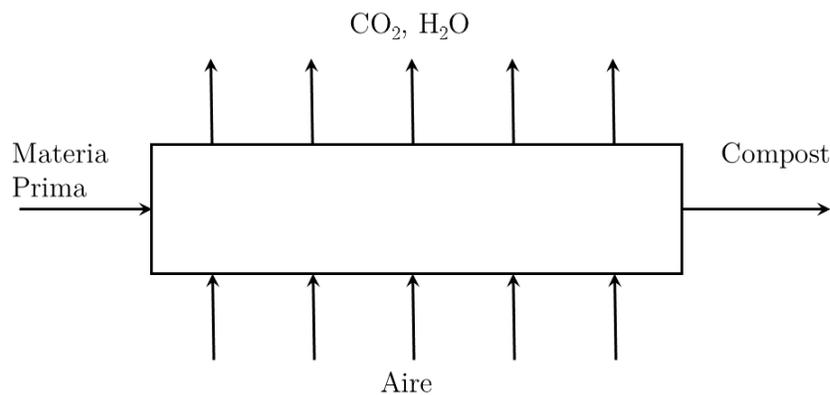


Figura 4.6: Esquema compostaje en reactor PFR horizontal [29]

Estos reactores en general tienen un costo de inversión más alto que el de pilas, por la estructura del reactor, también tienen un costo de operación mayor debido a que es necesario inyectar aire, recircular lixiviados, y en caso de los reactores horizontales es necesario transportar la materia orgánica a través del reactor.

Vermicompostaje

El vermicompostaje es un proceso parecido al del compostaje, pero además de microorganismos se utilizan lombrices, en particular la especie *Eisenia foetida*. De este proceso de descomposición se obtiene como resultado el humus, el cual es más rico en nutrientes que el compost [7].

El proceso se realiza al aire libre en lechos o camas de residuos orgánicos, por lo que es necesaria un área que permita alojar los lechos. Para un correcto funcionamiento es necesario humedecer las camas, así evitar la proliferación de predadores [30].

Para recuperar el humus es necesario separar la tierra de las lombrices, por lo que se utilizan métodos mecánicos para ésta separación como el tamizado.

Los costos de inversión son levemente más altos que los del compostaje en pila, debido a que es necesario construir las camas, además los costos operacionales también son más altos que los del compostaje en pila por el uso de agua y de los mecanismos de separación.

4.1.4. Selección de Tecnología Aeróbica

En base a lo descrito en la sección anterior, se presenta en la Tabla 4.1 un resumen de comparaciones relativas de diferentes características de las tecnologías, en gris se presentan los aspectos deseables en el contexto:

Tabla 4.1: Comparación de principales características de tecnologías de compostaje [7][10]

Característica	Pila	Reactor	Vermicompostaje
Aire libre o Bajo Techo	Aire Libre	Aire libre o Bajo Techo	Aire Libre
Uso de espacio	Alto	Bajo	Alto
Aireación	Pasiva o Activa	Activa	Pasiva
Control de Lixiviados	Nulo o Bajo	Alto	Medio o Alto
Uso de Combustible	Alto	Bajo	Bajo
Uso de Electricidad	Nulo o Bajo	Medio o Alto	Nulo o Bajo
Costos de Inversión	Bajo	Alto	Bajo
Costos de Operación	Bajo	Alto	Medio
Calidad del Compost	Bajo o Medio	Alto	Alto

Como la comuna de Santiago se encuentra en plena ciudad y tiene altos niveles de urbanización, casi no existen terrenos abiertos o de gran extensión para instalar pilas de

compostaje o vermicompostaje, ya que necesitan un área que puede ser hasta 10 veces la necesaria para un reactor [26].

Por otro lado, los reactores si bien tienen un costo más alto de inversión, la calidad del compost también lo es, lo que retribuiría un mayor ingreso por concepto de ventas, además de permitir tener un mayor control de los lixiviados y olores [26][28].

Finalmente se selecciona la tecnología del reactor por las posibilidades de instalación en la comuna y de control de emisiones. Entre los dos reactores posibles, PFR vertical y PFR horizontal, se elige el reactor PFR vertical porque tiene menores costos de operación debido a que no es necesario transportar el material a través del reactor, ya que usa la gravedad para que éste recorra el reactor, a diferencia del reactor PFR horizontal que necesita un tornillo sin fin, una cinta transportadora o un tambor rotatorio.

Cabe destacar que si la comuna en estudio hubiese tenido características menos urbanas la tecnología de compostaje en pilas hubiese sido la más atractiva por su simplicidad sobre todo la variable con aireación forzada, ya que ofrece una mejor calidad del compost.

4.2. Tecnologías Anaeróbicas

4.2.1. Proceso de Digestión Anaeróbica

Este proceso comprende la degradación de materia orgánica por medio de microorganismos que actúan en condiciones anaeróbicas, es decir, en ausencia de oxígeno. Este proceso genera biogás y bioabono como se muestra en la Figura 4.7.

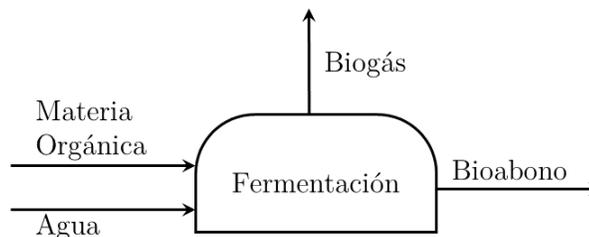


Figura 4.7: Resumen proceso de digestión anaerobia [10][31]

El biogás es una mezcla de gases, principalmente de metano y dióxido de carbono el cual es usado como combustible sustituto del gas natural para la generación de energía. Por otro lado el bioabono corresponde al producto sólido de la descomposición el cual es utilizado como fertilizante como el compost [32].

El proceso de digestión anaeróbica cuenta con 5 etapas, las cuales se presenta en la Figura 4.8 [10][31].

1. **Preparación de la Materia Prima:** Por medio de esta etapa se prepara la materia prima antes del proceso de digestión, esta preparación contempla la conminución de la materia prima y la adición de agua para que las condiciones del proceso siguiente sean las óptimas.
2. **Digestión:** En esta etapa ocurre la descomposición aneróbica de los residuos por acción de los microorganismos y por lo tanto la producción del biogás y el bioabono.
3. **Purificación del Biogás:** En esta etapa se trata el gas que se obtiene de la etapa de digestión para retirar otros gases contaminantes como el ácido sulfhídrico el cual es un gas tóxico para el humano.
4. **Secado del Bioabono:** El bioabono entra a esta etapa con el objetivo de retirar agua para que quede en condiciones para ser utilizado como abono. Esta mezcla posee un contenido de humedad cercano al 50 %.
5. **Generación de energía:** El biogás ya tratado entra a un proceso donde se combustiona con el objetivo de generar energía para auto consumo y para otros requerimientos o su venta.

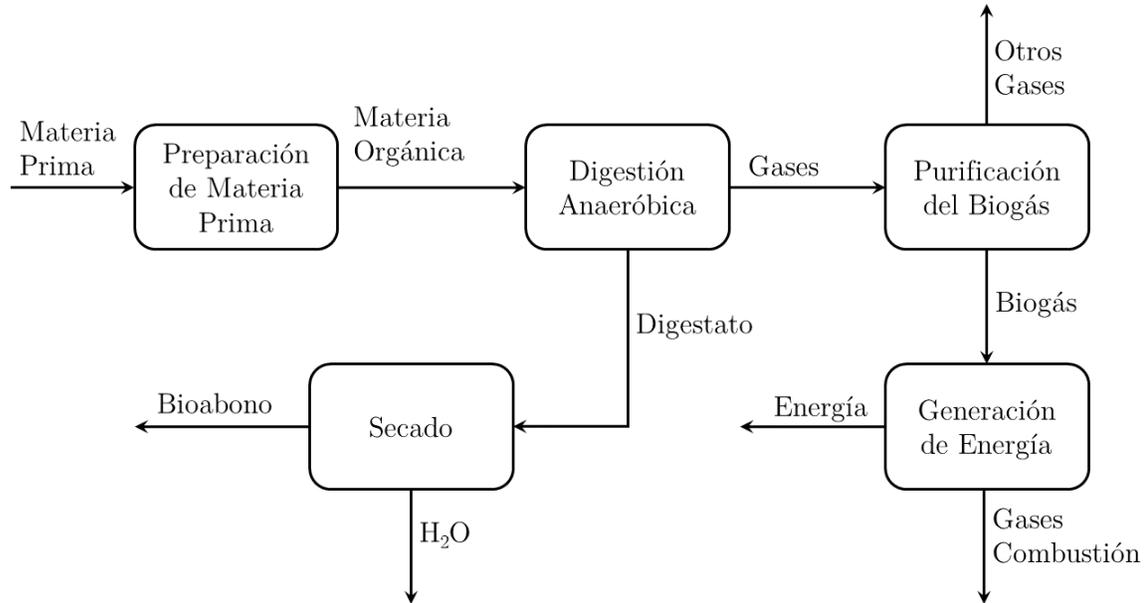


Figura 4.8: Diagrama de bloques de la digestión anaerobia

4.2.2. Factores que Afectan el Proceso de Digestión Anaeróbica

Al igual que en el compostaje, existen diversos factores que pueden alterar el óptimo funcionamiento del proceso de digestión anaeróbica, dentro de los cuales se encuentran [10][31][32][33][34]:

1. **Relación Carbono-Nitrógeno:** Al ser microorganismos los principales actores dentro de este proceso, la relación C:N es relevante para desarrollo microbiano de éstos. La relación C:N óptima para este proceso es de aproximadamente 30:1, sin embargo, el proceso puede ocurrir con ratios entre los 15:1 y 45:1.

2. **Sólidos Totales y Volátiles:** Los sólidos totales (ST) son relevantes en el proceso, ya que determinarán el tipo de reactor a utilizar y el volumen de agua extra a agregar. Si la materia prima tiene más del 80 % de humedad (20 % de sólidos totales) se considera un proceso húmedo, en caso que la humedad esté entre el 80 % y el 60 % se considera semi-húmedo o semi-seco, y bajo el 60 % se considera seco. Los sólidos volátiles (SV) son aquellos que se volatilizan a 600[°C] y son la principal fuente de alimentación de las bacterias y teóricamente productores de metano.
3. **Compuestos Inhibidores:** Existen diversos compuestos inhibidores de la acción de los microorganismos, como el oxígeno, ya que es un elemento mortal para los microorganismos anaeróbicos; otros son sulfuros, sulfatos y nitrógeno amoniacal.
4. **pH:** Si bien cada especie de microorganismo tiene su propio rango de pH óptimo, en este proceso el rango que favorece la reacción está entre los 6,4 y 7,2, valores fuera de este rango afectan negativamente la proliferación y supervivencia de los microorganismos.
5. **Temperatura** La temperatura es un factor que afecta la acción de diferentes agentes. Existen algunos mesofílicos, que soportan temperaturas entre los 15[°C] a 45[°C], y existen otros termofílicos que actúan en un rango entre los 50[°C] y 65[°C]. Cuando se actúan a rangos mesofílicos se necesita menos control de la temperatura ya que es posible operar en condiciones ambientales, pero es un proceso más lento por lo que requiere reactores de mayor volumen; por otro lado, si se opera en rangos termofílicos es necesario un mayor control de la temperatura, lo que implica mayores costos, pero el proceso es más rápido, además es más probable la eliminación de patógenos que puedan afectar la calidad de los productos.

Al igual que en el caso aeróbico, el caso base también cumple con las condiciones necesarias para que este proceso se realice de forma correcta, sin embargo tampoco se encuentra en el óptimo debido a la relación C:N, pero a diferencia del caso aeróbico, no se encuentra tan cerca del límite superior, ya que el proceso anaeróbico cuenta con un rango más amplio en ese sentido.

4.2.3. Tipos de Tecnologías Anaeróbicas

En la sección anterior se explicó que el tipo de reactor a utilizar depende de la concentración de sólidos totales. Estas tecnologías y sus principales características se sintetizan a continuación[10][31][34]:

Biodigestión Húmeda

La humedad de la materia prima no debe ser menor al 20 %, como es el caso de lodos activados, residuos lácteos como sueros o residuos alimentarios como zumos. En la etapa de preparación de la materia prima se debe reducir el tamaño de partícula a valores menores a los 5[cm] de diámetro, además es necesario retirar sólidos suspendidos y sedimentables, justificando la necesidad de un clarificador. Además, se agrega 0,5[m³] de agua por tonelada de residuo.

En la etapa de digestión es común utilizar un reactor CSTR con un tiempo de residencia entre los 14 y 40 días.

El resultado del proceso es un digestato con una humedad entre el 70 % y 90 % por lo que es necesario retirar agua para ocupar el digestato como bioabono; el agua retirada es recirculada a la etapa de preparación de materia prima. Por otro lado el biogás obtenido es capaz de producir entre 110 y 160 [kWh] por tonelada de residuo.

En general los costo de inversión son los más altos por tener el pretratamiento más complejo (la eliminación de sólidos suspendidos y sedimentables) y usar reactores más grandes debido al extra de agua. Sin embargo, al ser líquida la sustancia que entra al reactor, su transporte es más simple.

Biodigestión semiseca

En esta tecnología la humedad del residuo debe estar entre los 60 % y 80 %, como por ejemplo residuos del procesamiento de alimentos. Al igual que en el caso húmedo es necesario reducir el tamaño de partícula a 5 [cm] y agregar 0,1 [m³] de agua por tonelada de residuo.

Es posible operar con reactores de digestión continuos o *Batch* con tiempos de residencia entre los 14 y 30 días.

El digestato producido en el proceso tiene una humedad entre el 70 % y 90 % por lo que también se necesita retirar agua, la cual también es recirculada como en caso húmedo. El biogás producido es capaz de entregar entre 145 y 220 [kWh] por tonelada de residuo.

Generalmente los costos de inversión no son tan altos como el caso húmedo, pero usa reactores más grandes que en el caso seco, además la materia prima pretratada se comporta como un fluido, simplificando la operación en comparación con el proceso seco.

Biodigestión seca

En este caso la materia prima debe tener una humedad menor al 60 % como los residuos de jardinería. La materia prima debe tener un tamaño de partícula menor a 20 [cm] y se agrega sólo 0,05 [m³] de agua por tonelada de materia prima.

En general se usan reactores tipo *Batch*, pero también se han usado reactores PFR para esta operación, los reactores CSTR nos son convenientes ya que por el porcentaje de humedad la materia prima es pastosa o sólida por lo que los equipos de agitación no son efectivos. Tiene un tiempo de residencia entre los 14 y 30 días.

El digestato producido tiene entre un 50 % y 60 % de humedad por lo que no siempre es necesario retirar agua. El biogás que se genera puede producir entre 170 y 250 [kWh] por tonelada de residuo.

Los costos de inversión son los más bajos entre los tres, pero la operación es más compleja debido a que es necesario mover un sólido dentro del reactor.

4.2.4. Selección de Tecnología Anaeróbica

En la tabla 4.2 se ve un resumen comparativo de las tres opciones de digestión anaeróbica. En gris se encuentran los aspectos deseables para el contexto y la materia prima.

Tabla 4.2: Comparación de principales características de tecnologías de digestión anaeróbica [10]

Característica	Húmeda	Semiseca	Seca
Humedad del Digestato	>80 %	80 % - 60 %	<60 %
Pretratamiento	Alto	Bajo	Bajo
Postratamiento de bioabono	Alto	Medio	Bajo
Uso de agua	0,5 [m ³ /ton]	0,1 [m ³ /ton]	0,05 [m ³ /ton]
Energía producida	110 - 160 [kWh/ton]	145 - 220 [kWh/ton]	170 - 250 [kWh/ton]

Como el caso base corresponde a residuos de poda y jardinería, su humedad es menor al 60 %, por lo que se considera un sistema seco. Entonces, es necesario elegir entre un proceso continuo (PFR) o *Batch*.

Un reactor PFR tiene la ventaja que el flujo final es continuo durante todo el proceso, en cambio en el caso del reactor *Batch* la producción de metano es discontinua en el tiempo, presentando máximos cuando la actividad microbiana es más alta. Así, se elige un proceso continuo usando un reactor PFR.

Por otro lado, es necesario determinar si el proceso será mesofílico o termofílico. Como se explicó anteriormente un proceso termofílico es más rápido que el mesofílico y por lo tanto utiliza reactores más pequeños, pero necesita de la aplicación de calor al sistema para alcanzar la temperatura necesaria. Tomando en cuenta las restricciones de espacio presentes en la comuna, se prefiere un proceso termofílico que además proporciona un bioabono pasteurizado.

Así, la tecnología a usar será de un reactor PFR para un sistema seco termofílico.

4.3. Tecnologías de Valorización Energética

4.3.1. Proceso de Valorización Energética

Entre los procesos de valorización energética se pueden destacar dos, la incineración y la gasificación, ambos tienen por misión transformar la materia orgánica en energía calórica o eléctrica mediante reacciones termoquímicas.

En particular, la incineración tiene como objetivo producir calor, energía eléctrica, gases de combustión y cenizas, mientras que la gasificación tiene el propósito de transformar los compuestos orgánicos en Syngas o gas de síntesis, una mezcla combustible de gases, compuesto principalmente de hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono.

En la Figura 4.9 se observa el proceso de valorización energética que se describe a continuación[35][36]:

1. **Pretratamiento de la materia prima:** Consiste eliminar el agua de la materia prima, con el objetivo controlar la humedad de entrada al y disminuir el tamaño de partícula de la materia prima para que el proceso sea más eficiente, evitando usar calor para evaporar agua dentro de la etapa de valorización y tener una mayor área de contacto.
2. **Valorización** En esta etapa ocurren las reacciones termoquímicas de la pirólisis, gasificación y oxidación de los compuestos orgánicos produciendo energía térmica y gases. Los gases producidos y su proporción dependerá del tipo de tecnología a utilizar.
3. **Tratamiento de gases:** Los gases arrastran material particulado que debe ser retirado de los gases para evitar la contaminación ambiental y cumplir con las normativas vigentes, además de evitar la abrasión de los equipos siguientes.
4. **Generación de Energía:** El objetivo es producir energía a partir de los gases producidos.

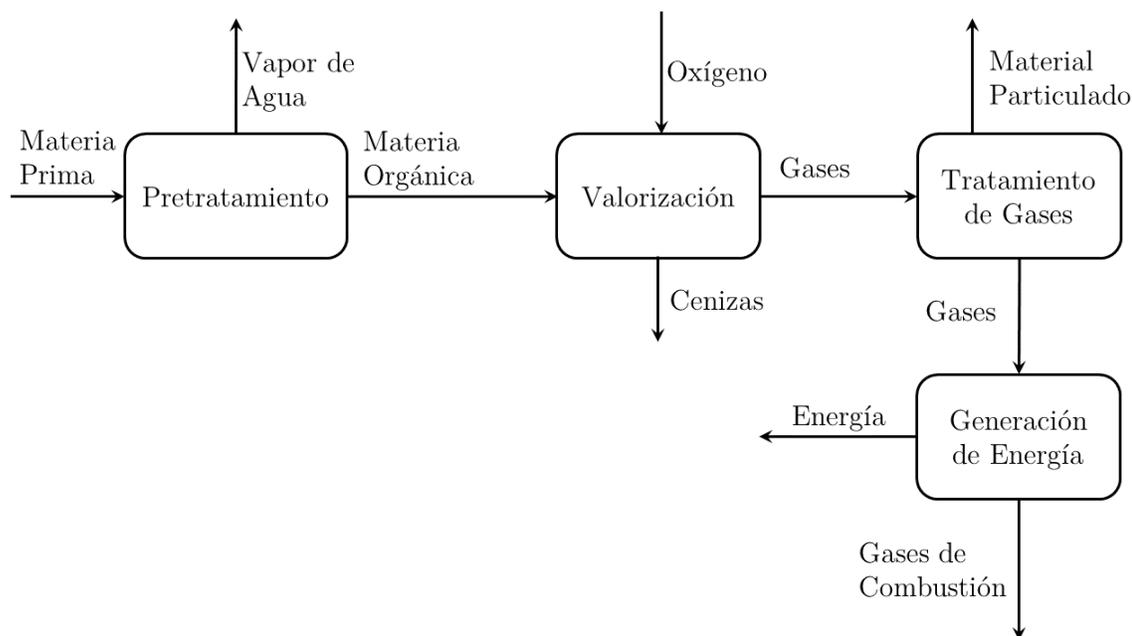


Figura 4.9: Diagrama de bloques del proceso de valorización energética

4.3.2. Factores que Afectan el Proceso de Valorización

El principal factor que afectan el correcto funcionamiento del proceso de valorización es la concentración de oxígeno. Por ejemplo, para el caso de la incineración se necesita oxígeno

en exceso para evitar la generación de monóxido de carbono, mientras que para el caso de la gasificación se utiliza un déficit de oxígeno que para favorecer la producción de hidrógeno.

