



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Ciclo de Vida de una Central de Biogás

Yadyra Monserrath Ortiz González

Leiria, Outubro de 2017



Disertación

Maestría en Ingeniería de la Energía y el Medio Ambiente

Ciclo de Vida de una Central de biogás

Yadyra Monserrath Ortiz González

Disertación desarrollada bajo la supervisión del profesor Doctor João Rafael da Costa Sanches Galvão, de la Escuela Superior Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria, Portugal y co-supervisión del Ingeniero Hernando Efraín Merchán Manzano, MSc, profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Cuenca, Ecuador.

Leiria, Octubre de 2017

Dedicatoria

Con mucho cariño dedico este trabajo a Dios Todopoderoso por haberme Regalado la vida, una hermosa familia, mis amigos y compañeros incomparables y por esta grandiosa oportunidad de realizar mi Maestría en tan prestigiosa Universidad. A mis padres, Jaime y Corina, por todo el amor, ejemplo, cariño, sacrificio, consejos y apoyo que me han sabido brindar a lo largo de toda mi vida. A mis hermanos Fabricio, Josué (+) y Cumandá quienes han sido mi fortaleza y mi soporte en cada escalón de mi vida. A mi Abuelita Concepción Sanmartín, así como a mis tías, tíos, primas, primos, que siempre han estado pendientes de que mis metas y sueños se cumplan. A mis amigos, amigas y compañeros/as que con sus palabras de aliento, consejos y cariño me han dado el impulso necesario para el cumplimiento de una más de mis metas.

Agradecimientos

Dejo constancia de mis sinceros agradecimientos al Dr. João Rafael da Costa Sanches Galvão, mi orientador, profesor de la Facultad de Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria, y al Dr. Hernando Efraín Merchán Manzano, mi co-orientador, profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Cuenca, Ecuador, quienes con paciencia, dedicación me han sabido guiar y orientar durante el desarrollo del presente trabajo, a los Docentes del Instituto Politécnico de Leiria quienes compartieron sus conocimientos, experiencias, y nos apoyaron a lo largo de nuestra formación académica.

De igual manera agradezco a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación por apoyarme en la consecución de la beca cofinanciada con el Instituto Politécnico de Leiria.

Agradezco al Ingeniero Sebastián Espinoza, Director de Difusión y Gestión de la Información del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) por la facilitación del software utilizado e información brindada; al Ingeniero Ernesto Andrade, Gerente General de la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC), por la facilitación de información necesaria, sobre el proyecto Pichacay.

A todos quienes de una u otra manera me estuvieron apoyando siempre, que Dios les pague.

Resumen

El uso de fuentes de energía es imprescindible para el desarrollo social, económico y tecnológico, en los últimos años los combustibles fósiles como principal fuente energética ha generado graves problemas ambientales. Por esta razón, Instituciones gubernamentales y organizaciones en todo el mundo, promueven el uso de fuentes renovables como una alternativa eficiente y amigable con el medio ambiente. Con el fin de minimizar los impactos ambientales y preservar el medio ambiente, se han impulsado distintos proyectos e investigaciones; uno de los cuales es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la Huella de Carbono (HC), los cuales analizan la metodología y el cálculo de daños provocados al medio ambiente, ya sea por personas, empresas o servicios.

El objetivo de un ACV es cuantificar los impactos generados por cualquier actividad, producto o servicio, mientras que la HC permite cuantificar y comparar en $\text{kgCO}_2 \text{ eq}$ los impactos que producen los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Este trabajo propone un ACV y HC al proceso de producción de electricidad a partir de biogás, el análisis se lleva a cabo en el relleno sanitario Pichacay, ubicado en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el software Simapro.8 el cual es una herramienta que permite realizar ACV y HC, mediante el ingreso de datos propios y/o el uso de su base de datos, en este caso se usaron datos provenientes de la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP), a la cual pertenece el proyecto de generación de electricidad a partir del biogás del relleno sanitario Pichacay, los sistemas estudiados en este proceso fueron, el transporte de residuos hasta el relleno, el sistema de extracción y tratamiento del biogás, equipo de generación de electricidad, y finalmente la subestación de transformación.

Como resultado del estudio del ACV, se obtuvo que la mayor parte de impactos ambientales se produce en la etapa de transporte de residuos, debido a la cantidad de kilómetros que recorren los vehículos recolectores y de combustible usado en un año. Para el análisis de la huella de carbono, se empleó el método Greenhouse Gas Protocol V1.01 de Simapro, el mismo que mostró que el $\text{CO}_2 \text{ eq}$ fósil, fue el que contribuyó en gran cantidad, esto debido al consumo de diésel por los camiones recolectores de basura.