4.3.3. Tipos de Tecnologías de Valorización

Inicineración

En la incineración ocurren simultáneamente tanto las reacciones de pirólisis, gasificación y oxidación de los residuos mediante temperatura y presencia de oxígeno. La temperatura necesaria está entre los $800[^\circ\text{C}]$ y $1.450[^\circ\text{C}]$. La Ecuación 4.1 es la reacción de combustión que resume lo que ocurre dentro del incinerador, el porcentaje de monóxido de carbono que se genere dependerá de lo completa que sea la combustión [35].

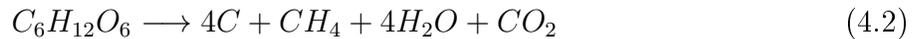


La etapa de generación eléctrica se hace principalmente a través de turbinas que en conjunto con un generador producen energía eléctrica mediante el uso del vapor de agua, que fue generado al calentar agua con la energía producida en el equipo de incineración.

Gasificación

En la gasificación ocurren principalmente las reacciones de pirólisis y gasificación a lo largo del reactor, estas ocurren con un déficit de oxígeno, por lo que es necesario tener un control preciso de la inyección de este componente.

La reacción 4.2 corresponde a la pirólisis de los compuestos orgánicos, mientras que las reacciones de las Ecuaciones 4.3 a la 4.10 son las que están involucradas en la gasificación [36][37]:





Cabe destacar que estas reacciones corresponden a una simplificación. Por ejemplo, las reacciones 4.3 a 4.5 podrían involucrar otros componentes de mayor peso molecular en reacciones análogas. Sin embargo, este conjunto de ecuaciones es muy utilizado, pues representa muchas ecuaciones que se parecen entre sí, pero con especies orgánicas de distinto peso molecular.

El Syngas puede generar electricidad mediante un ciclo combinado o la utilización de celdas combustibles. En el ciclo combinado termina de ocurrir la combustión del hidrógeno y monóxido de carbono generando agua y dióxido de carbono (Reacciones 4.7 y 4.8) [36].

4.3.4. Selección de Tecnología de Valorización

La incineración es un proceso más simple que el de la gasificación, lo que involucra menores gastos de inversión y operacionales. Sin embargo, la incineración de residuos sólidos es menos controlable, pues es más propensa a la generación de monóxido de carbono ya que el oxígeno puede no difundir correctamente dentro del sólido, lo que implica una ineficiencia en la generación de energía, derivando en contaminación atmosférica por CO.

Considerando que el contexto corresponde a una comuna urbana con una gran población flotante, la expulsión a la atmósfera de monóxido podría involucrar un daño severo a la salud a la población cercana, por lo que se elige la gasificación como tecnología de valorización para ser evaluada.

4.4. Tecnologías de Disposición

4.4.1. Proceso de Disposición y Caso Actual

La disposición corresponde al almacenamiento de los residuos de forma definitiva en algún sector geográfico. En general el proceso es simple y corresponde a una única etapa de disponer y almacenar residuos. En el lugar de la disposición los residuos orgánicos se descomponen generando gases como dióxido de carbono y metano, por otro lado se generan lixiviados como se muestra en la Figura 4.10 [4] [38].

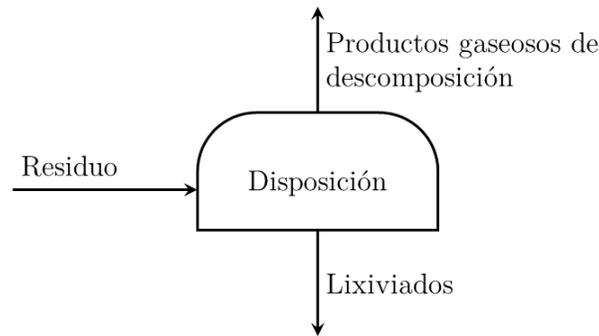


Figura 4.10: Resumen proceso de disposición

La tecnología utilizada para la disposición es la del relleno sanitario, el cual es una obra de ingeniería donde se depositan los residuos en celdas, superficies impermeabilizadas que evitan que los lixiviados se permean al suelo y puedan eventualmente contaminar a éste o napas subterráneas. Luego que los residuos son depositados en el relleno sanitario, éstos son compactados para reducir volumen utilizado, y finalmente son cubiertos con capas de tierra, con un espesor mínimo. Las características de construcción de las celdas deben cumplir con estándares exigidos en el D.S. 148 [39].

Al cubrir los residuos con tierra, se dan las condiciones para una descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, provocando la generación de biogás dentro de relleno, el cual necesita ser liberado para que no se generen presiones que puedan ocasionar problemas de seguridad, por lo que se construyen redes de desgasificación, con pozos y tuberías que permiten extraer el biogás generado, para su posterior quema o utilización para producir energía.

Por otro lado, los lixiviados son recuperados y llevados a una piscina de almacenamiento para ser acumulados y tratados. Los lodos por su parte, son llevados a un monorelleno para su disposición. En la Figura 4.11 se observa lo que ocurre en un relleno sanitario.

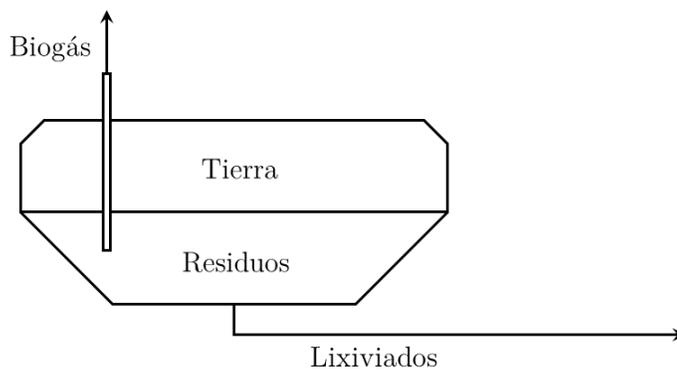


Figura 4.11: Esquema relleno sanitario

Actualmente la comuna de Santiago envía sus residuos al relleno sanitario Loma Los Colorados en Til Til, propiedad de la empresa KDM S.A. [22][40].

Particularmente, en Loma Los Colorados se recupera parte del biogás que se genera dentro del relleno sanitario para la producción de energía eléctrica [41][42]. El proceso completo se muestra en la Figura 4.12.

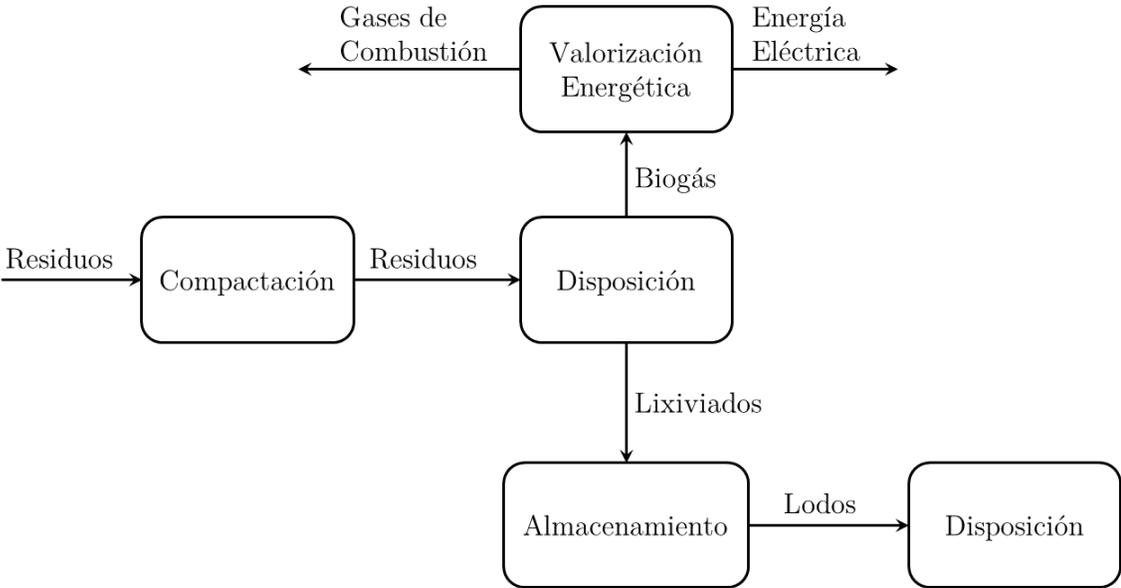


Figura 4.12: Proceso relleno sanitario

Capítulo 5

Dimensionamiento de Equipos Principales

5.1. Selección de Equipos Principales

La selección de los equipos a dimensionar será en base a aquellos equipos donde ocurra un cambio a nivel molecular, es decir, una reacción. Estos equipos son: el reactor PFR vertical en el caso del compostaje, el digester anaeróbico seco para el caso de la tecnología anaeróbica y el gasificador para la valorización energética. Además se estimará el volumen que ocupa el caso base en un relleno sanitario.

5.2. Dimensionamiento Proceso de Compostaje

Para el dimensionamiento del reactor vertical se realizaron los siguientes supuestos:

1. El reactor funciona como un PFR ideal.
2. No existe acumulación en el reactor.
3. La fracción orgánica de los residuos se considerará como celulosa, uno de los compuestos más abundantes en los residuos de poda y jardín.
4. El conjunto de reacciones que ocurren en el compostaje que conllevan se resumen en una única reacción que se muestra en la Ecuación 5.1.



La cinética que de variación de la materia orgánica se puede representar por la Ecuación 5.2 [43]:

$$-r = -k \cdot \frac{1,066^T}{46,28} \cdot (m(t) - \beta \cdot m_0) \quad (5.2)$$

Donde:

r : Velocidad de reacción en [kg/día]

k : Constante cinética en [1/día]

T : Temperatura en [°C]

$m(t)$: Masa en base seca del compost en el tiempo t [kg]

m_0 : Masa en base seca de la materia prima [kg]

t : Tiempo [día]

β :Factor de equilibrio del compost [kg/kg]

En base a lo anterior se realiza una simulación en el programa computacional MatLab[®] considerando el caso base, obteniendo cambios en la composición sintetizados en la Figura 5.1. Para el dimensionamiento se considerará que el reactor operará hasta que haya alcanzado un 95 % del estado estacionario, obteniendo así, un tiempo de operación de aproximadamente 16,5 días. El detalle de los cálculos se encuentran en el Anexo B.1 y el código utilizado en el Anexo B.4.

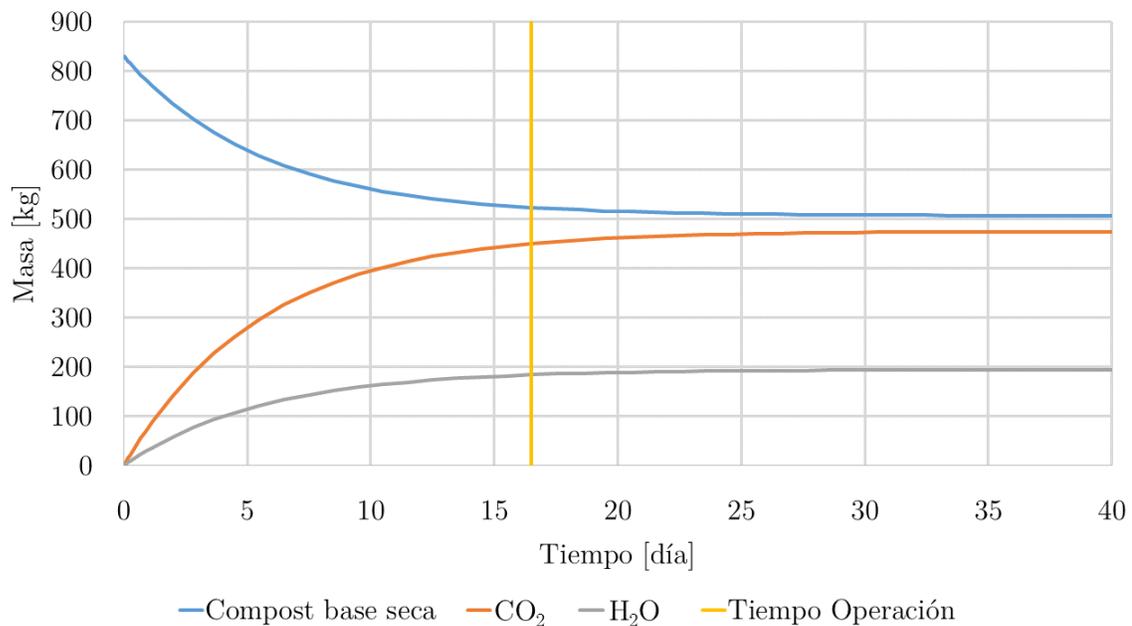


Figura 5.1: Variación másica en el compostaje en el tiempo

Considerando los 16,5 días como tiempo de residencia, se dimensiona el volumen del reactor PFR usando la expresión descrita en la Ecuación 5.3 [44]. Obteniendo un volumen de reactor de 95,7 m³.

$$\frac{V}{F} = \tau \quad (5.3)$$

Donde:

V : Volumen del Reactor [m^3]

F : Flujo volumétrico de entrada [$\text{m}^3/\text{día}$]

τ : tiempo de residencia [día]

Los resultados obtenidos respecto al tiempo son cercanos a lo esperado, ya que el tiempo estimado del compostaje en reactores es de dos semanas (14 días) [43]. Respecto al volumen del reactor, éste puede estar sobreestimado, ya que durante el proceso de compostaje la materia orgánica disminuye su masa dentro del reactor, como se ve en el gráfico de la Figura 5.1. Además la densidad del compost es mayor que la de la materia orgánica, por lo que existe una variación de volumen dentro del reactor que no fue considerada [14][25].

5.3. Dimensionamiento Proceso de Digestión Anaeróbica

En esta ocasión, los supuestos para el dimensionamiento del biodigestor anaeróbico seco son los siguientes:

1. El reactor funciona como un PFR ideal.
2. No existe acumulación en el reactor.
3. La fracción orgánica de los residuos se considerará como celulosa.
4. Los productos gaseosos serán metano y monóxido de carbono en una razón volumétrica de 2,3:1 [45].
5. El bioabono corresponde a los residuos que no se transforman en metano y monóxido de carbono.

La cinética de la variación de sustrato en la biodigestión termofílica se puede representar por la Ecuación 5.4 [46]:

$$-r = -\mu_{m\acute{a}x} \cdot (S_t - \alpha \cdot S_0) \quad (5.4)$$

Donde:

r : Velocidad de reacción en [$\text{kg}/\text{día}$].

$\mu_{m\acute{a}x}$: la velocidad máxima de crecimiento de microorganismos [$1/\text{día}$].

S_t : Sustrato en el tiempo t [kg].

S_0 : Sustrato inicial [kg].

α : Factor de no-biodegradabilidad [kg/kg].

Análogamente al caso del compostaje se simula la cinética como se muestra en la Figura 5.2. Obteniendo un tiempo de operación para el 95% de la generación de metano en estado estacionario de 16 días. Cabe destacar que esta simulación corresponde a la sección completamente anaeróbica del proceso. Según la literatura [33], antes de que ocurra esta etapa

existe una sección donde se consume el oxígeno que viene junto a la materia prima, además del tiempo de activación de los microorganismos, este tiempo se estima en 2 días, resultando un tiempo de operación total es de 18 días [47]. El detalle de los cálculos se encuentran en el Anexo B.2 y el código utilizado en el Anexo B.4.

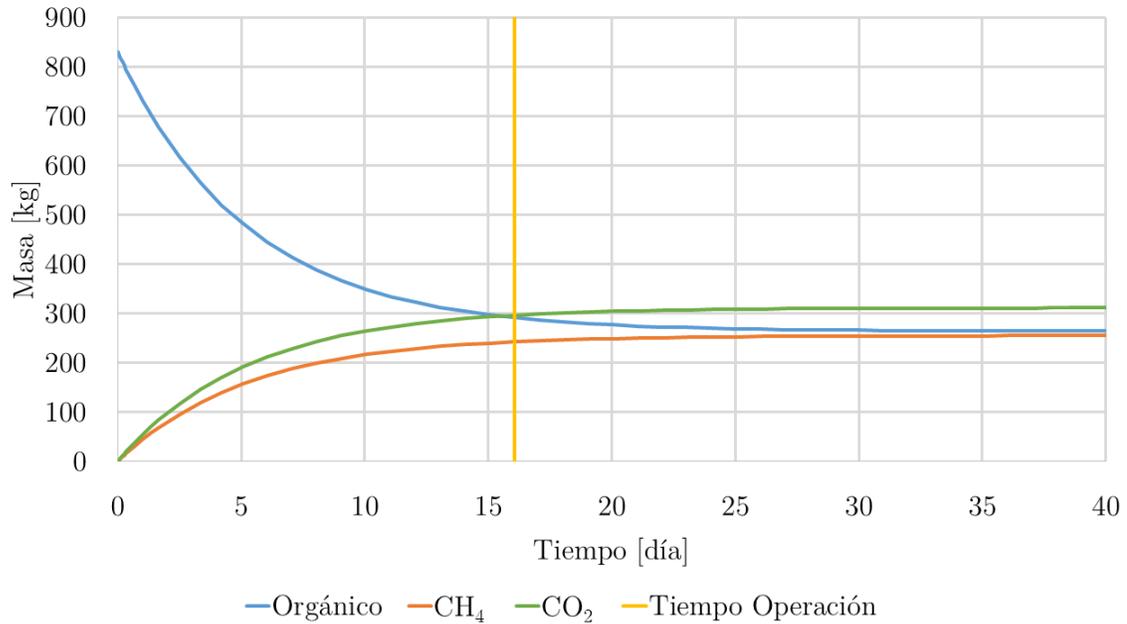


Figura 5.2: Variación másica en el digestor anaeróbico en el tiempo

Así, con el tiempo de operación y los datos del caso base se calcula el volumen del reactor PFR usando la Ecuación 5.3 obteniendo un volumen de 110 [m³].

El resultado obtenido respecto a los días de operación es menor a los registrados en la literatura, puesto que estos superan los 21 días, pero esto podría deberse a que la mayor parte de la literatura es sobre digestores húmedos o semi-secos, los cuales tienen un proceso más lento [10][31][32].

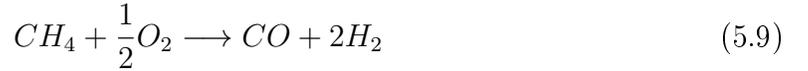
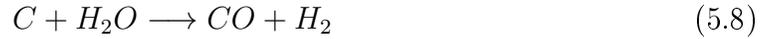
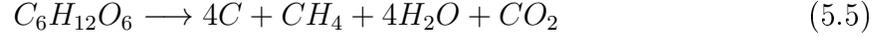
Para el caso del volumen también es un resultado menor a lo esperado, pero esto se puede deber a las mismas razones antes expuestas para el caso del tiempo de operación.

5.4. Dimensionamiento Proceso de Gasificación

Los supuestos para el dimensionamiento del gasificador son:

1. El reactor funciona como un PFR ideal.
2. No existe acumulación en el reactor.
3. La fracción orgánica de los residuos se considerará como celulosa.
4. De las reacciones que ocurren en el gasificador, se considerarán las reacciones 5.5 5.6 5.11 5.12 5.13, esto se debe a que la reacción de pirólisis (5.5) ocurre antes que las de

gasificación en el reactor. En la gasificación, la reacción 5.6 es la más rápida de todas siendo hasta 3 veces más rápida que la que le sigue, por lo que se asume que 5.6 es la única que consume el carbono proveniente de la pirólisis lo permite obviar la acción de las reacciones 5.7 y 5.8 [48]. Como la gasificación ocurre con déficit de oxígeno, las reacciones 5.9 5.10 y 5.11 deben competir por el uso del oxígeno siendo la reacción 5.11 la más rápida de las tres, de esta forma, las otras dos reacciones no serán consideradas debido a su poca participación en el proceso [49]. Luego el CO restante que no fue consumido en 5.11 reacciona según se muestra en la reacción 5.13 y el metano en la reacción 5.12.



5. Las reacciones de pirólisis y las que tienen oxígeno son muy rápidas, por lo tanto se consideran instantáneas.
6. El oxígeno que se inyecta al gasificador es el suficiente como para que la reacción 5.6 ocurra completamente y la reacción 5.11 ocurra con una conversión del 70 % [50].

Las cinéticas de las reacciones 5.12 y 5.13 son las que se muestran en las Ecuaciones 5.14 y 5.15 respectivamente [48][51].

$$-r = A_f \cdot T^{n_f} \cdot \exp\left(-\frac{E_f}{R \cdot T}\right) \cdot [CH_4] \cdot [H_2O] - A_b \cdot T^{n_b} \cdot \exp\left(-\frac{E_b}{R \cdot T}\right) \cdot [CO] \cdot [H_2]^3 \quad (5.14)$$

$$-r = \exp\left(-\frac{(-32,197 + 0,031 \cdot T) \cdot 1000}{R \cdot T}\right) \cdot [CO] \cdot [H_2O] \quad (5.15)$$

Donde:

A_f y A_b : Factores pre-exponenciales [-].

T : Temperatura [K].

nf y nb : Factores de temperatura [-].
 E_f y E_b : Energías de activación [J/mol].
 R : Constante general de los gases.[J/K·mol].
 $[CH_4]$: Concentración de metano [mol/m³].
 $[H_2O]$: Concentración de agua [mol/m³].
 $[CO]$: Concentración de monóxido de carbono [mol/m³].
 $[H_2]$: Concentración de hidrógeno [mol/m³].

En esta ocasión se reescribirán las cinéticas de tal forma que queden en función del largo del gasificador y no del tiempo, ya que el largo es el parámetro característico de los gasificadores. Para ello se considerará que el tiempo que transcurre dentro de un gasificador es igual a cociente entre el largo recorrido y la velocidad del gas. Suponiendo que esa velocidad es constante, se obtiene lo expresado en la Ecuación 5.16.

$$-r = \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial(z/v)} = \frac{v \cdot \partial C}{\partial z} \quad (5.16)$$

Así, tomando en cuenta todo lo anterior se simula lo que ocurre dentro del gasificador como se muestra en la Figura 5.3. Al igual que en los dos casos anteriores, se determina el largo del gasificador cuando se cumple el 95% del estado estacionario de la producción de hidrógeno, obteniendo un largo de 1,6 metros. El detalle de los cálculos se pueden encontrar en el Anexo B.3 y el código utilizado en el Anexo B.4.

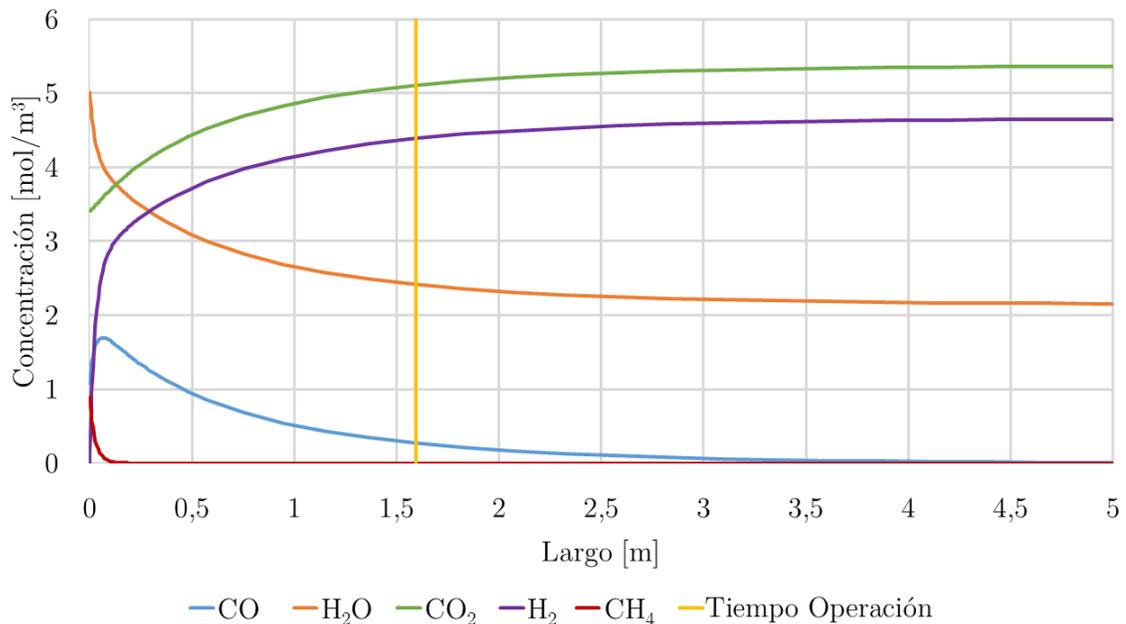


Figura 5.3: Variación molar en el gasificador a través del largo

El resultado obtenido se acerca a las dimensiones que se observan en la literatura, donde existen gasificadores que tratan entre 2 a 5 toneladas diarias los cuales tiene largos entre los 2 a 6 metros [52].

5.5. Dimensionamiento Relleno Sanitario en el Caso Actual

Tal como se adelantó al comienzo de este capítulo, se estima el volumen que usan los residuos de poda y jardinería en un relleno sanitario. Para esto se considera que la densidad aparente después de haber sido compactados los residuos es de $475 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, obteniendo así un volumen de $1330 \text{ [m}^3\text{]}$ [14]. Además, se debe considerar un volumen adicional de aproximadamente un 20 %, equivalente al volumen que utiliza la tierra de cobertura de sellado, alcanzando un volumen total de $1.600 \text{ [m}^3\text{]}$.

En la Tabla 5.1 Se muestra un resumen de los dimensionamientos obtenidos en este capítulo.

Tabla 5.1: Resumen de los dimensionamientos

Equipo	Dimensión	Parámetro Característico
Reactor PFR de Compostaje	$95,7 \text{ [m}^3\text{]}$	Volumen
Digestor Anaeróbico	$106 \text{ [m}^3\text{]}$	Volumen
Gasificador	$1,6 \text{ [m]}$	Largo
Relleno Sanitario	$1.600 \text{ [m}^3\text{]}$	Volumen

Capítulo 6

Evaluación

6.1. Evaluación Económica

En esta sección se evaluará económicamente, a través de la herramienta del flujo de caja y el valor actual neto, las tres tecnologías seleccionadas y dimensionadas en los capítulos anteriores, para esto se considerarán los siguientes aspectos:

1. Inversión Inicial: Se considerará el costo tanto de los equipos principales como del resto de los equipos necesarios para completar el proceso.
2. Costos de Operación: Se considerarán los siguientes costos operacionales.
 - (a) Personal: Sueldo de las personas necesarias para la operación de los procesos.
 - (b) Energía: Energía necesaria para el funcionamiento de los equipos.
3. Ingresos: Beneficios monetarios que puedan ingresar al presupuesto municipal debido a la venta de algún producto o servicio proveniente del proceso.

Para los costos operacionales se considerará que la operación es de 24 horas al día todos los días del año.

Si bien, la estimación de costos de inversión y operación es preliminar, se espera comparar el potencial económico de las alternativas en estudio.

6.1.1. Evaluación Económica del Proceso de Compostaje

Para la inversión se considera lo dicho por Tchobanoglous [53] que declara que la inversión necesaria para este tipo de proyectos está entre los 21.600.000 y 43.300.000 [CLP] por tonelada diaria procesada. Esta inversión incluye el equipo de conminución y el de compostaje, pues comúnmente se venden juntos [26]. Para este trabajo se tomará el peor de los casos. Considerando que se tratan cerca de 2 [ton/día], el costo de la inversión es de 86.700.000 [CLP].

La potencia requerida para los equipos antes mencionados es de 2 [kW], para lo cual se considera la tarifa una electricidad de 113 [CLP/(kWh)] [54][55]. Por otro lado, las consideraciones técnicas de la máquina proponen un trabajador por 4 horas diarias para la operación, considerando un sueldo bruto promedio de 250.000 [CLP/mes] [56].

Del proceso de dimensionamiento se obtuvo que se producen 380.000 [kg] de compost al año, el cual tiene un precio de venta de 55 [CLP/kg] [25][57].

En resumen, se obtiene lo expresado en la Tabla 6.1 donde los valores en moneda extranjera fueron convertidos a la moneda nacional y ajustados al año 2016 según el indicador CEPCI [58]. Se destacan los costos con un signo negativo mientras que los ingresos como positivos.

Tabla 6.1: Resumen principales características económicas del proceso de compostaje

Ítem	Valor	Unidad	Cita
Inversión en Equipos	-86.700.000	[CLP]	[53]
Energía	-1.980.000	[CLP/año]	[54][55]
Personal	-3.000.000	[CLP/año]	[56]
Ingresos	20.900.000	[CLP/año]	[57]

En base a los datos de la Tabla 6.1 se realiza un flujo de caja y el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) a 15 años, debido a que es la vida útil de los equipos; con una tasa de descuento del 6 %, que es lo que comúnmente se usa en proyectos del Estado. Se obtiene, así, un VAN de 42,4 millones de [CLP] [59][60]. Los cálculos y el detalle del flujo de caja se presentan en el Anexo C.1.1.

6.1.2. Evaluación Económica del Proceso de Digestión Anaeróbica

En la inversión de este caso se considera el digestor, la etapa de conminución, la de secado, las etapas de tratamiento de gases y el equipo de cogeneración, que tienen un costo de 49.900 [USD] para el digestor y equipo de conminución, 11.854 [USD] para el de secado, 13.300 para la etapa de tratamiento de gases y 97.312 [USD] para el equipo de cogeneración. La potencia total requerida es de 5 [kW] [31].

Para el proceso se necesita a una persona por turno en 4 turnos rotativos, considerando un sueldo de 500.000 [CLP/mes] por operario [31][56].

El precio para la venta de energía es de 60 [CLP/kWh], considerando la ley 20.571 sobre generación distribuida, mientras que para el bioabono se considerará un precio similar al del compost de 35 [CLP/kg], dado que es un producto parecido pero de menor calidad [61]. Se tomará en cuenta que en primera instancia se utilizará la energía producida en el consumo propio de la planta y el remanente será vendido al Sistema Interconectado Central (SIC). Así, no existirán costos por uso de energía eléctrica.

Considerando los resultados del dimensionamiento y realizando un cálculo análogo al caso del compostaje se obtiene la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Resumen principales características económicas del proceso de digestión

Característica	Valor	Unidad	Cita
Inversión en Equipos	-106.000.000	[CLP]	[31]
Energía	0	[CLP/año]	[-]
Personal	-24.000.000	[CLP/año]	[56]
Ingresos	36.100.000	[CLP/año]	[61]

Así se calcula un VAN, a 15 años, con las consideraciones previamente expuestas, obteniendo como resultado -0,390 millones de [CLP]. Los cálculos y el detalle del flujo de caja se encuentran en el Anexo C.1.2.

6.1.3. Evaluación Económica del Proceso de Gasificación

En la inversión se considerará tanto las etapas de conminución, gasificación y tratamiento de gases, llegando a un costo total de 28.500.000 [CLP] [62].

En la operación se considerará al igual que en el caso anaeróbico, una persona por turno en 4 turnos rotativos. Además el consumo energético corresponde al 10 % de la producción energética del gasificador alcanzando una potencia de 4,12 [kW] [52]. La energía se utilizará para el autoconsumo y el remanente será vendido tomando las mismas consideraciones que en la tecnología anterior.

Lo antes mencionado se resume en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Resumen principales características económicas del proceso de gasificación

Ítem	Valor	Unidad	Cita
Inversión en Equipos	-28.500.000	[CLP]	[62]
Energía	0	[CLP/año]	[-]
Personal	-24.000.000	[CLP/año]	[56]
Ingresos	19.500.000	[CLP/año]	[57][61]

Se realiza un flujo de caja privado del proyecto obteniendo un VAN de -72,8 millones de [CLP]. Los cálculos y el detalle del flujo de caja se encuentran en el Anexo C.1.3.

6.1.4. Costos Actuales de Disposición en Relleno Sanitario

El precio que KDM cobra por disponer los residuos es de aproximadamente 12.000 [CLP/ton] si los residuos llegan a su estación de transferencia en Quilicura, que es lo acostumbrado por las municipalidades. Por lo tanto, para el total del caso base correspondería un cobro de 7.560.000 [CLP] al año.

Si se evaluara lo anterior en un flujo de caja que sólo considerara gastos operacionales por el cobro de la disposición, en 15 años se obtendría un VAN de -73,4 millones de [CLP], monto que sería ahorrado si se aplicara cualquiera de las otras 3 tecnologías.

6.1.5. Comparación y Discusiones

En la Tabla 6.4 se observa el resumen de las evaluaciones económicas. Se puede observar que el caso del compostaje es el único rentable al aplicar un flujo de caja privado puro, porque es el único con un VAN positivo. Si se considerara el ahorro que se genera por no disponer los residuos en un relleno sanitario, el proceso anaeróbico también significaría una mejora en comparación con el escenario actual.

Tabla 6.4: Resumen resultados de la evaluación económica en [CLP]

Proceso	VAN	Inversión	Costos Operacionales	Ingresos
Compostaje	42.400.000	86.700.000	4.980.000	20.900.000
Digestión Anaeróbica	-390.000	106.000.000	24.000.000	36.100.000
Gasificación	-72.800.000	28.460.000	24.000.000	19.500.000
Relleno Sanitario	-73.400.000	0	7.560.000	0

El resultado se debe principalmente a que los costos operacionales referidos al compostaje son menores a las otras dos tecnologías, puesto que sólo necesita un operario a medio tiempo mientras que los otros necesitan 4 a tiempo completo.

Es posible apreciar que disponer los residuos tiene un VAN muy parecido al de la tecnología de gasificación, considerando los supuestos de esta evaluación. Por ende, si fuese necesario decidir sólo entre estas dos opciones, la evaluación económica muestra que la decisión es indiferente entre ellos dos, pues la precisión de la estimación no permite distinguir una diferencia significativa entre los VAN de estas opciones.

También es posible destacar la inversión necesaria para el caso de la digestión, la más elevada de los tres casos, y un factor importante para justificar el VAN negativo de esta alternativa.

Entre los supuestos tomados, se destacan los de la inversión: estos fueron diferentes para cada uno de los procesos, por lo que las metodologías para obtener la inversión inicial difieren entre ellas, pero a pesar de ello, no es posible determinar si alguno de los supuestos fue más fuerte que otro, provocando una distorsión en la evaluación y su posterior comparación.

Cabe destacar que el presente análisis es un acercamiento a una evaluación económica completa, ya que no se han considerado otros costos como insumos y mantenimiento de la planta.

Otro aspecto no considerado es el terreno, el cual podría representar una importante inversión, sobretodo para la opción del relleno sanitario el cual requiere la mayor área dentro de las opciones evaluadas. Por otro lado, si el terreno a utilizar fuese municipal, caso que no

traería costos directos de inversión, sería igualmente relevante conocer el terreno a utilizar, primero para saber si existe un terreno de ese tamaño, y en segunda instancia por el costo de oportunidad de utilizar el terreno en otro proyecto.

Si la decisión fuese plenamente económica, se recomendaría seguir adelante, y profundizar los estudios de factibilidad con la tecnología del compostaje en un reactor vertical.

6.2. Evaluación Ambiental

Cómo se observó en el capítulo de dimensionamiento uno de los principales productos generados en los procesos es el dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero. Así, la evaluación ambiental considerará las emisiones de gases de efecto invernadero generados, cuantificados como CO_2eq . Si bien un análisis de ciclo de vida permitiría estimar las emisiones de una variedad de gases de efecto invernadero, el análisis centrará su atención en las emisiones directas de CH_4 y CO_2 durante la operación de los respectivos procesos y el uso de sus productos en el corto plazo.

El agua también recibe atención como recurso en crisis a nivel mundial y Chile no queda fuera, debido a que se han presentado niveles significativos de sequía en el país desde el año 2010, por lo tanto, se tomará en cuenta el flujo de agua utilizado en el proceso como un indicador ambiental [63].

6.2.1. Evaluación Ambiental Proceso de Compostaje

El proceso genera CO_2 debido a la descomposición de los residuos, este valor fue calculado en la etapa de dimensionamiento, donde se obtuvo que se generan anualmente 164.000 [kg] de CO_2 , cuya conversión a CO_2eq es uno a uno.

Respecto al uso de compost en el corto plazo, este no se considera significativo y no es considerado en éste análisis, pues es un producto estabilizado que no debiese descomponerse considerablemente postratamiento.

Respecto al agua, el proceso que se genera en el reactor no necesita agua añadida para su correcta operación, siendo este indicador nulo.

6.2.2. Evaluación Ambiental Proceso de Digestión Anaeróbica

El proceso de biodigestión genera CO_2 y CH_4 ambos gases de efecto invernadero. Sin embargo, el metano es combustionado antes de ser liberado al ambiente, transformándose en CO_2 . Así el CO_2 liberado al ambiente al final del proceso es de 351.000 [kg CO_2eq] en un año. Los detalles del cálculo se pueden observar en el Anexo C.2.1.

La generación de gases de efecto de invernadero por el uso de bioabono se estima poco significativo, al igual que el compost.

Respecto al agua, el proceso requiere que se ingresen 0,05 [m³] por tonelada de residuo procesado alcanzando un total de 31,5 [m³] al año.

6.2.3. Evaluación Ambiental Proceso de Gasificación

Del gasificador salen gases como dióxido de carbono y monóxido de carbono, éste último es combustionado en el equipo de cogeneración transformándose en CO₂, resultando 418.000 [kg CO₂eq]. Los detalles de los cálculos se pueden encontrar en el Anexo C.2.2.

Al igual que el caso aeróbico, el gasificador no requiere agua añadida, entonces, éste indicador es cero.

6.2.4. Impacto Ambiental Actual del Relleno Sanitario

En los rellenos sanitarios se genera una descomposición anaeróbica, generando biogás, el cual es generalmente liberado al ambiente. No obstante, KDM Energía es capaz de recuperar entre el 30 % y el 35 % del biogás teórica producido y transformarlo en energía [42].

Se supondrá que los residuos de poda se descomponen de igual forma en el digestor como en un relleno sanitario, pero en este caso del relleno sanitario la conversión será del 100 % y no del 95 % determinado en el dimensionamiento del digestor. Así, el relleno sanitario genera 206.000 [kg/año] de biogás con una composición de 114.000 [kg/año] de CO₂ y 93.000 [kg/año] de CH₄, de éste último el 30 % es combustionado en la planta generadora de energía del relleno sanitario transformandose en CO₂.

Considerando lo anterior y que 1 [kg] de metano equivale a 21 [kg] de CO₂, el relleno sanitario emite 1.560.000 [kg CO₂eq] por la disposición de los residuos de poda [64]. Los cálculos se pueden ver en el Anexo C.2.3.

Respecto al agua, los rellenos sanitarios a veces son humedecidos para que la tierra no levante polvo si pasa maquinaria sobre el relleno. Actualmente existe un proyecto para utilizar los lixiviados que se recuperan para humedecer el relleno, por lo que este indicador será 0 [42].

6.2.5. Comparación y Discusiones

En la Tabla 6.5 se observa un resumen con los resultados antes obtenidos. De ésta se extrae que la tecnología de compostaje es la que menos gases de efecto invernadero genera, mientras que la disposición genera más gases, llegando a ser hasta 9,5 veces lo del proceso de compostaje.

Tabla 6.5: Resumen resultados de la evaluación ambiental

Proceso	kg de CO ₂ eq	m ³ de agua
Compostaje	164.000	0
Digestión Anaeróbica	351.000	31,5
Gasificación	418.000	0
Relleno Sanitario	1.560.000	0

Por otro lado, la digestión anaeróbica es la única que requiere agua añadida al proceso, quedando en desventaja en este aspecto.

El resultado respecto al las emisiones de gases de efecto invernadero es el esperado considerando que las cuatro tecnologías usan la misma materia prima, es decir entra la misma masa de carbono a los cuatro procesos, pero el proceso de valorización transforma todo el carbono en CO₂, mientras que el compostaje y la biodigestión tienen productos sólidos orgánicos (compost y bioabono), siendo el primero de estos dos el que tiene una salida sólida mayor. Finalmente el proceso de disposición libera metano al ambiente, el cual tiene un potencial de calentamiento global de 21 veces superior al CO₂.

En esta etapa se pudieron haber analizado diversos impactos ambientales del proceso, cuyo aporte sería indudable en la evaluación. Sin embargo, al considerar sólo los aspectos de contaminación atmosférica y el agua utilizada se espera involucrar los mayores impactos en el contexto. En ese sentido, si el contexto fuese otro, donde otros aspectos cobraran mayor relevancia debido a un contexto ambiental diferente, considerar solamente la emisión de gases de efecto invernadero y el agua utilizada resultarían insuficientes para tener un buen acercamiento al impacto.

Es menester destacar que los indicadores se realizaron plenamente sobre el proceso productivo, y no corresponde a un análisis de ciclo de vida, por lo tanto, los impactos reales en el medio serían mayores a los reportados. A pesar de ello, se estima que los resultados obtenidos son suficientes para comparar entre las tecnologías.

En base a lo anterior, el proceso de compostaje sería el seleccionado para continuar con estudios más profundos si la evaluación se enfocara solamente en lo ambiental, ya que tiene los valores mínimos en los dos indicadores.

6.3. Evaluación Social

En esta sección se evaluará el ámbito social del proyecto, considerando las características de la comuna. Como la comuna se encuentra en el centro de la ciudad, instalar proyectos como los aquí evaluados puede generar diversos impactos en la población.

En este ámbito, se considerarán los olores generados; al tratarse de residuos orgánicos estos pueden producir olores en su descomposición, provocando molestias a los vecinos; también se considerará la inseguridad, pues cualquier accidente dentro de la planta podría afectar de

alguna forma al vecindario dependiendo de la gravedad de éste. Finalmente se considerará el rechazo que generen los proyectos en la opinión de los grupos de interés, quienes serán identificados más adelante.

Cabe destacar que la mayor parte de esta evaluación es cualitativa, de modo que se generará una metodología particular que permita traducir las diferencias cualitativas a cuantitativas, facilitando la comparación.

6.3.1. Grupos de Interés

Los grupos de interés o *stakeholders* son personas o grupos de personas que están interesadas de alguna manera en el proyecto, pudiendo afectar tanto en las decisiones que se generen como en la viabilidad del proyecto.