El análisis de éstas metodologías permitieron comprobar, que aparte del subsistema de transporte, se obtienen impactos o aspectos positivos asociados a la producción de

electricidad mediante biogás, debido a que se evitan la emisión de GEI, en especial el metano (CH₄) que es el gas que más contribuye al calentamiento global.

Para este caso estudiado y debido a los resultados obtenidos se recomienda optimizar las rutas de recorrido de los recolectores de basura y /o cambiar el combustible por un biocombustible como el biodiesel que tiene mayores ventajas ambientales.

En Ecuador aún no se han desarrollado suficientemente estas metodologías, motivo por el cual es importante que se realicen este tipo de estudios ya que a través de ellos podemos acercarnos y encaminarnos a una economía circular, pues ésta no pretende solamente responder a los desafíos globales como el cambio climático, la sostenibilidad y la preservación de la biodiversidad, sino que impulsa el uso consciente y eficiente de cada uno de los recursos, productos y/o servicios que necesitamos para desarrollarnos tanto económica como social y ambientalmente.

Palabras clave: *Análisis de Ciclo de Vida, Huella de Carbono, Planta de Biogás, Biomasa.*

Abstract

The use of energy sources is essential for social, economic and technological development, in recent years fossil fuels as the main source of energy has generated serious environmental problems. For this reason, government institutions and organizations around the world, promote the use of renewable sources as an efficient and environmentally friendly alternative. In order to minimize environmental impacts and preserve the environment, various projects and research have been promoted; one of which is the Life Cycle Analysis (LCA) and the Carbon Footprint (HC), which analyze the methodology and calculation of damages caused to the environment, whether by people, companies or services.

The objective of a LCA is to quantify the impacts generated by any activity, product or service, while the HC allows quantifying and comparing the impacts of Greenhouse Gases (GHG) in Kg CO₂ eq. This work proposes a LCA and HC to the process of production of electricity from biogas; the analysis was do for the Pichacay landfill, located in the city of Cuenca, Ecuador

For the development of this work, the software Simapro.8 was used, which is a tool that allows to perform LCA and HC, through the input of own data and / or the use of its database, in this case data was from the Municipal Cleaning Company of Cuenca (EMAC EP), to which belongs the project of electricity generation from the biogas of the Pichacay landfill, the systems studied in this process were, the transport of waste to the landfill, the system of extraction and treatment of biogas, electricity generation equipment, and finally the transformation substation.

As a result of the LCA study, it found that most of the environmental impacts occur in the waste transportation stage, due to the quantity of kilometers by the collectors vehicles and used fuel in a year. For the carbon footprint analysis, the Greenhouse Gas Protocol method V1.01 of Simapro was used, which showed that CO₂ eq fossil, was the one that contributed in great amount, this due to the consumption of diesel by garbage collectors trucks.

The analysis of these methodologies showed that, apart from the transport subsystem, impacts or positive aspects associated with the production of electricity through biogas are

obtained, due to the avoidance of GHG emissions, especially methane (CH₄), which is the gas that contributes most to global warming.

For this case studied and due to the results obtained it is recommended to optimize the routes of travel of the garbage collectors and / or to change the fuel for a biofuel like the biodiesel that has greater environmental advantages.

In Ecuador have not yet developed so much these methodologies, which is why it is important to carry out this type of studies because through them we can approach and move to a circular economy, because this not only intended to respond to global challenges such as climate change, sustainability and the preservation of biodiversity, but also encourages a conscious and efficient use of each of the resources, products and / or services we need to develop as economically as socially and environmentally.