En este proyecto se identificaron tres principales grupos de interés:

1. Ilustre Municipalidad de Santiago: Es de los principales interesados pues los proyectos ayudarían a disminuir costos en el tratamiento de residuos, los cuales son de plena responsabilidad del municipio [7].
2. Empresa de Tratamiento de Residuos: En este caso KDM S.A., es la empresa que se vería afectada porque dejaría de percibir ingresos por los residuos que no llegarían al relleno sanitario. Además cuenta una opinión experta en residuos y podría interesarle el desarrollo de proyectos como los presentados en este trabajo.
3. Vecinos de Santiago: Estos se verían afectados, ya que las instalaciones del posible proyecto se encontrarían cerca de ellos, por lo que los olores y la inseguridad de la planta sería de su interés.

6.3.2. Metodología de Evaluación

Para el desarrollo de la evaluación se utilizará el programa M-MACBETH una herramienta para la evaluación multicriterio.

El programa permite calcular una importancia relativa de las características a comparar. Esta importancia relativa queda expresada en un factor. Los factores de las características deben sumar 1 [65].

También es necesario identificar como se medirán los tres aspectos:

1. **Olores:** Se medirán cuantitativamente según supuestos y estudios previos sobre la generación de olores de cada proceso.
2. **Inseguridad:** Se medirá según la opinión de los grupos de interés, evaluando de 1 a 5 la peligrosidad de las tecnologías siendo 1 nada peligroso y 5 muy peligroso.
3. **Rechazo:** Se evaluará de la misma manera que la inseguridad.

Se concretarán reuniones con miembros de los grupos de interés para realizar las preguntas que se encuentran en el Anexo C.3.1, de tal forma de determinar tanto los ponderadores como las evaluaciones a los aspectos de inseguridad y rechazo.

Las preguntas buscan rescatar la opinión de los interesados sobre las tecnologías evaluadas en el contexto, evitando generar sesgos de parte del encuestador.

6.3.3. Olores Producidos

Las tecnologías descritas incluyen procesos que ocurren en un ambiente cerrado, dentro de los equipos. Sin embargo, algunos productos pueden generar olores cuando ya se encuentran fuera del proceso. Ese es el caso del compost y el bioabono.

Los gases de combustión generados en la mayoría de los procesos son inodoros, a excepción de ácido sulfhídrico, que es separado en los procesos de purificación de gases y no es liberado al ambiente; por lo tanto los gases no serán considerados en esta evaluación. Por lo tanto, la gasificación no genera olores.

Los olores se pueden medir según su tasa de emisión de olores³ en $[ou_E/(m^2 \cdot s)]$ en este caso se supondrá que el bioabono tiene un comportamiento parecido al del compost, por lo tanto, ambos tienen una tasa de emisión entre 18 y 30 $[ou_E/(m^2 \cdot s)]$ [26].

La producción de compost es mayor que la de bioabono, llegando a los 380.000 [kg] de compost y 265.000 [kg] de bioabono en un año, para obtener el flujo de olor producido se propone la Ecuación 6.1.

$$O = \varphi \cdot \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot t \cdot f_m \quad (6.1)$$

Donde:

- O : Flujo de olor $[ou_E/s]$.
- φ : Tasa de emisión de olores $[ou_E/(m^2 \cdot s)]$.
- \dot{m} : Flujo de compost producido $[kg/año]$.
- ρ : Densidad aparente $[kg/m^3]$.
- t : Tiempo de almacenamiento $[año]$.
- f_m : Factor de almacenamiento $[m^2/m^3]$.

f_m corresponde a un factor de almacenamiento, el cual indica cuántos $[m^2]$ de superficie son utilizados por cada $[m^3]$ de un residuo, y depende de la forma de almacenamiento.

Si se asume que el bioabono y el compost tienen un comportamiento parecido, entonces los valores de φ y ρ se estimarán idénticos para ambos productos. Además, se asumirá que

³ ou_E es la unidad de olor europea [26]

tienen el mismo tiempo de almacenamiento, por lo tanto la única diferencia sería el flujo másico de cada uno.

Para generar un indicador, se normalizará la generación de olores con la del compost, como se muestra en la Ecuación 6.2.

$$I_x = \frac{O_x}{O_{Compost}} \quad (6.2)$$

Donde:

I_x : Indicador de Olor para x [-].

O_x : Flujo de olor de x [ou_E/s].

$O_{Compost}$: Flujo de olor del compost [ou_E/s].

Aplicando las Ecuaciones 6.2 y 6.1 para el compost se obtiene lógicamente un valor de 1, pero para el bioabono se obtiene:

$$\begin{aligned} I_{Bioabono} &= \frac{O_{Bioabono}}{O_{Compost}} \\ &= \frac{\varphi \cdot \frac{m_{Bioabono}}{\rho} \cdot t \cdot f_m}{\varphi \cdot \frac{m_{Compost}}{\rho} \cdot t \cdot f_m} \\ &= \frac{\cancel{\varphi} \cdot \frac{m_{Bioabono}}{\cancel{\rho}} \cdot \cancel{t} \cdot \cancel{f_m}}{\cancel{\varphi} \cdot \frac{m_{Compost}}{\cancel{\rho}} \cdot \cancel{t} \cdot \cancel{f_m}} \\ &= \frac{m_{Bioabono}}{m_{Compost}} \\ &= \frac{265.000[kg]}{380.000[kg]} \\ &= 0,697 \end{aligned}$$

El resultado expresa que el biabono produce un 70 % del olor generado por el compost.

Cabe destacar que el olor que produce el gasificador es nulo. Así, el indicador para el gasificador también será 0.

Respecto al relleno sanitario, éste también genera olores, se supondrá que tiene una tasa de emisión de olores parecida a la de los residuos frescos, que tienen un rango entre 26 y 42 [ou_E/(m²·s)]. Asumiendo que tienen el mismo factor f_m que los casos anteriores, y considerado un valor promedio de las tasas de producción de olores y los datos que se muestran en la Tabla 6.6, se obtiene un valor para el indicador $I_{Relleno}$ de 3,79 al utilizar las Ecuaciones 6.1 y 6.2. Los cálculos se detallan en el Anexo C.3.2.

Tabla 6.6: Parámetros para indicador de olor [14][26]

Parámetro	Relleno Sanitario	Compostaje
Densidad [kg/m ³]	475	700
Masa [kg]	630.000	380.000
Tasa Producción de Olores [ou _E /(m ² ·s)]	34	24

La ventaja que obtiene el compostaje en un reactor se debe principalmente al rápido procesamiento de la materia prima, pues si el compostaje se realizara en una pila, la emisión de olores sería similar al caso del relleno sanitario.

6.3.4. Resultados de la Encuesta

Las encuestas fueron aplicadas a un representante de cada grupo de interés, obteniendo como resultado lo presentado en las Tablas 6.7 y 6.8. Los detalles de los resultados se pueden encontrar en el Anexo C.3.3.

Tabla 6.7: Indicadores para aspectos de inseguridad y rechazo

Proceso	Inseguridad	Rechazo
Compostaje	1,33	2,33
Digestión Anaeróbica	2,33	2,67
Gasificación	3,00	3,00
Relleno Sanitario	2,50	4,00

De la tabla 6.7 se desprende que un mayor valor en los indicadores implica una inseguridad y un rechazo mayor. Así, el compostaje tiene los mejores indicadores de inseguridad y rechazo.

Tabla 6.8: Ponderadores de los aspectos

Aspecto	Ponderador
Olores	0,278
Inseguridad	0,333
Rechazo	0,389

Los ponderadores de la tabla 6.8 expresan la importancia relativa de cada ítem según los encuestados, teniendo el indicador del rechazo una mayor importancia y el de olores una menor.

6.3.5. Resultados de la Evaluación

En la Tabla 6.9 se observa el resumen de los indicadores de cada aspectos.

Tabla 6.9: Resumen indicadores sociales

Proceso	Olores	Inseguridad	Rechazo
Compostaje	1,00	1,33	2,33
Digestión Anaeróbica	0,68	2,33	2,67
Gasificación	0,00	3,00	3,00
Relleno Sanitario	3,79	2,50	4,00

Considerando las Tablas 6.8 y 6.9, se utiliza programa M-MACBETH y se obtienen los resultados que se ven en la Tabla 6.10, donde 0 significa que tiene la peor satisfacción y 5 la mejor.

Tabla 6.10: Resultados de la evaluación social

Proceso	Evaluación Social
Compostaje	3,85
Digestión Anaeróbica	3,38
Gasificación	3,19
Relleno Sanitario	1,58

Si se realizara la evaluación considerando sólo la respuesta de uno de los involucrados se obtendrían los resultados de la Tabla 6.11.

Tabla 6.11: Resultados por grupo de interés de la evaluación social

Proceso	Municipio	Empresa Relleno Sanitario	Vecinos
Compostaje	4,35	3,31	3,74
Digestión Anaeróbica	3,23	3,44	2,76
Gasificación	1,87	4,17	3,33
Relleno Sanitario	2,92	1,35	0,00

La Tabla 6.11 muestra que dependiendo de la opinión de los interesados el resultado es diferente, ya que si sólo se considera al representante de la empresa relleno sanitario, la gasificación tendría el mejor resultado, mientras que al considerar sólo la opinión de la municipalidad o de los vecinos, el compostaje es el que tiene la mejor evaluación.

6.3.6. Comparación y Discusiones

En la Tabla 6.12 se observa que el compostaje es la tecnología con la mejor evaluación social, esto se debe a que obtuvo los puntajes más altos en los aspectos de inseguridad y rechazo, a pesar de tener el segundo peor puntaje en olor. En gris se encuentran los mejores resultados de cada ítem.

Tabla 6.12: Resumen de la evaluación social

Proceso	Olores	Inseguridad	Rechazo	Evaluación Social
Compostaje	1,00	1,33	2,33	3,85
Digestión Anaeróbica	0,68	2,33	2,67	3,38
Gasificación	0,00	3,00	3,00	3,19
Relleno Sanitario	3,79	2,50	4,00	1,53

Esta evaluación, si bien es un acercamiento, tiene el sesgo de las personas que respondieron la encuesta, por lo que no necesariamente representan completamente la opinión de su grupo de interés.

La evaluación social podría haber tenido resultados diferentes si se consideraran otros aspectos como la contaminación acústica, o los beneficios sociales que podría generar cada tecnología. Sin embargo, los aspectos evaluados son pertinentes, debido a que resultan más afectados por los procesos de las tecnologías evaluadas.

Finalmente tiene el sesgo de quien realiza la evaluación y cómo decide medir los aspectos, obteniendo resultados diferentes con distintas metodologías.

En base a lo anterior, se resume que la evaluación social presenta varios sesgos debido a la diversidad de opiniones que existen. No obstante, es un aspecto relevante a evaluar, puesto que los proyectos están inmersos en un contexto donde lo social es un factor de éxito en su realización. En consecuencia, evaluaciones de este estilo aportan a la toma de decisiones, debido a que consideran una parte de la realidad del contexto. La metodología podría mejorar considerando una mayor muestra estadística y una mejora en la creación del cuestionario permitiendo enriquecer los aspectos sociales en la evaluación.

6.4. Evaluación General Multicriterio

La evaluación multicriterio consiste en agrupar los diferentes criterios evaluados en una única evaluación. En este caso se agruparán las evaluaciones económica, ambiental y social de las cuatro tecnologías, utilizando nuevamente la herramienta M-MACBETH [65].

La Tabla 6.13 presenta el resumen de las 3 evaluaciones. En gris se encuentran los mejores resultados de cada evaluación.

Tabla 6.13: Resumen de las evaluaciones

Proceso	Económica	Ambiental		Social
	VAN [CLP]	GEI [CO ₂ eq]	Uso de Agua [m ³]	Puntaje [-]
Compostaje	42.400.000	164.000	0	3,85
Digestión Anaeróbica	-390.000	351.000	31,5	3,38
Gasificación	-72.800.000	418.084	0	3,19
Relleno Sanitario	-73.400.000	1.560.000	0	1,53

Las evaluaciones tendrán un ponderador de 1/3 cada una dentro de la evaluación multicriterio, pues se define una importancia relativa igual para los tres ámbitos evaluados. Como la evaluación ambiental tiene dos aspectos, cada uno tendrá un ponderador de 1/2 sobre la evaluación ambiental, por la misma razón anterior.

Cabe señalar que estos ponderadores podrían ser objeto de discusión en cualquier sociedad y podrían ser definidos mediante encuestas, de manera análoga a la evaluación social antes presentada.

Ingresando los datos de la Tabla 6.13 y las ponderaciones antes descritas al programa, se obtiene como resultado lo presentado en la Tabla 6.14, donde 0 corresponde al valor mínimo y por lo tanto la peor evaluación posible y 5 corresponde al valor máximo, la mejor evaluación posible.

Tabla 6.14: Resultados de la evaluación multicriterio

Proceso	Evaluación Multicriterio
Compostaje	4,53
Digestión Anaeróbica	2,82
Gasificación	2,52
Relleno Sanitario	1,34

De los resultados, se desprende que el proceso de compostaje es el mejor evaluado, seguido por la digestión anaeróbica, la gasificación y terminando con el relleno sanitario. Esto se debe principalmente a que el compostaje cuenta con los mejores indicadores en todas las evaluaciones.

Si bien, el resultado era predecible debido a que el proceso de compostaje obtuvo los mejores resultados en las tres evaluaciones, la herramienta de la evaluación multicriterio permitiría dirimir cuando diferentes opciones hayan tenido los mejores resultados en las evaluaciones. Por ejemplo, si la opción de la digestión anaeróbica hubiese obtenido el mejor resultado en la evaluación económica, el gasificador en la evaluación ambiental, y el proceso de compostaje en la evaluación social, los puntajes en las respectivas evaluaciones y la evaluación general multicriterio habrían sostenido una decisión final muy difícil de prever al finaliza cada análisis en los respectivos ámbitos social, ambiental y económico.

Cabe destacar que la evaluación multicriterio ordenó las tecnologías de manera tal que siguen lo sugerido en la política propuesta por la CONAMA el año 2005, hoy descrita en la ley general de residuos, tal como mostró la Figura 1.3. Esto, porque el compostaje es una tecnología de reciclaje, la digestión anaeróbica es tanto de reciclaje como de valorización energética, la gasificación es una de valorización energética y el relleno sanitario es una de disposición [8].

Capítulo 7

Conclusión

Para la realización de este trabajo se seleccionó como materia prima los residuos orgánicos de poda y jardinería debido a que son residuos segregados desde su origen, y corresponde al 9 % de los residuos orgánicos de la Región Metropolitana.

El contexto se enmarca en la comuna de Santiago ya que corresponde a la séptima comuna con más áreas verdes dentro del Gran Santiago, alcanzando el 5 % de la áreas verdes del total, además de contar con diversos programas de reciclaje de residuos orgánicos e inorgánicos.

El caso base se estimó a partir de la cantidad de camiones utilizados por la Ilustre Municipalidad para la recolección de los residuos obteniendo como resultado un caso base de 630.000 [kg/año] de residuos.

Las tecnologías posibles para gestionar residuos orgánicos se separaron en cuatro grupos, las tecnologías aeróbicas, las anaeróbicas, las de valorización energética y las de disposición, seleccionando en cada caso una tecnología para evaluar posteriormente tomando en consideración las ventajas y desventajas en el contexto; las tecnologías seleccionadas fueron: el compostaje en un reactor PFR vertical como tecnología aeróbica, la biodigestión anaeróbica seca termofílica como tecnología anaeróbica, la gasificación como tecnología de valorización, y para el caso de la disposición se usará el caso actual de gestión de residuos, el relleno sanitario con recuperación de biogás.

En el caso del compostaje en un reactor PFR vertical, se obtuvo como resultado de la evaluación económica un VAN de 42.400.000 [CLP], de la evaluación ambiental se obtuvo que tiene un gasto de agua en el proceso de 0 [m³] y una emisión de gases de efecto invernadero de 164.000 [kg de CO₂eq], y de la evaluación social se obtuvo un puntaje global de 3,85.

Por otro lado, la opción de la biodigestión anaeróbica seca, obtuvo un VAN de -390.000 [CLP] en la evaluación económica, un uso de agua de 31,5 [m³] y una emisión de GEI de 351.000 [kg de CO₂eq] en la evaluación ambiental y 3,38 puntos en la evaluación social.

La tecnología de gasificación obtuvo -72.800.000 [CLP] como VAN, 0 [m³] de agua utilizada y una emisión de 418.000 [kg de CO₂eq], además de un puntaje de 3,19 en las evaluaciones económica, ambiental y social respectivamente.

Para el caso actual de la disposición en un relleno sanitario, las evaluaciones económica, ambiental y social arrojaron como resultado un VAN de -73.400.000 un uso de agua de 0 [m³] y una emisión de 1.560.000 [kg de CO₂eq], además de un puntaje de 1,53 respectivamente.

Del análisis se desprende que el proceso de compostaje cuenta con los mejores resultados en las tres evaluaciones, resultado que se confirma con la evaluación multicriterio que le entrega un puntaje de 4,53 de un máximo de 5. Las otras obtuvieron un puntaje en la evaluación multicriterio de 2,82 para la digestión anaeróbica, 2,52 para la gasificación y 1,34 para el relleno sanitario.

Los resultados generales mostraron una coherencia entre el puntaje obtenido por cada tecnología y la jerarquía expuesta en la ley general de residuos.

Finalmente se concluye que la mejor opción para el tratamiento de residuos orgánicos de poda y jardinería de la Ilustre Municipalidad de Santiago es la generación de compost en un reactor PFR vertical, recomendando seguir a una etapa de ingeniería conceptual para esta opción, realizando una evaluación más profunda que incluya los tres aspectos revisados en éste trabajo.

Bibliografía

- [1] COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile. 2010, 64p.
- [2] ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS. Glosario de estadísticas del medio ambiente. 1997, 133p.
- [3] COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. Análisis y propuestas para las tarifas de los residuos sólidos domésticos en América Latina. 1998, 42p.
- [4] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Residuos. En: Informe del estado del medio ambiente, cap. 3. 2011, pp.135 – 165.
- [5] BANCO INTER-AMERICANO DE DESARROLLO. Manejo de Residuos Sólidos. 2009, 54p.
- [6] HONTORIA GARCÍA, Ernesto, ZAMORANO TORO, Montserrat. Fundamentos del manejo de los residuos urbanos. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, España, 2000, 756p.
- [7] GESCAM CONSULTORES AMBIENTALES. Estudio acerca de la industrialización de residuos y de la forma de desarrollar una política de estado para el tema. 2012, 169p.
- [8] COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. Política de gestión integral de residuos sólidos. 2005, 74p.
- [9] HERTFORDSHIRE WASTE PARTNERSHIP. Hertfordshire Joint Municipal Waste Management Strategy. 2007, 28p.
- [10] ENVIRONMENT CANADA. Technical Document on Municipal Solid Waste Organics Processing. 2013, 220p.
- [11] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Acuerdo de producción limpia permitira reutilizar residuos orgánicos de ferias libres en Santiago, 2014. [en línea] <<http://portal.mma.gob.cl/acuerdo-de-produccion-limpia-permitira-reutilizar-residuos>> [consulta: 2016-09-08].
- [12] CÓRDOVA MOLINA, Carolina Alejandra. Estudio De Factibilidad Técnico-Económica Para Instalar Una Planta De Compostaje, Utilizando Desechos Vegetales Urbanos.

- Memoria para optar al título profesional de ingeniero forestal, Universidad de Chile, 2006, 100p.
- [13] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO. Resumen Ejecutivo, Caracterización de Residuos Sólidos Domiciliarios en la Región Metropolitana. Comisión Nacional de Medio Ambiente, Santiago, 2006, 15p.
- [14] TCHOBANOGLOUS, George, THEISSEN, Hilary, ELIASSEN, Rolf. Desechos Sólidos Principios de Ingeniería y Administración. Mérida, 1982, 209p.
- [15] SEPÚLVEDA VILLADA, Luis Anibal, ALVARADO TORRES, Jhon Alexander. Manual de Compostaje. Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín, 2013, 88p.
- [16] NÁDALES, Enrique. Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas de los RSU. En: Gestión de RSU. Málaga, 2015, pp.15–26.
- [17] ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE SANTIAGO. Reciclaje. [en línea] <<http://www.munistgo.info/medioambiente/reciclaje-01/>> [consulta: 2017-01-13].
- [18] ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE SANTIAGO. Composición de la población. [en línea] <<http://www.municipalidaddesantiago.cl/composicion-de-la-poblacion/>> [consulta: 2017-01-13].
- [19] AIM-CHILE. Grupos Socioeconomicos. Asociacion Chilena de Empresas de Investigación de Mercados, Santiago, 2008, 38p.
- [20] HURTADO, Eduardo. Planta de Compostaje Parque Intercomunal Poniente. Proyecto de título para optar al título de arquitecto, Universidad de Chile, 2012, 95p.
- [21] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Disponibilidad de Áreas Verdes. En: Informe del estado del medio ambiente, cap. 6. 2011, pp.221–241.
- [22] HERMOSILLA, Raúl. Inspector Técnico. Dirección de Ornato, Parques y Jardines. Ilustre Municipalidad de Santiago, 2017.
- [23] JAC MOTORS. Urban 1042 Doble Cabina. [en línea] <http://www.camionesjac.cl/modelos/ficha_{ }urban-1042-doble-cabina.php> [consulta: 2017-01-16].
- [24] RECICLAJES INDUSTRIALES S.A. Quienes Somos. [en línea] <<http://www.reciclajes.cl/>> [consulta: 2017-03-10].
- [25] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. Compost: Clasificación y requisitos, 2004, 27p.
- [26] SÁNCHEZ DÍAZ, Ignacio. Estudio Técnico y Económico de una Planta de Tratamiento de Residuos Vegetales en Getafe. Memoria para optar al título de master profesional en ingeniería y gestión medioambiental, Escuela de Organización Industrial, 2009, 97p.
- [27] JRC EUROPEAN COMMISSION. Supporting Environmentally Sound Decisions for Bio-

Waste Management. 2011, 106p.

- [28] PORRAS HIDALGO, Sebastián Alejandro. Producción de compost a partir de residuos sólidos de una planta de celulosa. Memoria para optar al título de ingeniero civil en biotecnología, Universidad de Chile, 2011, 90p.
- [29] ALCOTA CONDORI, Carola del Carmen. Acondicionamiento de Biosólidos Mediante Compostaje. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, 2002, 175p.
- [30] ASTUDILLO CRISÓSTOMO, Rodrigo Andrés. Estudio de Prefactibilidad Técnico-Económica del Diseño de Una Planta de Lombricultura en Base a Residuos Orgánicos para la Producción de Abono para la Industria de Viveros. Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial, Universidad de Chile, 2012, 103p.
- [31] CARRASCO ALLENDES, Juan Luis. Evaluación Técnica y Económica de una Planta de Biogás para el Autoabastecimiento Energético: Una Estrategia para Diferentes Contextos. Memoria para optar al título de ingeniero civil en biotecnología, Universidad de Chile, 2015, 184p.
- [32] GRASS PUGA, Bruno Daniel. Evaluación y Diseño para la Implementación de una Planta de Biogás a Partir de Residuo Orgánicos Agroindustriales en la Región Metropolitana. Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial, Universidad de Chile, 2013, 114p.
- [33] FORSTER CARNEIRO, Tânia. Digestión Anaerobia Termofílica Seca de Residuos Sólidos Urbanos: Estudio de las Variables del Proceso en el Arranque y Estabilización del Bio-reactor. Tesis para optar al grado de doctora en ingeniería química, Universidad de Cádiz, 2005, 421p.
- [34] DÍAZ DE BASURTO BURGOS, Aitor. Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor Anaeróbico de Residuos Orgánicos Generados en el Mercado de Tiquipaya (Bolivia). Tesis para optar al título de master en ingeniería ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, 2013, 89p.
- [35] FERNÁNDEZ PALACIOS, Tomás, KLIMCZYK, Enzo Iván, NASRALA, Matías Daniel, ET AL. Estudio de Factibilidad: Generación de Energía Eléctrica a Partir de la Incineración Controlada de RSU. Proyecto final de ingeniería industrial, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, 2014, 130p.
- [36] CAÑADAS MOLINA, Victor. Análisis de la viabilidad técnica y económica de una planta de gasificación de biomasa residual agrícola para suministro de una central de cogeneración en la comarca del Segrià. Tesis para optar al título de máster en energías renovables y sostenibilidad energética, Universitat de Barcelona, 2013, 74p.
- [37] DÍAZ ALVARADO, Felipe Andrés. Gasificación de Carbón en Chile para Obtención de Hidrógeno y Electricidad en Planta de Ciclo Combinado. Tesis para optar al título de ingeniero civil en biotecnología y al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención química, Universidad de Chile, 2007, 161p.

- [38] SUBSECRETARÍA DE SALUD PÚBLICA. MINISTERIO DE SALUD. Decreto Supremo 189. Reglamento sobre Condiciones Sanitarias de Seguridad Básicas en Rellenos Sanitarios, 2007, 23p.
- [39] MINISTERIO DE SALUD. Decreto Supremo 148 .Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos, 2003, 58p.
- [40] KDM S.A. KDM Tratamiento Servicios. [en línea] <<http://www.kdm.cl/tratamiento/servicios.html>> [consulta: 2017-02-02].
- [41] KDM S.A. KDM Energia. [en línea] <<http://www.kdm.cl/energia/index.html>> [consulta: 2017-02-02].
- [42] SCHLATTER BÖHM, Ricardo. Ingeniero de Proyectos. Dirección de Ingeniería e Innovación. KDM, 2016.
- [43] MARUGG, C., GREBUS, M., HANSEN, R.C., ET AL. A kinetic model of the yard waste composting process. Compost Science & Utilization, 1(1):38–51, 1993.
- [44] FOGLER, H. Scott. Elements of Chemical Reaction Engineering. 3ª edición. Prentice Hall, Michigan, 1988, 646p.
- [45] CHAMY, Rolando, VIVNACO, Elba. Potencial de Biogás. Comisión Nacional de Energía, Santiago, 2007, 82p.
- [46] FERNÁNDEZ GÜELFO, Luis Alberto. Caracterización Cinética de la Degradación Anaerobia Termofílica Seca de la FROSU. Efecto de Diferentes Pretratamientos Sobre la Biodegradabilidad del Residuo. Tesis para optar al grado de doctora en ingeniería química, Universidad de Cádiz, 2008, 442p.
- [47] MONOD, Jacques. The Growth of Bacterial Cultures. Annual Review Microbiology, 3:371–394, 1949.
- [48] RODDY, Dermot J., MANSON-WHITTON, C. Biomass Gasification and Pyrolysis. En: Comprehensive Renewable Energy. Elsevier, 2012, pp.133–153.
- [49] FIASCHI, Daniele, MICHELINI, Marco. A two-phase one-dimensional biomass gasification kinetics model. Biomass and Bioenergy, 21(2):121–132, 2001.
- [50] BRIZUELA, E., ROMANO, S.D. Análisis de la combustión completa e incompleta. En: 67.30 Combustión, cap. 2. Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval, Facultad de Ingeniería, UBA, Buenos Aires, 2003, pp.24–48.
- [51] WATANABE, H, OTAKA, M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier. Fuel, 85(12-13):1935–1943, 2006.
- [52] BESEL S.A., INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Producción eléctrica y cogeneración. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid, 2007, 44p.

- [53] TCHOBANOGLOUS, George, KREITH, Frank. Handbook of Solid Waste Management. 2ª edición. McGraw-Hill, New York, 2002, 834p.
- [54] TRACO IBERIA. Especificaciones Técnicas VCU, 1p.
- [55] ENEL SPA. Tarifas. [en línea] <<https://www.eneldistribucion.cl/tarifas>> [consulta: 2017-02-13].
- [56] ROBERT HALF. Guía Salarial 2017, 2017, 39p.
- [57] ONG COVALENTE. Evaluación de Alternativa Tecnológica para la Producción de Compost en Chile. 2016, 101p.
- [58] CHEMICAL ENGINEERING. Economic Indicators. 2016, 1p.
- [59] SISTEMA NACIONAL DE INVERSIONES. Precios Sociales 2017. 2017, 23p.
- [60] SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS. Vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizados. [en línea] <http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_{_}vida_{_}enero.htm> [consulta: 2016-06-16].
- [61] MINISTERIO DE ENERGÍA. Ley 20.571. Regula el Pago de las Tarifas Eléctricas de las Generadoras Residenciales, 2014, 3p.
- [62] COUPER, James R, PENNEY, W Roy, FAIR, James R, ET AL. Chemical Process Equipment Selection and Design. 3ª edición. Elsevier, Amsterdam, 2012, 801p.
- [63] CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA (CR)2. Informe a la Nación: La Megasecuía 2010-2015, Una Lección para el Futuro. 2015, 27p.
- [64] FORSTER, P, RAMASWAMY, V, ARTAXO, P, ET AL. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. En: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, cap. 2. Cambridge University Press, Cambridge, 2007, pp.129–235.
- [65] BANA E COSTA, Carlos A., VANSNICK, Jean-Claude. The MACBETH Approach: Basic Ideas, Software, and an Application. En: Advances in Decision Analysis. Springer Science+Business Media Dordrech, Antwerp, 1999, pp.131–157.
- [66] GREEN, Don, PERRY, Robert. Perry's Chemical Engineer's Handbook. 8ª edición. McGraw-Hill, Nueva York, 2008, 2735p.
- [67] BESEL S.A., DE LA ENERGÍA, Instituto para la Diversificación y Ahorro. Biomasa: Gasificación. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid, 2007, 36p.
- [68] BASU, Prabir. Biomass gasification and pyrolysis: Pactical Design. Elsevier, Amsterdam, 2010, 364p.
- [69] SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS. Impuestos Directos. [en línea] <http://www.sii.cl/aprenda_{_}sobre_{_}impuestos/>

`impuestos/imp{ }directos.htm`> [consulta: 2017-02-22].

- [70] DOLAR HOY. Valor del Dolar en Chile. [en línea] <<http://www.valor-dolar.cl/>> [consulta: 2017-02-15].
- [71] ANDERSON, John. Determining Manufacturing Costs. CEP Magazine, (56):27–31, 2009.
- [72] E4TECH, NNFC. Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes. 2009, 130p.

Anexo A

Caso Base

A.1. Estimación del Caso Base

Los datos entregados por la Dirección de Ornato, Parques y Jardines de la Ilustre Municipalidad de Santiago, que se muestran en la Tabla A.1 son los utilizados para estimar el caso base, donde los residuos de poda corresponden a ramas y hojas, mientras que los de jardinería al césped.

Tabla A.1: Datos sobre poda y jardinería de la I. Municipalidad de Santiago [22]

Proporción de ramas en residuos de poda	60	[%] en volumen
Número de camiones poda	2	[camión/día]
Número de camiones jardinería	1/4	[camión/(ciclo·empresa)]
Número de empresas jardinería	5	[empresa]
Número de ciclos de jardinería en verano	4	[ciclos/mes]
Número de ciclos de jardinería en invierno	2	[ciclos/mes]
Meses de poda	7	[mes]
Meses de invierno	7	[mes]
Meses de verano	5	[mes]

Considerando que los camiones utilizados para la recolección de los residuos son camiones de 3/4 de tonelada no compactadores, los cuales tienen un volumen de aproximadamente 12m³ se calculará el volumen de residuos de poda según la Ecuación A.1 y de jardinería según la Ecuación A.2 [23].

$$V_{rp} = N_{cp} \cdot V_c \cdot M_p \quad (\text{A.1})$$

$$V_{rj} = N_{cj} \cdot E_j \cdot V_c \cdot (C_{jv} \cdot M_{jv} + C_{ji} \cdot M_{ji}) \quad (\text{A.2})$$

Donde:

- V_{rp} : Volumen residuos de poda [m^3].
 V_{rj} : Volumen residuos de jardinería [m^3].
 V_c : Volumen camión [$m^3/\text{camión}$].
 N_{cp} : Número de camiones utilizados por poda [camión/día].
 N_{cj} : Número de camiones utilizados por jardinería [camión/(ciclo-empresa)].
 M_p : Meses de poda [mes].
 M_{jv} : Meses de jardinería en verano [mes].
 M_{ji} : Meses de jardinería en invierno [mes].
 E_j : Número de empresas de jardinería [empresa].
 C_{jv} : Número de ciclos de jardinería en verano [ciclos/mes].
 C_{ji} : Número de ciclos de jardinería en invierno [ciclos/mes].

Utilizando los datos de la Tabla A.1 y las Ecuaciones A.2 y A.1 se obtiene lo siguiente:

Residuos de poda:

$$\begin{aligned}
 V_{rp} &= N_{cp} \cdot V_c \cdot M_p \\
 &= 2 \left[\frac{\text{camión}}{\text{día}} \right] \cdot 12 \left[\frac{m^3}{\text{camión}} \right] \cdot 7 [\text{mes}] \\
 &= 24 \left[\frac{m^3}{\text{día}} \right] \cdot 7 [\text{mes}] \cdot 30 \left[\frac{\text{día}}{\text{mes}} \right] \\
 &= 20 \left[\frac{m^3}{\text{día}} \right] \cdot 210 [\text{día}] \\
 &= 5.040 [m^3]
 \end{aligned}$$

Residuos de jardinería:

$$\begin{aligned}
 V_{rj} &= \frac{1}{4} \left[\frac{\text{camión}}{\text{ciclo} \cdot \text{empresa}} \right] \cdot 5 [\text{empresa}] \cdot 12 \left[\frac{m^3}{\text{camión}} \right] \cdot \left(4 \left[\frac{\text{ciclo}}{\text{mes}} \right] \cdot 5 [\text{mes}] + 2 \left[\frac{\text{ciclo}}{\text{mes}} \right] \cdot 7 [\text{mes}] \right) \\
 &= 15 \left[\frac{m^3}{\text{ciclo}} \right] \cdot \left(20 \left[\frac{1}{\text{ciclo}} \right] + 14 \left[\frac{1}{\text{ciclo}} \right] \right) \\
 &= 15 \left[\frac{m^3}{\text{ciclo}} \right] \cdot 34 \left[\frac{1}{\text{ciclo}} \right] \\
 &= 510 [m^3]
 \end{aligned}$$

Así se obtiene un caso base de 5.550 [m^3] de residuos de poda y jardinería donde 510 (9 %) corresponde a césped, 3024 (54 %) a ramas y 2016 (36 %) a hojas.

Si se calcula la masa a la que corresponde cada componente según la Ecuación A.3 se obtienen 305.000 [kg] de ramas (49 %), 204.000 [kg] de hojas (32 %) y 121.000 [kg] de césped (19 %).

$$m = \rho \cdot V \quad (\text{A.3})$$

Donde:

m : Masa [kg].

ρ : Densidad [kg/m³].

V : Volumen [m³].

A.2. Estimación Características Físicoquímicas Generales

Para determinar las características físicoquímicas generales del caso base se utilizarán las características de sus componentes (ramas, hojas y césped) que se muestran en la Tabla A.2.

Tabla A.2: Propiedades físicoquímicas de ramas, hojas y césped

Propiedad	Ramas	Hojas	Césped	Unidad	Referencia
Densidad sin comprimir	101	101	237	[kg/m ³]	[14]
Relación C:N	55	30	17	[kg C/kg N] en base seca	[15]
Humedad	50	50	60	[%] peso	[16]
Cenizas	3	9	7	[%] peso en base seca	[16]

Se realiza una ponderación proporcional determinar las propiedades de los residuos de poda y jardinería del caso base, a continuación se muestra como ejemplo de cálculo el caso de la densidad sin comprimir siguiendo la Ecuación A.4 y los datos de la Tabla A.2.

$$\rho_{sct} = \rho_{scr} \cdot P_r + \rho_{sch} \cdot P_h + \rho_{scc} \cdot P_c \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} \rho_{sct} &= \rho_{scr} \cdot P_r + \rho_{sch} \cdot P_h + \rho_{scc} \cdot P_c \\ &= 101 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 0,49 + 101 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 0,32 + 237 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 0,19 \\ &= 49,0 \left[\frac{kg}{m^3} \right] + 32,6 \left[\frac{kg}{m^3} \right] + 45,5 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \\ &= 167 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \end{aligned}$$

Realizando un cálculo parecido para todas las propiedades, se obtienen las características generales de los residuos de poda y jardín del caso base que se muestran en la Tabla A.3.

Tabla A.3: Características fisicoquímicas generales del caso base

Característica	Valor	Unidad
Densidad sin comprimir	167	[kg/m ³]
Relación C:N	39,6	[kg C/kg N] en base seca
Humedad	51,9	[%] peso
Cenizas	5,89	[%] peso en base seca

Anexo B

Dimensionamientos

B.1. Dimensionamiento Reactor de Compostaje

La Ecuación B.1 define m como la masa en base seca, la cual en un inicio corresponde a 303.000 [kg] si se considera un porcentaje de humedad de 51,9 % como se describió en el Anexo A.2. Por lo tanto la entra de sólidos corresponde al caso base de 630.000 [kg] donde 303.000 corresponde a residuos secos y 327.000 [kg] a agua.

$$-r = -k \cdot \frac{1,066^T}{46,28} \cdot (m(t) - \beta \cdot m_0) \quad (\text{B.1})$$

Donde:

r : Velocidad de reacción en [kg/día].

k : Constante cinética en [1/día].

T : Temperatura en [°C].

$m(t)$: Masa en base seca del compost en el tiempo t [kg].

m_0 : Masa en base seca de la materia prima [kg].

t : Tiempo [día].

β :Factor de equilibrio del compost [kg/kg].

Tabla B.1: Datos y parámetros para cinética de compostaje [43]

Parámetro	Valor	Unidad
k	0,1785	[1/día]
T	60	[°C]
m_0	303.000	[kg/año]
β	0,61	[-]

En base a lo anterior y considerando los datos de la cinética que se muestran en la Tabla B.1 se realiza en programa en MatLab[®] obteniendo 16,5 días de tiempo de residencia y los valores de salida que se muestran en la Tabla B.2.

Tabla B.2: Datos de salida del proceso de compostaje

Especie	Valor [kg/año]
Compost Seco	191.000
CO ₂	164.000
H ₂ O	67.100

Cabe destacar que la cinética se hace en base seca, por lo tanto, los datos de salida no consideran un balance de masa completo.

Para el dimensionamiento se utiliza la expresión que se muestra en la Ecuación B.2, para lo cual es necesario determinar el flujo volumetrico de entrada (F), el cual corresponderá al flujo de material orgánico que entra al reactor precedente de la etapa de conminución.

$$\frac{V}{F} = \tau \quad (\text{B.2})$$

Donde:

V : Volumen del Reactor [m^3].

F : Flujo volumétrico de entrada [$\text{m}^3/\text{día}$].

τ : tiempo de residencia [día].

A la etapa de conminución entran los 630.000 [kg/año] de residuos orgánicos los cuales tiene una densidad de 167 [kg/ m^3], que luego de ser triturados su densidad aumenta a 297 [kg/ m^3], por lo que el volumen de entrada al reactor de compostaje es de 2.120 [$\text{m}^3/\text{año}$] [16].

Determinado el flujo de entrada se utiliza la Ecuación B.2 para determinar el volumen del reactor como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{V}{F} &= \tau \\ V &= \tau \cdot F \\ &= 16,5[\text{día}] \cdot 2.120 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right] \\ &= 16,5[\text{día}] \cdot 2.120 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right] \cdot \frac{1}{365} \left[\frac{\text{año}}{\text{día}} \right] \\ &= 16,5[\text{día}] \cdot 5,81 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right] \\ &= 95,9[\text{m}^3] \end{aligned}$$

B.1.1. Balance de Masa del Reactor de Compostaje

Para corroborar los cálculos anteriores y para determinar claramente las salidas del reactor se realiza un balance de masa del proceso.

En el diagrama de la Figura B.1 se muestran las entradas y salidas de reactor de compostaje.

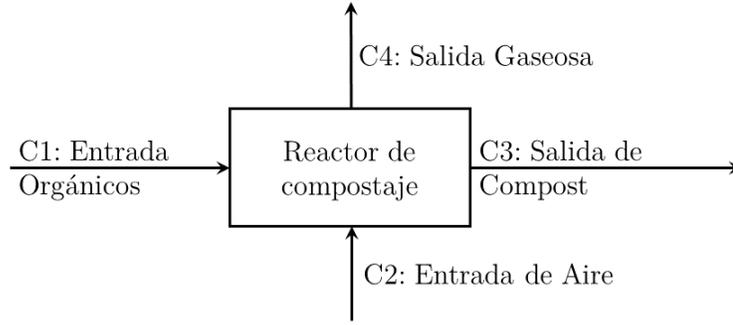


Figura B.1: Diagrama de flujo reactor de compostaje

Para realizar un correcto balance es necesario determinar el flujo de aire que se ingresa. Suponiendo que la reacción de descomposición corresponde a la de la Ecuación B.3 es posible determinar el oxígeno necesario para que se descomponga la materia orgánica del proceso; dicha materia orgánica corresponde a la diferencia entre la materia orgánica seca de entrada y el compost seco de salida lo que corresponde a 112.000 [kg/año].



Luego con el supuesto de que la materia orgánica es principalmente glucosa se determinan los moles de ésta usando la Ecuación B.4 considerando una masa molar 0,180 [kg/mol], para posteriormete determinar esquemáticamente el oxígeno necesario como se muestra a continuación [66]:

$$n = m/PM \quad (B.4)$$

Donde:

n : número de moles [mol].

m : masa [kg].

PM : Peso molecular [kg/mol].

Cálculo moles de glucosa descompuestos:

$$\begin{aligned}
 n &= m/PM \\
 &= \frac{112.000[kg]}{0,180 \left[\frac{kg}{mol} \right]} \\
 &= 622.000[mol]
 \end{aligned}$$

Cálculo moles de oxígeno utilizado:

$$\begin{aligned}
 n_{oxigeno} &= n_{glucosa} \cdot 6 \\
 &= 622.000[mol \text{ de glucosa}] \cdot 6 \left[\frac{\text{mol de oxígeno}}{\text{mol de glucosa}} \right] \\
 &= 3.730.000[mol \text{ de oxígeno}]
 \end{aligned}$$

Cálculo masa de oxígeno utilizado [66]:

$$\begin{aligned}
 n &= m/PM \\
 m &= n \cdot PM \\
 &= 3.730.000[mol] \cdot 0,032 \left[\frac{kg}{mol} \right] \\
 &= 3.730.000[mol] \cdot 0,032 \left[\frac{kg}{mol} \right] \\
 &= 119.000[kg]
 \end{aligned}$$

Considerando que el aire corresponde a 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno [66] la masa de aire necesaria es de 567.000 [kg/año] de aire, sin embargo el oxígeno debe estar en exceso para lo cual se inyecta el triple de lo necesario llegando a un total de 1.700.000 [kg aire/año] [43].

Considerando el oxígeno que se utiliza para la descomposición, la salida de aire es de 1.590.000 [kg/año] de los cuales 239.000 [kg/año] corresponden a oxígeno.

Para hacer un balance de masa del agua, hay que considerar tanto el agua que se genera en el proceso de compostaje como el agua que es arrastrado por el aire y las composiciones de humedad de los residuos orgánicos y el compost. Así se realiza el balance de masa del agua según la Ecuación B.5.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Salida} - \text{Consumo} \quad (\text{B.5})$$

Considerando que no existe acumulación ni consumo de agua, la única entrada es el agua que entra por la humedad de los residuos orgánicos, la generación es solo por la reacción B.3 mientras que existen dos salidas, uno por arrastre y evaporación de agua y otra por la humedad del compost.

El agua de entrada corresponde a 327.000 [kg] como se menciona al principio de este anexo; de la reacción se generan 67.100 [kg].

La humedad de salida del compost (Salida C3) es de 50 % lo que corresponde a 191.000 [kg] [43]. El agua que sale por arrastre y ebullición (Salida C4) se calcula mediante el balance de masa.

$$\begin{aligned} \text{Acumulación} &= \text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Salida} - \text{Consumo} \\ \text{Acumulación} &= \text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Salida C3} - \text{Salida C4} - \text{Consumo} \\ 0 &= 327.000[\text{kg}] + 67.100[\text{kg}] - 191.000[\text{kg}] - \text{Salida 2} - 0 \\ \text{Salida 2} &= 203.000[\text{kg de agua}] \end{aligned}$$

Considerando los datos de la Tabla B.2 y los resultados recientemente calculados se realiza la Tabla B.3 que resumen el balance de masa.

Tabla B.3: Resumen del balance de masa en reactor de compostaje

Flujo	Orgánico Seco	Nitrogeno	Oxigeno	Compost Seco	CO ₂	H ₂ O
C1	303.000	0		0	0	327.000
C2	0	1.350.000	358.000	0	0	0
C3	0	0		191.000	0	191.000
C4	0	1.350.000	238.000	0	164.000	203.000

De la Tabla se desprende que entran 2.338.000 [kg] al sistema y salen 2.337.000 [kg], la diferencia de 1.000 [kg] se debe a los errores de aproximación y truncamiento de los cálculos y el programa utilizado.

B.2. Dimensionamiento Digestor Anaeróbico

La cinética que muestra la Ecuación B.6 determina a S como el sustrato, es decir la materia orgánica seca, al igual que el caso aeróbico [46]. La Tabla B.4 contiene el valor de los parámetros de la cinética.

$$-r = -\mu_{m\acute{a}x} \cdot (S_t - \alpha \cdot S_0) \quad (\text{B.6})$$

Donde:

r : Velocidad de reacción en [kg/día].

$\mu_{m\acute{a}x}$: la velocidad máxima de crecimiento de microorganismos [1/día].

S_t : Sustrato en el tiempo t [kg].

S_0 : Sustrato inicial [kg].

α : Factor de no-biodegradabilidad [kg/kg].

Tabla B.4: Datos y parámetros para cinética de biodigestión anaeróbica seca termofílica [46]

Parámetro	Valor	Unidad
$\mu_{m\acute{a}x}$	0,1883	[1/día]
S_0	303.000	[kg/año]
α	0,3178	[-]

Análogamente al caso del aeróbico, se realiza la simulación en MatLab[®] obteniendo un tiempo de residencia de 18 días y los datos de salida que se muestran en la Tabla B.5.

Tabla B.5: Datos de salida del proceso de digestión seca termofílica

Especie	Valor [kg/año]
Bioabono seco	106.000
CH ₄	88.500
CO ₂	108.000

Antes de dimensionar el reactor, es necesario determinar el volumen de agua que se requiere ingresar, el cual corresponde a 0,05 [m³] de agua por tonelada de residuo húmedo a tratar, resultado un total de 31,5 [m³/año] (31.500 [kg/año]) para un caso base de 630.000 [kg/año] de residuos.

Considerando que los residuos que entran al digester tuvieron un previo tratamiento para disminuir el tamaño de partícula se determina que el volumen de residuos que entra al digester es de 2.120 [m³/año], igualmente que en caso anaeróbico. Así el flujo de entrada al reactor es de 2.150 [m³/año].

Se calcula el volumen del biodigester análogamente al reactor de compostaje usando la Ecuación B.2, obteniendo un volumen de 110 [m³].

B.2.1. Balance de Masa del Digestor Anaeróbico

Al igual que el caso anterior la simulación se hace en base seca, por tanto no resulta ser un balance de masa completo, quedando el balance de masa del agua incompleto.

En el diagrama de la Figura B.2 se muestran las entradas y salidas del digester anaeróbico.

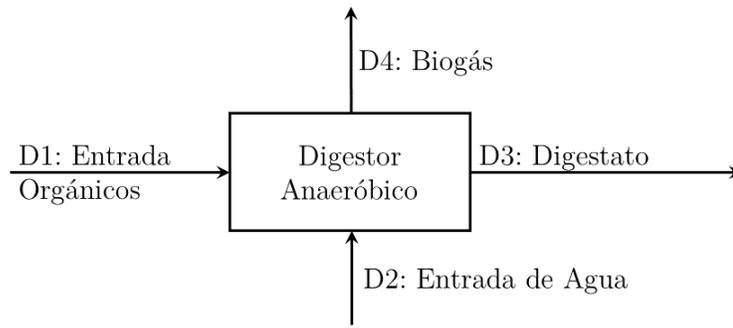


Figura B.2: Diagrama de flujo reactor de digestión seca termofílica

Para realizar el balance de masa se seguirá la expresión de la Ecuación B.5, donde no existe acumulación, generación ni consumo de agua, la entrada corresponde al agua que entra por la humedad de los residuos (327.000 [kg]) y el agua extra añadida (31.500 [kg]), la salida corresponde al agua que sale con el digestato la cual será calculada con el balance de masa:

$$\begin{aligned} \text{Acumulación} &= \text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Salida} - \text{Consumo} \\ \text{Acumulación} &= \text{Entrada D1} + \text{Entrada D2} + \text{Generación} - \text{Salida} - \text{Consumo} \\ 0 &= 327.000[\text{kg}] + 31.500[\text{kg}] + 0 - \text{Salida} - 0 \\ \text{Salida} &= 359.000[\text{kg}] \end{aligned}$$

Considerando los datos de la Tabla B.5 y los resultados recientemente calculados se realiza la Tabla B.6 que resumen el balance de masa del digestor.

Tabla B.6: Resumen del balance de masa en reactor de digestión seca termofílica

Flujo	Orgánico Seco	H ₂ O	BioAbono	CH ₄	CO ₂
D1	303.000	327.000	0	0	0
D2	0	31.500	0	0	0
D3	0		0	88.500	108.000
D4	0	359.000	106.000	0	0

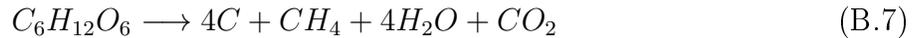
De la Tabla B.6 se desprende que entran 662.000 [kg] al reactor y salen 662.000 [kg], lo cual muestra un correcto balance de masa global.

Cabe mencionar que el bioabono sale con una humedad del 77 % lo que es una humedad muy alta para ser comercializado, entonces, es necesario retirar agua con un secador el cual disminuye la humedad a un 60 %, extrayendo un total de 200.000 [kg] de agua [46][25]. Así se obtienen 266.000 [kg] de bioabono comercializable.

B.3. Dimensionamiento Gasificador

La materia orgánica antes de entrar al gasificador, debe ser secada previamente hasta por lo menos un 15% de humedad [36]. Así lo que entra al gasificado son 356.000 [kg] de residuos, de los cuales 53.400 [kg] son agua, 17.9 [kg] corresponden a ceniza y 285.000 [kg] a materia orgánica combustible.

La primera reacción que ocurre en la gasificador es la de pirólisis, tal como se muestra en la Ecuación B.7, ésta ocurre rápidamente, por ello, que no se considerará en el dimensionamiento. De la reacción se obtiene lo siguiente:



Antes es necesario determinar los moles de glucosa correspondientes a la materia orgánica que entran, esto se realiza utilizando la Ecuación B.4 obteniendo como resultado 1.580.000 moles de glucosa, entonces siguiendo la relación estequiométrica de la Ecuación B.7 se tiene como resultado lo mostrado en la Tabla B.7.

Tabla B.7: Productos de la reacción de pirólisis en [mol]

Producto	C	CH ₄	CO ₂	H ₂ O
Moles	6.330.000	1.580.000	1.580.000	6.330.000

A lo anterior hay que sumarle el agua proveniente de la humedad de los residuos (2.970.000 moles) obteniendo 9.300.000 moles de agua.

Luego viene la etapa de gasificación donde ocurren las reacciones B.8 a la B.15, siendo que la ocurre primero es la B.8 debido a que es más de tres veces más rápida que las otras, por su velocidad tampoco se considera para el dimensionamiento [48]. En la Tabla B.8 se muestra el resultado de la reacción, donde se utiliza el carbono de la etapa de pirólisis y oxígeno suficiente para que la reacción sea completa, lo que corresponde a 3.170.000 moles de oxígeno según la estequiometría.

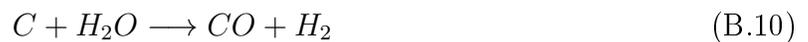




Tabla B.8: Productos de la primera reacción de gasificación en [mol]

Especie	C	O ₂	CO
Reactantes [mol]	6.330.000	3.170.000	0
Productos [mol]	0	0	6.330.000

Debido a que la reacción B.8 consume todo el carbono presente, las reacciones B.9 y B.10 no pueden ocurrir, así que la siguiente reacción en ocurrir es la B.13, que es la siguiente más rápida. Ésta no ocurre completamete, ya que el aire que se inyecta contiene suficiente oxígeno para que la reacción B.8 ocurra completamente y la B.13 ocurra en un 70 % [49] [50]. En la Tabla B.9 se muestran los resultados de dicha reacción.

Tabla B.9: Productos de la primera reacción de gasificación en [mol]

Especie	CO	O ₂	CO ₂
Reactantes [mol]	6.330.000	2.220.000	0
Productos [mol]	1.900.000	0	4.430.000

A lo anterior hay que agregarle el CO₂ que se generó en el proceso de pirólisis sumando un total de 6.020.000 moles de CO₂ hasta este momento.

Debido a que la Ecuación B.13 consumió todo el oxígeno que fue inyectado las Ecuaciones B.11 y B.12 no pueden ocurrir, entonces, las reacciones de las Ecuaciones B.14 y B.15 son las siguientes en ocurrir, y cómo corresponden a las reacciones más lentas, estas son las simuladas y utilizadas para el dimensionamiento.

Las cinéticas de las reacciones B.14 y B.15 se expresan en las Ecuaciones B.16 y B.17 respectivamente y en las Tabla B.10 los valores de los parámetros utilizados en la simulación en MatLab® [48][51].

$$-r = A_f \cdot T^{n_f} \cdot \exp - \frac{E_f}{R \cdot T} \cdot [CH_4] \cdot [H_2O] \cdot -A_b \cdot T^{n_b} \cdot \exp - \frac{E_b}{R \cdot T} \cdot [CO] \cdot [H_2]^3 \quad (B.16)$$

$$\exp - \frac{(-32,197 + 0,031 \cdot T) \cdot 1000}{R \cdot T} \cdot [CO] \cdot [H_2O] \quad (B.17)$$

Donde:

A_f y A_b : Factores pre-exponenciales [-].

T : Temperatura [K].

nf y nb : Factores de temperatura [-].
 E_f y E_b : Energías de activación [J/mol].
 R : Constante general de los gases.[J/K·mol].
 $[CH_4]$: Concentración de metano [mol/m³].
 $[H_2O]$: Concentración de agua [mol/m³].
 $[CO]$: Concentración de monóxido de carbono [mol/m³].
 $[H_2]$: Concentración de hidrógeno [mol/m³].

Tabla B.10: Datos y parámetros para reacciones de gasificación [48][51]

Parámetro	Valor	Unidad
A_f	$4,4 \cdot 10^{11}$	[-]
A_b	$5,12 \cdot 10^{-14}$	[-]
T	1.173	[K]
nf	0	[-]
nb	0	[-]
E_f	$1,68 \cdot 10^5$	[J/mol]
E_b	27,3	[J/mol]
R	8,31	[J/K · mol]

Antes simular las reacciones, es necesario describir las cinéticas de forma que queden en función del largo, para esto se supone que la velocidad es constante en todo el reactor, y el cambio ocurre como se muestra en la Ecuación B.18.

$$-r = \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial(z/v)} = \frac{v \cdot \partial C}{\partial z} \quad (\text{B.18})$$

La velocidad se calcula en función de los gases que existen al momento de iniciar las reacciones que se simularán resumidas en la Tabla B.11, y la ecuación general de los gases que se muestran en la Ecuación B.19. La presión dentro del gasificador será de 1 atm [67].

Tabla B.11: Composición de los gases del gasificador antes de la simulación

Especie	moles [mol/año]
CH_4	1.580.000
CO_2	6.020.000
H_2O	9.300.000
CO	1.900.000
Total	18.800.000

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{B.19})$$

Donde:

P : Presión [Pa].

V : Volumen [m^3].

n : moles [mol].

R : Constante general de los gases. [$J/(K \cdot mol)$].

T : Temperatura [K].

Considerando las condiciones de operacion se utiliza la Ecuación B.19, pero en este caso, en vez de utilizar el número de moles, se utiliza un flujo molar, por tanto, el resultado no es un volumen, sino un flujo volumétrico:

$$\begin{aligned} P \cdot V &= n \cdot R \cdot T \\ V &= \frac{n \cdot R \cdot T}{P} \\ &= \frac{18.800.000 \left[\frac{mol}{año} \right] \cdot 8,31 \left[\frac{J}{K \cdot mol} \right] \cdot 1.173}{101.000} \\ &= 0,0574 \left[\frac{m^3}{s} \right] \end{aligned}$$

De lo anterior se obtuvo un flujo volumétrico, pero no la velocidad, entonces se calcula la velocidad usando la Ecuación B.20 para lo cual es necesario estimar el área transversal del gasificador. Se estima en primera instancia un diámetro de 20 [cm], resultando un área de 0,0314 m^2 , este valor será ratificado luego de la simulación, ya que si el largo del reactor es más de 10 veces el diámetro se debe iterar el proceso desde este punto aumentando o disminuyendo el valor del diámetro [68].

$$v = \frac{F}{A} \tag{B.20}$$

Donde:

F : Flujo volumétrico [m^3/s].

v : Velocidad [m/s].

A : Área [m^2].

Cálculo de velocidad:

$$\begin{aligned}
v &= \frac{F}{A} \\
&= \frac{0,0574 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{0,0314 [m^2]} \\
&= 1,83 \left[\frac{m}{s} \right]
\end{aligned}$$

Con los datos de la Tabla B.11 y los cálculos anteriores se calcula la concentración de los gases en el gasificador usando la Ecuación B.21.

$$C = \frac{F}{V} \quad (B.21)$$

Donde:

C : Concentración [mol/(m³ · s)].

Se utiliza como ejemplo de cálculo el CH₄ y en la Tabla B.12 se muestra la concentración de todas las sustancias:

$$\begin{aligned}
C &= \frac{F}{V} \\
&= \frac{1.580.000 \left[\frac{mol}{año} \right]}{0,0574 \left[\frac{m^3}{s} \right]} \\
&= \frac{1.580.000 \left[\frac{mol}{año} \right]}{0,0574 \left[\frac{m^3}{s} \right]} \\
&= 0,875 \left[\frac{mol}{m^3} \right]
\end{aligned}$$

Tabla B.12: Concentración de los gases del gasificador antes de la simulación

Especie	Concentración [mol/m ³]
CH ₄	0,875
CO ₂	3,32
H ₂ O	5,14
CO	1,05

Determinado todos los parámetros se simula el programa, donde se obtiene un largo de 1,6 metros de gasificador, que es menos de 10 veces el diámetro, por lo que no se vuelve a iterar cambiando el valor del diámetro del gasificador. En la Tabla B.13 se muestran los resultados de la salida del gasificador.

Tabla B.13: Datos de salida del proceso de gasificación

Especie	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	CO	H ₂
Flujo [kg/año]	3,27·10 ⁻⁸	398.000	84.600	12.900	15.500

B.3.1. Balance de Masa del Gasificador

Se realiza el balance de masa considerando los resultados anteriores en base al diagrama que se muestra en la Figura B.3.

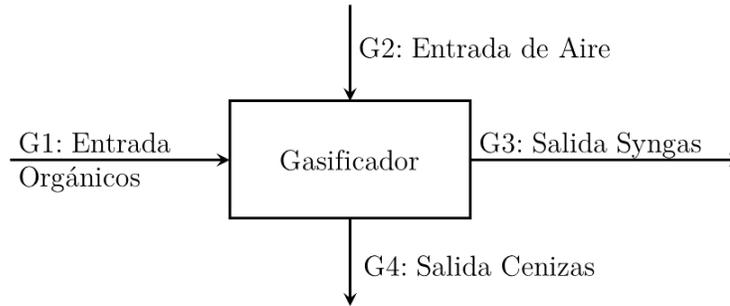


Figura B.3: Diagrama de flujo del gasificador

El flujo G1 está caracterizado por la entrada de materia prima con un 15% de humedad como se expresó al principio de la sección. El flujo G4 son las cenizas que salen del proceso que corresponden a 17.900 [kg/año], El flujo G2 corresponde al aire que se ingresa como agente gasificante.

El flujo G3 corresponde al Syngas el cual tiene una composición como se mostró en la Tabla B.13 más el nitrógeno que proviene del aire y no participó de la reacción. Así la Tabla B.14 resume el balance de masa del gasificador.

Tabla B.14: Resumen del balance de masa en gasificador en [kg/año]

Flujo	Orgánico	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	O ₂	CO	H ₂	N ₂	Cenizas
G1	285.000	0	0	53.400	0	0	0	0	17.900
G2	0	0	0	0	172.000	0	0	567.000	0
G3	0	3,27·10 ⁻⁸	398.000	84.700	0	12.900	15.500	567.000	0
G4	0	0	0	0	0	0	0	0	17.900

De la Tabla B.14 se desprende que entran 1.100.000 [kg/año] al gasificador y salen 1.100.000 [kg/año] por lo que balance de masa global está correcto.

B.4. Código de Programas

B.4.1. Función EDO Reacción Aeróbica

```
1 function [dm] = compostaje(t,m,k,T,beta,m0)
2 dm=zeros(3,1);
3 dm(1)=-k*(1.066)^(T)/46.28*(m(1)-beta.*m0); % Descomposicion de
   materia organica
4 dm(2)=(k*(1.066)^(T)/46.28*(m(1)-beta.*m0))/0.180*0.044*6;%
   Generacion de CO2
5 dm(3)=(k*(1.066)^(T)/46.28*(m(1)-beta.*m0))/0.180*0.018*6;%
   Generacion de Agua
6 end
```

B.4.2. Función EDO Reacción Anaeróbica

```
1 function [ds]=digestion(t,s,mu_s,s0,alpha)
2 ds=zeros(3,1);
3 ds(1)=-mu_s*(s(1)-alpha*s0); % Descomposicion de materia organica
4 ds(2)=(mu_s*(s(1)-alpha*s0))*2.3*0.656/(2.3*0.656+1.842); %
   Generacion de CH4
5 ds(3)=(mu_s*(s(1)-alpha*s0))*1.842/(2.3*0.656+1.842); % Generacion
   de CO2
6 end
```

B.4.3. Función EDO Reacción de Valorización

```
1 function [dg] = gasificacion(t,g,R,T,Af,nf,Ef,Ab,nb,Eb,u)
2 dg=zeros(5,1);
3
4 CO=g(1); % x(1) es la concentracion de CO
5 H2O=g(2); % x(2) es la concentracion del agua
6 CO2=g(3); % x(3) es la concentracion del CO2
7 H2=g(4); % x(4) es la concentracion de H2
8 CH4=g(5); % x(5) es la concentracion de CH4
9 %% Vel consumo CO:
10 % opcion 1
11 dG=(-32.197+0.031*T-1774.7/T)*1000;
12 K=exp(-dG/(R*T));
13 r=K*CO*H2O;
14 %% Vel consumo CH4
15 rmet=(Af*T^(nf)*exp(-Ef/(R*T))*CH4*H2O)-(Ab*T^(nb)*exp(-Eb/(R*T))*
   CO*(H2^3));
```

```

16 %%Ecuacion diferencial:
17 %Ec para CO
18 dCO=(-r+rmet)/u;
19 %Ec para H2O
20 dH2O=(-r-rmet)/u;
21 %Ec para CO2
22 dCO2=r/u;
23 %Ec para H2
24 dH2=(r+3*rmet)/u;
25 %Ec para CH4
26 dCH4=-rmet/u;
27 %% Respuesta
28 dg(1)=dCO;
29 dg(2)=dH2O;
30 dg(3)=dCO2;
31 dg(4)=dH2;
32 dg(5)=dCH4;
33 end

```

B.4.4. Programa Central de la Simulación

```

1 clear all
2 clc
3
4 %% Compostaje
5 k=0.1785; % [1/dia]
6 T=60; % [C]
7 beta=0.61; % [-]
8 m0= 302868/365; % [kg/dia]
9
10 y0=[m0 0 0];
11 [Tm,M]=ode45(@(t,m)compostaje(t,m,k,T,beta,m0),[0 40],y0);
12
13
14 figure
15 plot(Tm,M)
16 % Deterinar Punto de operacion
17 Mp=(M(:,2)-M(end,2))/M(end,2);
18 Mp5=abs(abs(Mp)-0.05); % 5%
19 [Mf Pf]=min(Mp5);
20 ToC=Tm(Pf);
21 hold on
22 plot(ToC*ones(length(M(:,1))+1),[0 M(:,1)'],'k')
23 hold off
24

```

```

25 %% Biodigestion
26 mu_s=0.1883; % 1/dia
27 Ts=[0:0.1:40];
28 alpha=0.3178;
29 s0=302868/365;
30 S0=[s0 0 0];
31 [Ts,S]=ode45(@(t,s) digestion(t,s,mu_s,s0,alpha),[0 40],S0);
32
33
34 figure
35 plot(Ts,S)
36 Sp=(S(:,2)-S(end,2))/S(end,2);
37 Sp5=abs(abs(Sp)-0.05);
38 [Sf Psf]=min(Sp5);
39 ToCs=Ts(Psf);
40 hold on
41 plot(ToCs*ones(length(S(:,1))+1),[0 S(:,1)'],'k')
42
43 %% Gasificacion
44 A=pi*0.10^2; %m^2
45
46 CH4= 1583432/365/24/3600;
47 CO2=6017041/365/24/3600;
48 H2O=9303022/365/24/3600;
49 CO=1900118/365/24/3600;
50 H2=0;
51 P=202650/2;
52 R= 8.314472; % [J/(K mol)]
53 TG=900+273; % [K]
54 Af=4.4e11/1000;
55 nf=0;
56 Ef= 1.68e8/1000; % [J/mol]
57 Ab= 5.12e-14/1000 ;
58 nb=0;
59 Eb= 2.73e4/1000 ; % [J/mol]
60 u=(CH4+CO2+H2O+CO)*R*TG/P/A;
61 z0=[CO/(A*u) H2O/(A*u) CO2/(A*u) H2/(A*u) CH4/(A*u)];
62 [Tg,G]=ode23s(@(t,g) gasificacion(t,g,R,TG,Af,nf,Ef,Ab,nb,Eb,u),[0
5],z0);
63
64 figure
65 plot(Tg,G)
66 legend('CO','H2O','CO2','H2','CH4')
67
68 Gp=(G(:,4)-G(end,4))/G(end,4);
69 Gp5=abs(abs(Gp)-0.05);
70 [Gf Pgf]=min(Gp5);

```

```
71 ToCg=Tg(Pgf);  
72 hold on  
73 plot(ToCg*ones(length(G(:,3))+1),[0 G(:,3)'],'k')
```

Anexo C

Evaluaciones

C.1. Evaluación Económica

Para la evaluación económica se realizará un flujo de caja sobre los tres tecnologías, tomando en cuenta un horizonte de 15 años, ya que este es el tiempo de vida útil de los equipos y una tasa de descuento del 6 % que es lo comúnmente utilizado en proyectos fiscales [59][60]. El IVA que se aplica es del 19 % y los impuestos por utilidades son del 25 % [69].

Luego del flujo de caja se calculará el valor actual neto (VAN) usando la Ecuación C.1.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{V_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (C.1)$$

Donde:

VAN : Valor actual neto [CLP].

t : Periodo [años].

n : Periodos considerados [años].

V_t : Flujo de caja para el periodo t [CLP].

r : Tasa de descuento [-].

I_0 : Inversión Inicial [-].

C.1.1. Evaluación Económica del Proceso de Compostaje

Inversión

La inversión será estimada en base a lo explicitado por [53] donde se explicita que la inversión total en proyectos de compostaje, que incluye tanto los equipos de conminución y

de compostaje, está entre los 25.000 y 50.000 dólares por tonelada diaria procesada, el proceso considera aproximadamente 2 [ton/día] por lo que la inversión máxima será de 100.000 [USD]. Este valor se transforma a pesos considerando que 1 dolar equivale a 639 [CLP] obteniendo así una inversión de 63.900.000 [70].

Como la estimación se hace considerando condiciones del año 2002 es necesario realizar un ajuste al año 2016, para esto se utiliza el indicador CEPCI como se muestra en la Ecuación C.2 [58].

$$P_1 \cdot \frac{CEPCI_2}{CEPCI_1} = P_2 \quad (C.2)$$

Donde:

P_1 : Precio del año 1 [CLP]

P_2 : Precio del año 2 [CLP]

$CEPCI_1$: Indicador CEPCI para el año 1 [-]

$CEPCI_2$: Indicador CEPCI para el año 2 [-]

Considerando un CEPCI para el año 2002 de y para el año 2016 de [58] se aplica la Ecuación C.2 para la inversión como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} P_{2002} \cdot \frac{CEPCI_{2016}}{CEPCI_{2002}} &= P_{2016} \\ 63.900.000[CLP] \cdot \frac{536,5}{395,6} &= P_{2016} \\ 86.700.000[CLP] &= P_{2016} \end{aligned}$$

Costos Operacionales

Los Costos operacionales referidos a la electricidad se estiman a partir del gasto energético de los equipos lo que corresponde a 2 [kW] y el precio de la electricidad de 113 [CLP/(kWh)] [54][55]. Considerando 24 horas de operación se obtiene un gasto anual de 17.500 [kWh] correspondiente a 1.980.000 [CLP].

Otros Costos operacionales corresponden al sueldo del personal necesario, este personal será de una persona a medio tiempo, con un sueldo bruto de 250.000 [CLP/mes] [54] [56]. Considerando los 12 meses de operación se tiene un gasto de 3.000.000 [CLP] al año. Así los gastos operacionaes ascienden a los 4.980.000 [CLP].

Ingresos

El reactor produce 380.000 [kg] de compost al año, considerando un precio de venta de 60 [CLP/kg], se obtiene un ingreso total de 20.900.000 [CLP].

Del proceso de dimensionamiento se obtuvo que se producen 380.000 [kg] de compost al año, el cual tiene un precio de venta de 60 [CLP/kg] [25][57]. Así, el ingreso total es de 20.900.000 [CLP] al año.

Depreciaciones y Ganancias o Perdidas de Capital

Se asume que los equipos se deprecian a través de los 15 años de vida útil de forma lineal hasta alcanzar un valor de 0 [CLP] al año 15, así, la depreciación anual es de 5.780.000.

También se considerará que al finalizar los 15 años los equipos no serán vendidos, entonces, no existirá pérdida o ganancia de capital en el año 15.

Flujo de Caja y Cálculo del VAN

Con las consideraciones antes mencionadas se realiza el flujo de caja que se presenta en las Tablas C.1 C.2 C.3

Tabla C.1: Flujo de caja proceso de compostaje del año 0 al año 6 en [CLP]

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
(+) Ingresos por Compost		20.900.000	20.900.000	20.900.000	20.900.000	20.900.000	20.900.000
(-) OPEX		-4.979.760	-4.979.760	-4.979.760	-4.979.760	-4.979.760	-4.979.760
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital							
(-) Depreciaciones		-5.777.275	-5.777.275	-5.777.275	-5.777.275	- 5.777.275	-5.777.275
(-) Pérdidas ejercicio anterior							
(=) Utilidad antes de Impuesto		10.142.965	10.142.965	10.142.965	10.142.965	10.142.965	10.142.965
(-) Impuesto (25%)		-2.535.741	-2.535.741	-2.535.741	-2.535.741	-2.535.741	-2.535.741
(=) Utilidad después de Impuesto		7.607.224	7.607.224	7.607.224	7.607.224	7.607.224	7.607.224
(+) Depreciaciones		5.777.275	5.777.275	5.777.275	5.777.275	5.777.275	5.777.275
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital							
(+) Pérdida ejercicio anterior							
(=) Flujo de caja Operacional		13.384.499	13.384.499	13.384.499	13.384.499	13.384.499	13.384.499
(-) Inversiones	-86.659.125						
(-) IVA de la inversión	-16.465.234						
Recuperación del IVA de la inversión		16.465.234					
(+) Valor Residual de los activos							
(=) Flujo de Capitales	-103.124.359	16.465.234	0	0	0	0	0
Flujo de caja Neto	-103.124.359	29.849.733	13.384.499	13.384.499	13.384.499	13.384.499	13.384.499

Tabla C.2: Flujo de caja proceso de compostaje del año 7 al año 13 en [CLP]

	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13
(+) Ingresos por Compost	20.900.000	20.900.000	20.900.000	20.900.000	20.900.000	20.900.000	20.900.000
(-) OPEX	-4.979.760	-4.979.760	-4.979.760	-4.979.760	-4.979.760	-4.979.760	-4.979.760
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital							
(-) Depreciaciones	-5.777.275	-5.777.275	-5.777.275	-5.777.275	-5.777.275	-5.777.275	-5.777.275
(-) Pérdidas ejercicio anterior							
(=) Utilidad antes de Impuesto	10.142.965	10.142.965	10.142.965	10.142.965	10.142.965	10.142.965	10.142.965
(-) Impuesto (25 %)	-2.535.741	-2.535.741	-2.535.741	-2.535.741	-2.535.741	-2.535.741	-2.535.741
(=) Utilidad después de Impuesto	7.607.224	7.607.224	7.607.224	7.607.224	7.607.224	7.607.224	7.607.224
(+) Depreciaciones	5.777.275	5.777.275	5.777.275	5.777.275	5.777.275	5.777.275	5.777.275
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital							
(+) Pérdida ejercicio anterior							
(=) Flujo de caja Operacional	13.384.499	13.384.499	13.384.499	13.384.499	13.384.499	13.384.499	13.384.499
(-) Inversiones							
(-) IVA de la inversión							
(+) Recuperación del IVA de la inversión							
(+) Valor Residual de los activos							
(=) Flujo de Capitales	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de caja Neto	13.384.499						

Tabla C.3: Flujo de caja proceso de compostaje del año 14 al año 15 en [CLP]

	Año 14	Año 15
(+) Ingresos por Compost	20.900.000	20.900.000
(-) OPEX	-4.979.760	-4.979.760
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital		0
(-) Depreciaciones	-5.777.275	-5.777.275
(-) Pérdidas ejercicio anterior		
(=) Utilidad antes de Impuesto	10.142.965	10.142.965
(-) Impuesto (25 %)	-2.535.741	-2.535.741
(=) Utilidad después de Impuesto	7.607.224	7.607.224
(+) Depreciaciones	5.777.275	5.777.275
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital		0
(+) Pérdida ejercicio anterior		
(=) Flujo de caja Operacional	13.384.499	13.384.499
(-) Inversiones		
(-) IVA de la inversión		
(+) Recuperación del IVA de la inversión		
(+) Valor Residual de los activos		0
(=) Flujo de Capitales	0	0
Flujo de caja Neto	13.384.499	13.384.499

En base al flujo de caja se realiza el calculo del VAN usando la Ecuación C.1 como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 VAN &= \sum_{t=0}^n \frac{V_t}{(1+r)^t} - I_0 \\
 VAN &= \sum_{t=0}^{15} \frac{V_t}{(1+0,08)^t} - 103.124.359 \\
 VAN &= \frac{29.849.700}{1,06^1} + \frac{13.384.499}{1,06^2} + \frac{13.384.499}{1,06^3} + \dots + \frac{13.384.499}{1,06^{15}} - 103.124.359 \\
 VAN &= 28.160.125 + 11.912.156 + 11.237.883 + \dots + 5.584.884 - 103.124.359 \\
 VAN &= 42.402.465
 \end{aligned}$$

C.1.2. Evaluación Económica del Proceso de Digestión Anaeróbica

Inversión

En esta ocasión, se estimará la inversión de los equipos utilizando el trabajo de [31], en él se procesan 14 toneladas hora de residuos, mientras que éste trabajo es de sólo 2 toneladas, por lo tanto es necesario ajustar los precios.

La inversión se enfocará en los equipos de conminución, secado, purificador de gases, el biodigestor y el equipo de cogeneración, los cuales tienen un precio para el año 2015 según el trabajo de [31] como se muestran en la Tabla C.4.

Tabla C.4: Costos de referencia del los equipos para el proceso de digestión anaeróbica [31]

Equipo	Precio [USD]
Digestor y Conminución	543.819
Secado (Filtro)	129.279
Tratamiento de Gases (Absorbedor, Desorbedor y Enfriador)	145.026
Equipo de Cogeneracion	1.061.305

Los valores presentados serán ajustados usando la regla de los seis décimos [71] que se muestra en la Ecuación C.3.

$$C_y = C_x \cdot \left(\frac{V_y}{V_x}\right)^{\frac{6}{10}} \quad (C.3)$$

Donde:

C_y : Costo para el equipo y.

C_x : Costo para el equipo x.

V_y : Parámetro característico de y.

V_x : Parámetro característico de x.

Como sólo se dimensionó el digester, su precio será ajustado con respecto a su parámetro característico usando la Ecuación C.3, el volumen de reactor de digester usado por [31] es de 5.900 [m³] mientras que el digester dimensionado es de 110 [m³].

$$C_y = C_x \cdot \left(\frac{V_y}{V_x} \right)^{\frac{6}{10}}$$
$$C_y = 543.819[CLP] \cdot \left(\frac{110[m^3]}{5.900[m^3]} \right)^{\frac{6}{10}}$$
$$C_y = 49.863[CLP]$$

Se tomará como supuesto que el precio del digester corresponderá siempre al mismo porcentaje del costo total de los equipos, en este caso 28,9 %, en consecuencia, el precio de los otros equipos corresponderá al porcentaje restante alcanzado un valor total de 122.463 [USD]. Así la inversión total será de 172.326 [USD] equivalente a 110.116.192 [CLP].

El valor de los equipos se ajusta al año 2016 usando el indicador CEPCI como se muestra en la Ecuación C.2 considerando que el precio calculado es del año 2015 el cual tiene un CEPCI de 556,8 [58] y del año 2016 es del 536,5. Así calculando el costo actual como se mostró en el caso del compostaje se obtiene una inversión de 106.101.540 [CLP].

Costos Operacionales

En este caso, el consumo de energía se estima, usando la regla de los seis décimos, a 5 [kWh] gastando un total de 43.800 [kWh] en un año [31]. Sin embargo este será suministrado por la misma planta ya que genera más energía que la gastada como se verá más adelante. Por lo tanto no existe costos por energía.

Por otro lado, es necesario tener constantemente un operario en la planta, para ello, se consideran 4 turnos rotativos de 6 horas diarias en promedio, con un sueldo de 500.000 [56] cada operario, alcanzando un gasto de 24.000.000 [CLP].

Ingresos

En este caso existen dos ingresos, la venta de energía eléctrica al SIC y la del bioabono.

Para el caso de la energía eléctrica, se calcula la energía que produce el biogás generado considerando que potencial calorífico inferiro del metano, para no sobreestimar la energía

producida, que corresponde a 50 [MJ/kg] y la eficiencia del equipo de cogeneración que es del 40 % [31]. Para el cálculo de la energía se utiliza la Ecuación C.4.

$$E = PCI \cdot F \cdot \zeta \quad (C.4)$$

Donde:

E : Energía [MJ/año].

PCI : Poder Calorífico Inferior [MJ/kg].

F : Flujo de combustible [kg/año].

ζ : Eficiencia del equipo.

Calculo de la energía producida en el equipo de cogeneración:

$$\begin{aligned} E &= PCI \cdot F \cdot \zeta \\ E &= 50 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \cdot 85.500 \left[\frac{kg}{año} \right] \cdot 0,4 \\ E &= 1.770.000 \left[\frac{MJ}{año} \right] \\ E &= 491.677 \left[\frac{kW \cdot h}{año} \right] \end{aligned}$$

Para estimar el precio de venta de la energía se utiliza lo dicho por la ley 20.571 sobre generación distribuida, que norma la venta de energía al SIC de los lugares residenciales, si bien, el proyecto no es dentro de un residencia es útil para tener una estimación de ese precio. De la ley es posible desprender que el precio corresponde al costo de producción de la energía la cual suele ser la mitad del precio de venta, en este caso 60 [CLP/kWh] [61][55].

Al consumo total hay que restarle el autoconsumo que alcanza los 43.800 [kWh/año] como se calculó anteriormente, por lo tanto la energía anual que se vende al SIC son 447.867 [kWh] a 26.872.000 [CLP].

El bioabono al tener características parecidas al del compost se venderá a un precio parecido, pero menor, puesto que es de menor calidad, estimando un precio de 35 [CLP/kg], así, considerando una producción de 26.500 [kg] de bioabono, los ingreso por esta venta son de 9.275.000 [CLP].

Depreciaciones y Ganancias o Perdidas de Capital

Se utilizan los mismos supuestos del caso anterior, por ende, la depreciación anual por los 15 años es de 7.073.434 [CLP]. Tampoco se considerará venta de equipos por lo que no existirán ganancia o pérdidas de capital.

Flujo de Caja y Cálculo del VAN

Con las consideraciones antes mencionadas se realiza el flujo de caja que se presenta en las Tablas C.5 C.6 C.7

Tabla C.5: Flujo de caja proceso de digestión anaeróbica del año 0 al año 6 en [CLP]

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
(+) Ingresos por Bioabono		9.275.000	9.275.000	9.275.000	9.275.000	9.275.000	9.275.000
(+) Ingresos por Biogás (Energía)		26.872.000	26.872.000	26.872.000	26.872.000	26.872.000	26.872.000
(-) OPEX		-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital							
(-) Depreciaciones		-7.073.436	-7.073.436	-7.073.436	-7.073.436	-7.073.436	-7.073.436
(-) Pérdidas ejercicio anterior							
(=) Utilidad antes de Impuesto		5.073.564	5.073.564	5.073.564	5.073.564	5.073.564	5.073.564
(-) Impuesto (25 %)		-1.268.391	-1.268.391	-1.268.391	-1.268.391	-1.268.391	-1.268.391
(=) Utilidad después de Impuesto		3.805.173	3.805.173	3.805.173	3.805.173	3.805.173	3.805.173
(+) Depreciaciones		7.073.436	7.073.436	7.073.436	7.073.436	7.073.436	7.073.436
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital							
(+) Pérdida ejercicio anterior							
(=) Flujo de caja Operacional		12.147.000	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609
(-) Inversiones	-106.101.540						
(-) IVA de la inversión	-20.159.293						
Recuperación del IVA de la inversión		20.159.293					
(+) Valor Residual de los activos							
(=) Flujo de Capitales	-126.260.832	20.159.293	0	0	0	0	0
Flujo de caja Neto	-126.260.832	32.306.293	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609

Tabla C.6: Flujo de caja proceso de digestión anaeróbica del año 7 al año 13 en [CLP]

	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13
(+) Ingresos por Bioabono	9.275.000	9.275.000	9.275.000	9.275.000	9.275.000	9.275.000	9.275.000
(+) Ingresos por Biogás (Energía)	26.872.000	26.872.000	26.872.000	26.872.000	26.872.000	26.872.000	26.872.000
(-) OPEX	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital							
(-) Depreciaciones	-7.073.436	-7.073.436	-7.073.436	-7.073.436	-7.073.436	-7.073.436	-7.073.436
(-) Pérdidas ejercicio anterior							
(=) Utilidad antes de Impuesto	5.073.564	5.073.564	5.073.564	5.073.564	5.073.564	5.073.564	5.073.564
(-) Impuesto (25 %)	-1.268.391	-1.268.391	-1.268.391	-1.268.391	-1.268.391	-1.268.391	-1.268.391
(=) Utilidad después de Impuesto	3.805.173	3.805.173	3.805.173	3.805.173	3.805.173	3.805.173	3.805.173
(+) Depreciaciones	7.073.436	7.073.436	7.073.436	7.073.436	7.073.436	7.073.436	7.073.436
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital							
(+) Pérdida ejercicio anterior							
(=) Flujo de caja Operacional	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609
(-) Inversiones							
(-) IVA de la inversión							
(+) Recuperación del IVA de la inversión							
(+) Valor Residual de los activos							
(=) Flujo de Capitales	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de caja Neto	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609	10.878.609

Tabla C.7: Flujo de caja proceso de digestión anaeróbica del año 14 al año 15 en [CLP]

	Año 14	Año 15
(+) Ingresos por Bioabono	9.275.000	9.275.000
(+) Ingresos por Biogás (Energía)	26.872.000	26.872.000
(-) OPEX	-24.000.000	-24.000.000
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital		
(-) Depreciaciones	-7.073.436	-7.073.436
(-) Pérdidas ejercicio anterior		
(=) Utilidad antes de Impuesto	5.073.564	5.073.564
(-) Impuesto (25 %)	-1.268.391	-1.268.391
(=) Utilidad después de Impuesto	3.805.173	3.805.173
(+) Depreciaciones	7.073.436	7.073.436
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital		0
(+) Pérdida ejercicio anterior		
(=) Flujo de caja Operacional	10.878.609	10.878.609
(-) Inversiones		
(-) IVA de la inversión		
(+) Recuperación del IVA de la inversión		
(+) Valor Residual de los activos		0
(=) Flujo de Capitales	0	0
Flujo de caja Neto	10.878.609	10.878.609

En base al flujo de caja se realiza el calculo del VAN usando la Ecuación C.1 como se mostró en el caso anterior obteniendo un valor de -390.277 [CLP].

C.1.3. Evaluación Económica del Proceso de Gasificación

Inversión

La inversión será la de los equipos de conminución, gasificación, el tratamiento de gases y el equipo de cogeneración.

Para estimar el costo del equipo de gasificador se utilizará el método recomendado por [62] el cual estima el costo de diversos equipos en función de diversos parámetros. Si bien no existen los gasificadores como tal en los equipos, es posible encontrar otros equipos parecidos como es el caso de los "*fired heaters*" donde existen del tipo caja y cilíndrico, en este caso será de tipo cilíndrico como acostumbra ser los gasificadores. La Ecuación C.5 es la que es utilizada en el caso descrito.

$$C = 1,218 \cdot k \cdot (1 + f_d + f_p) \cdot Q^{0,82} \quad (C.5)$$

Donde:

C : Costo en miles de [USD].

k : Factor de material .

f_d : Factor de tipo de diseño.

f_p : Factor de presión.

Q : Energía producida en [MBTU/h].

Para el caso del factor de material, existen tres posibilidades, acero carbono, acero CrMo, y Acero inoxidable. para este caso se utilizará acero inoxidable para asegurar la durabilidad del equipo, por lo tanto el factor k tendrá un valor de 42,0.

El factor f_d tiene dos posibilidades, el diseño cilindrico y el *dowtherm*, en este caso el diseño cilindrico es el que más se asemeja en de un gasificador, ya que un *dowtherm* exige intercambio de calor, entre fluidos y no es el caso, por lo que el valor para este factor será 0.

Para el factor f_p existen tres rangos de presiones en [PSI], de 0 a 500, de 500 a 1.000 y de 1.000 a 1.500, en este caso se elige de 0 a 500 [PSI] debido a se opera a 1 [atm] (14,5 PSI), por tanto el valor del factor será de 0.

Antes de determinar el valor de Q en [MBTU/h] es necesario estimar la energía que se produce por medio del gasificador, para esto se considera la Ecuación C.4, los datos de la Tabla C.8 y los resultados del balance de masa, donde resultó que el syngas producido es contiene 15.500 [kg/año] (7.770.000 [mol/año]) de H_2 y 12.900 [kg/año] (462.000 [mol/año]) de CO, los dos gases combustibles del Syngas (el metano es despreciable).

Tabla C.8: Características energética de los gases combustibles del Syngas

Característica	Valor	Unidad	Cita
Poder Calorífico H ₂	120	[MJ/kg]	[68]
Poder Calorífico CO	283	[MJ/kmol]	[37]

Calculando usando la Ecuación C.4 se obtienen 2.000.000 [MJ] al año es decir 228 [MJ/h] lo que equivale a 0,216 [MBTU/h].

Con los datos antes calculados, a continuación se determina el costo del gasificador:

$$\begin{aligned}
 C &= 1,218 \cdot k \cdot (1 + f_d + f_p) \cdot Q^{0,82} \\
 C &= 1,218 \cdot 42,0 \cdot (1 + 0 + 0) \cdot 0,216^{0,82} \\
 C &= 14.560[USD]
 \end{aligned}$$

En diversos proyectos los gasificadores rondan el 30 % de la inversión en equipos, resultado una inversión total de 48.532 [USD], pero este valor corresponde al año 2012, por lo que es necesario ajustarlo con la Ecuación C.2 utilizando un indicador CEPCI para el año 2012 de 584,6 obteniendo 44.539 [USD] equivalente a 28.460.280 [CLP] [72][58].

Costos Operacionales

Respecto a los costos por energía eléctrica, se estima que el autoconsumo corresponde al 10 % de la energía producida, lo cual corresponde a 36.044 [kWh] y será suministrado por el gasificador como se verá más adelante, ergo, no habrán costos por gasto energético [67].

El gasto por sueldo del personal será el mismo que en el caso anaeróbico con 4 turnos rotativos llegando a un gasto anual de 24.000.000 [CLP] en este ítem.

Ingresos

Los ingresos corresponderán a la venta de energía a SIC, al igual que el caso anaeróbico. Para estimar la energía producida se considera la Ecuación C.4, los datos de la Tabla C.8 y una eficiencia del 65 %, obteniendo 360.436 [kWh], a lo que se le descuenta el 10 % por autoconsumo, intectando así 324.393 [kWh] al SIC por 19.463.567 [CLP] [52].

Depreciaciones y Ganancias o Perdidas de Capital

Al igual que los casos anteriores se toma en consideración 15 años de vida útil para los equipos, obteniendo así una depreciación anual de 1.897.352 [CLP]. Además, tampoco existiran ganancias o perdidas de capital, pues los equipos no será vendidos al finalizar los 15 años.

Flujo de Caja y Cálculo del VAN

Con las consideraciones antes mencionadas se realiza el flujo de caja que se presenta en las Tablas C.9 C.10 C.11.

Tabla C.9: Flujo de caja caja proceso de gasificación del año 0 al año 6 en [CLP]

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
(+) Ingresos por Energía		19.463.567	19.463.567	19.463.567	19.463.567	19.463.567	19.463.567
(-) OPEX		-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital							
(-) Depreciaciones		-1.897.352	-1.897.352	-1.897.352	-1.897.352	-1.897.352	-1.897.352
(-) Pérdidas ejercicio anterior			-6.433.785	-12.867.569	-19.301.354	-25.735.138	-32.168.923
(=) Utilidad antes de Impuesto		-6.433.785	-12.867.569	-19.301.354	-25.735.138	-32.168.923	-38.602.708
(-) Impuesto (25 %)		0	0	0	0	0	0
(=) Utilidad después de Impuesto		-6.433.785	-12.867.569	-19.301.354	-25.735.138	-32.168.923	-38.602.708
(+) Depreciaciones		1.897.352	1.897.352	1.897.352	1.897.352	1.897.352	1.897.352
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital							
(+) Pérdida ejercicio anterior			6.433.785	12.867.569	19.301.354	25.735.138	32.168.923
(=) Flujo de caja Operacional		-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433
(-) Inversiones	-28.460.280						
(-) IVA de la inversión	-5.407.453						
Recuperación del IVA de la inversión		5.407.453					
(+) Valor Residual de los activos							
(=) Flujo de Capitales	-33.867.734	5.407.453	0	0	0	0	0
Flujo de caja Neto	-33.867.734	871.021	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433

Tabla C.10: Flujo de caja caja proceso de gasificación del año 7 al año 13 en [CLP]

	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13
(+) Ingresos por Energía	19.463.567	19.463.567	19.463.567	19.463.567	19.463.567	19.463.567	19.463.567
(-) OPEX	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000	-24.000.000
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital							
(-) Depreciaciones	-1.897.352	-1.897.352	-1.897.352	-1.897.352	-1.897.352	-1.897.352	-1.897.352
(-) Pérdidas ejercicio anterior	-38.602.708	-45.036.492	-51.470.277	-57.904.061	-64.337.846	-70.771.630	-77.205.415
(=) Utilidad antes de Impuesto	-45.036.492	-51.470.277	-57.904.061	-64.337.846	-70.771.630	-77.205.415	-83.639.200
(-) Impuesto (25 %)	0	0	0	0	0	0	0
(=) Utilidad después de Impuesto	-45.036.492	-51.470.277	-57.904.061	-64.337.846	-70.771.630	-77.205.415	-83.639.200
(+) Depreciaciones	1.897.352	1.897.352	1.897.352	1.897.352	1.897.352	1.897.352	1.897.352
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital							
(+) Pérdida ejercicio anterior	38.602.708	45.036.492	51.470.277	57.904.061	64.337.846	70.771.630	77.205.415
(=) Flujo de caja Operacional -4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433
(-) Inversiones							
(-) IVA de la inversión							
(+) Recuperación del IVA de la inversión							
(+) Valor Residual de los activos							
(=) Flujo de Capitales	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433	-4.536.433
Flujo de caja Neto	10.878.609						

Tabla C.11: Flujo de caja caja proceso de gasificación del año 14 al año 15 en [CLP]

	Año 14	Año 15
(+) Ingresos por Energía	19.463.567	19.463.567
(-) OPEX	-24.000.000	-24.000.000
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital		
(-) Depreciaciones	-1.897.352	-1.897.352
(-) Pérdidas ejercicio anterior	-83.639.200	-90.072.984
(=) Utilidad antes de Impuesto	-90.072.984	-96.506.769
(-) Impuesto (25 %)	0	0
(=) Utilidad después de Impuesto	-90.072.984	-96.506.769
(+) Depreciaciones	1.897.352	1.897.352
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital		0
(+) Pérdida ejercicio anterior	83.639.200	90.072.984
(=) Flujo de caja Operacional	-4.536.433	-4.536.433
(-) Inversiones		
(-) IVA de la inversión		
(+) Recuperación del IVA de la inversión		
(+) Valor Residual de los activos		0
(=) Flujo de Capitales	0	0
Flujo de caja Neto	-4.536.433	-4.536.433

En base al flujo de caja se realiza el calculo del VAN usando la Ecuación C.1 como se mostró en el caso anterior obteniendo un valor de -72.825.325 [CLP].

C.2. Evaluación Ambiental

C.2.1. Evaluación Ambiental del Proceso de Digestión Anaeróbica

De los balances de masa se obtuvo que la generación de CO₂ y CH₄ son de 108.000 [kg] y 88.500 [kg] respectivamente, pero el CH₄ se combustiona completamente en el equipo de cogeneración. Considerando una combustión como se muestra en la Ecuación C.6.



De lo anterior, se desprende que un mol de CH₄ producen un mol de CO₂, asumiendo que hay oxígeno suficiente, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} 88.500[\text{kg de CH}_4] \cdot 0,016 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right] &= 5.530.000[\text{mol de CH}_4] \\ \Rightarrow 5.530.00[\text{mol de CO}_2] \cdot \frac{1}{0,044 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right]} &= 243.000[\text{kg de CO}_2] \end{aligned}$$

A lo calculado anteriormente se suma el CO₂ producido en el biodigestor resultando un total de 351.000 [kg CO₂eq].

C.2.2. Evaluación Ambiental del Proceso de Gasificación

El gasificador produce 398.000 [kg] de CO₂ y 12.900 [kg] CO, y este último, al igual que el metano en el caso anaeróbico, se combustiona en el equipo de cogeneración siguiendo la Ecuación C.7.



Al igual que el caso anterior un mol de CO produce uno de CO₂ por lo que siguiendo la misma metodología se obtiene que se producen 20.300 [kg] de CO₂ por la combustión del monóxido alcanzando un total de 418.000 [kg CO₂eq] al sumar el dióxido generado en el gasificador.

C.2.3. Evaluación Ambiental del Relleno Sanitario

Se supone que la descomposición anaeróbica que ocurre dentro del relleno sanitario es igual que la del digestor anaeróbico, a pesar de ello, el digestor llega a una conversión del 95 % mientras que en el relleno sanitario se alcanza el 100 %, por lo que producción de CH₄ y CO₂ corresponde a 93.000 [kg] y 114.000 [kg] respectivamente según lo obtenido en la simulación del proceso de digestión.

KDM Energía recupera el 30 % del biogás, entonces, el 30 % del CH₄ que se produce será combustionado como se explicó en la Ecuación C.6 obteniendo así 76.700 [kg] de CO₂.

Considerando que un [kg] de CH₄ equivale a 21 [kg] de CO₂ y las producciones de CO₂ antes mencionada se obtienen que el relleno sanitario genera 1.560.000 [kg CO₂eq] [64].

C.3. Evaluación Social

C.3.1. Encuesta para Grupos de Interés

1. Evalúe la peligrosidad de la tecnología aereóbica /anaeróbica /valorización /disposición del 1 al 5, donde 1 es poco peligroso y 5 muy peligroso.
2. Evalúe su percepción de la tecnología aereóbica /anaeróbica /valorización /disposición de 1 a 5 donde 1 es no me molesta que esté cerca, 5 me molesta que esté cerca.
3. Ordene los aspectos olores, inseguridad y rechazo, según importancia en una evaluación social entregándole un valor de 1 al 3 donde el 1 es el menos importante y 3 el más importante.

C.3.2. Olores

Para el cálculo del indicador de olor se utilizan las Ecuaciones C.8 y C.9.

$$O = \varphi \cdot \frac{m}{\rho} \cdot t \cdot f_m \quad (\text{C.8})$$

Donde:

O : Flujo de olor [ou_E/s].

φ : Tasa de emisión de olores [ou_E/(m²·s)].

m : Flujo de compost producido [kg/año].

ρ : Densidad aparente [kg/m³].

t : Tiempo de almacenamiento [año].

f_m : Factor de almacenamiento [m²/m³].

$$I_x = \frac{O_x}{O_{Compost}} \quad (C.9)$$

Donde:

I_x : Indicador de Olor para x [-].

O_x : Flujo de olor de x [ou_E/s].

$O_{Compost}$: Flujo de olor del compost [ou_E/s].

Usando los datos de la Tabla C.12 y las Ecuaciones C.8 C.9 se obtiene el siguiente resultado para el indicador de olor del relleno sanitario:

Tabla C.12: Parámetros para indicador de olor [14][26]

Parámetro	Relleno Sanitario	Compostaje
Densidad [kg/m ³]	475	700
Masa [kg]	630.000	380.000
Tasa Producción de Olores [ou _E /(m ² ·s)]	34	24

$$\begin{aligned}
 I_{Relleno} &= \frac{O_{Relleno}}{O_{Compost}} \\
 &= \frac{\varphi_{Relleno} \cdot \frac{m_{Relleno}}{\rho_{Relleno}} \cdot t \cdot f_m}{\varphi_{Compost} \cdot \frac{m_{Compost}}{\rho_{Compost}} \cdot t \cdot f_m} \\
 &= \frac{\varphi_{Relleno} \cdot \frac{m_{Relleno}}{\rho_{Relleno}} \cdot t \cdot f_m}{\varphi_{Compost} \cdot \frac{m_{Compost}}{\rho_{Compost}} \cdot t \cdot f_m} \\
 &= \frac{34 \left[\frac{ou_E}{m^2 \cdot s} \right] \cdot \frac{630.000 [kg]}{475 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}}{24 \left[\frac{ou_E}{m^2 \cdot s} \right] \cdot \frac{380.000 [kg]}{700 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}} \\
 &= \frac{49.389}{13.028} \\
 &= 3,79
 \end{aligned}$$

C.3.3. Resultados de la Encuesta

Las encuestas se aplicaron a las siguientes 3 personas:

1. Isable Aguilera: Administradora Pública de la Subdirección de Medio Ambiente de la Ilustre Municipalidad de Santiago.
2. Ricardo Schlatter: Ingeniero de proyectos de la dirección de ingeniería e innovación de KDM S.A.

3. Claudia Cervantes: Vecina de de la comuna de Santiago y Presidenta de Vigías del Patrimonio del Barrio Beauchef.

Obteniendo las respuestas que se observan en las Tablas C.13, C.14, C.15 C.16

Tabla C.13: Respuestas de la representante de la municipalidad

Proceso	Inseguridad	Rechazo
Compostaje	1	2
Digestión Anaeróbica	3	2
Gasificación	5	4
Relleno Sanitario	1	3

Tabla C.14: Respuestas del representante de empresa de relleno sanitario

Proceso	Inseguridad	Rechazo
Compostaje	1	3
Digestión Anaeróbica	1	3
Gasificación	2	2
Relleno Sanitario	1,5	4

Tabla C.15: Respuestas de la representante de los vecinos

Proceso	Inseguridad	Rechazo
Compostaje	2	2
Digestión Anaeróbica	3	3
Gasificación	2	3
Relleno Sanitario	5	5

Tabla C.16: Importancia de los aspectos según los interesados

Aspecto	Municipalidad	Empresa Relleno Sanitario	Vecinos	Suma
Olores	2	2	1	5
Inseguridad	3	1	2	6
Rechazo	1	3	3	7
Suma	6	6	6	18

En las Tablas C.17 se muestran los indicadores de los aspectos de inseguridad y rechazo realizando un promedio de los valores indicados por los interesados.

Tabla C.17: Indicadores para aspectos de inseguridad y rechazo

Proceso	Inseguridad	Rechazo
Compostaje	1,33	2,33
Digestión Anaeróbica	2,33	2,67
Gasificación	3,00	3,00
Relleno Sanitario	2,50	4,00

Usando los datos de la Tabla C.16 se calculan los ponderadores para cada aspectos que se muestran en la Tabla C.18. Como la suma debe dar uno, la suma de los puntajes por aspecto, se normalizan por la suma total del puntaje entregados, es decir 18.

Tabla C.18: Ponderadores de los aspectos

Aspecto	Ponderador
Olores	0,278
Inseguridad	0,333
Rechazo	0,389

C.3.4. Resultados de la Evaluación Social

Evaluación Social Global

Para agrupar los tres aspectos se utilizará el programa M-MACBETH con una escala de puntajes del 0 al 5 donde 5 corresponde al puntaje máximo posible y 0 mínimo. En la Tabla C.19 se muestran el resumen de los resultados de los indicadores de inseguridad, olores y rechazo.

Tabla C.19: Resumen Indicadores Sociales

Proceso	Inseguridad	Rechazo	Olores
Disposición	1,33	2,33	1
Digestión Anaeróbica	2,33	2,67	0,697
Gasificación	3,00	3,00	0
Relleno Sanitario	2,50	4,00	3,79

Ingresando los datos de las Tablas C.19 y C.18 en el programa M-MACBETH como la escala de 0 a 5 se obtiene como resultado la Tabla C.20.

Tabla C.20: Resultados de la evaluación social

Proceso	Evaluación Social
Compostaje	3,85
Digestión Anaeróbica	3,38
Gasificación	3,19
Relleno Sanitario	1,53

Evaluación Representante de la Municipalidad

Si la evaluación se realizara sólo con la opinión de la representante de la Municipalidad, los ponderadores para los tres aspectos serían los que se muestran en la Tabla C.21.

Tabla C.21: Ponderadores para representante de la municipalidad

Aspecto	Ponderador
Olores	0,333
Inseguridad	0,500
Rechazo	0,167

Así, utilizando los datos de las Tablas C.13 y C.21 y los resultados para el indicador de olor de la Tabla C.19 en el programa M-MACBETH se obtienen como resultado la Tabla C.22 que muestra los puntajes obtenidos por cada tecnología, donde 5 es el máximo y 0 el mínimo posible.

Tabla C.22: Resultados de la evaluación social según Municipalidad

Proceso	Evaluación Social
Compostaje	4,35
Digestión Anaeróbica	3,23
Gasificación	1,87
Relleno Sanitario	2,92

Evaluación Representante de la Empresa de Relleno Sanitario

En el caso que la evaluación se realizara sólo con la opinión del representante de la empresa de relleno sanitario, los ponderadores para los 3 aspectos serían los que se muestran en la Tabla C.23.

Tabla C.23: Ponderadores para representante de empresa de relleno sanitario

Aspecto	Ponderador
Olores	0,333
Inseguridad	0,167
Rechazo	0,500

Utilizando los datos de las Tablas C.14 y C.23 y los resultados de parámetro olor de la Tabla C.19 en el programa M-MACBETH, se obtienen como resultado para cada tecnología lo mostrado en la Tabla C.24.

Tabla C.24: Resultados de la evaluación social según empresa de relleno sanitario

Proceso	Evaluación Social
Compostaje	3,31
Digestión Anaeróbica	3,44
Gasificación	4,17
Relleno Sanitario	1,35

Evaluación Representante de los Vecinos

Por otro lado, si la evaluación se realizara sólo con las opinión de la representante de los vecinos, los ponderadores serían los que se muestran en la Tabla C.25.

Tabla C.25: Ponderadores para representante de los vecinos

Aspecto	Ponderador
Olores	0,167
Inseguridad	0,333
Rechazo	0,500

Así, realizando la misma metodología que en los casos anteriores pero con los datos de las Tablas C.15 y C.25 y el indicador de olores de la Tabla C.19, el programa M-MACBETH entrega como resultado la Tabla C.26.

Tabla C.26: Resultados de la evaluación social según vecinos

Proceso	Evaluación Social
Compostaje	3,74
Digestión Anaeróbica	2,76
Gasificación	3,33
Relleno Sanitario	0,00