Keywords: *Life Cycle Analysis, Carbon Footprint, Biogas Plant, Biomass.*

Lista de Figuras

Fig. 2.1. Ciclo de la Biomasa.....	5
Fig. 2.2. Proceso Energético de la Biomasa.....	6
Fig. 2.3. Fermentación anaeróbica de la glucosa en etanol.....	9
Fig. 2.4. Respiración anaeróbica	9
Fig. 2.5. Esquema del proceso de Digestión Anaeróbica.....	11
Fig. 2.6. Composición del Biogás en función del pH.....	12
Fig. 2.7. Biodigestor de domo fijo	14
Fig. 2.8. Diagrama de un Biodigestor de tambor flotante.....	15
Fig. 2.9. Diagrama de un biodigestor de domo fijo.....	15
Fig. 2.10. Biodigestor Tubular	16
Fig. 2.11. Esquema de un tanque Imhoff.....	17
Fig. 2.12. Fuentes de Biomasa para la generación global de Calor y Electricidad.....	20
Fig. 2.13. Producción global de biocombustibles por tipo y por País/ Región.....	20
Fig. 2.14. Generación a nivel Global de Bioenergía por País/Región.....	22
Fig. 2.15. Evolución proyectada de la Generación por tipo de Tecnología.....	23
Fig. 2.16. Fuentes de Energía eólica, biomasa, solar, e hídrica.....	25
Fig. 3.1. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)	28
Fig. 3.2. Relación entre Etapas del ACV	28
Fig. 3.3. Esquema de un ICV.....	32
Fig. 3.4. Categorías de impacto de efecto medio y final.....	35
Fig. 3.5. Normativas para la Huella de Carbono	38
Fig. 3.6. Pasos para la medición de HC	38
Fig. 4.1. Ubicación del Relleno Sanitario Pichacay.....	41
Fig. 4.2. Recolección de Lixiviados	44
Fig. 4.3. Esquema General de una Instalación de Biogás.....	47
Fig. 4.4. Límites del Sistema a estudiar	50
Fig. 4.5. Ingreso de datos en Simapro 8 Etapa Transporte de Residuos.....	51
Fig. 4.6. Esquema etapa transporte de Residuos Simapro	52
Fig. 4.7. Ingreso de datos para el subproceso Tratamiento del biogás en Simapro.....	53
Fig. 4.8. Ingreso de datos en Simapro etapa extracción del biogás para Generar electricidad	53
Fig. 4.9. Esquema de etapa extracción de biogás para generar electricidad.....	54
Fig. 4.10. Ingreso de valores para la etapa de Generar electricidad en Simapro	54
Fig. 5.1. Impactos asociados a la etapa Transporte de Residuos.....	57
Fig. 5.2. Impactos asociados a la etapa Subestación de transformación	58
Fig. 5.3. Impactos asociados a la etapa Equipo de Generación de Electricidad	59
Fig. 5.4. Impactos asociados a la etapa Biogás para la Generación de Electricidad.....	59
Fig. 5.5. Generación de electricidad a partir de Biogás del Relleno Sanitario Pichacay	60
Fig. 5.6. Esquema del proceso de Generación de Biogás del Relleno sanitario.....	61

Fig. 5.7. Caracterización de huella de carbono asociada a la producción de 1 kWh de electricidad en la subestación Pichacay según el método Greenhouse Gas Protocol..... 62

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Organizaciones y países de LAC donde se han desarrollado proyectos con biodigestores.	18
Tabla 3.1. Las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, temas que debería contener el ICV.....	31
Tabla 3.2. Las normas ISO 14040:2006 y 14044:2006, elementos de una EICV.....	34
Tabla 3.3. Métodos más utilizados en una EICV.....	36
Tabla 3.4. Categorías de Impacto para el método CML baseline 2000.....	36
Tabla 4.1. Ingreso de Desechos al Relleno Sanitario Pichacay (valores proyectados y reales).	42
Tabla 4.2. Composición de los Residuos que Ingresan al Relleno.....	43
Tabla 4.3. Análisis de sensibilidad del ROI estimado.....	45
Tabla 4.4. Estimación de Energía Térmica disponible.....	46
Tabla 4.5. Capacidad Estimada de Generación Eléctrica.....	47
Tabla 4.6. Flota de Recolección EMAC EP.....	51
Tabla 8.1. Consumo de Combustible sectores concéntricos.....	71
Tabla 8.2. Consumo de Combustible sectores periféricos.....	72
Tabla 8.3. Impactos asociados a la etapa Transporte de Residuos porcentajes.....	73
Tabla 8.4. Impactos asociados a la etapa Transporte de Residuos unidades equivalentes.....	73
Tabla 8.5. Impactos asociados a la etapa Subestación de Transformación porcentajes.....	74
Tabla 8.6. Impactos asociados a la etapa Subestación de Transformación.....	74
Tabla 8.7. Impactos asociados a la etapa Equipo de Generación de Electricidad porcentajes.	75
Tabla 8.8. Impactos asociados a la etapa Equipo de Generación de Electricidad.....	75
Tabla 8.9. Impactos asociados a la etapa Biogás para la Generación de Electricidad, porcentajes.76	76
Tabla 8.10. Impactos asociados a la etapa Biogás para la Generación de Electricidad.....	76
Tabla 8.11. Resultados de los impactos asociados al proceso completo, porcentajes.....	77
Tabla 8.12. Resultados de los impactos asociados al proceso completo.	77

Lista de Acrónimos

Abreviaciones

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ADF	Agotamiento de recursos abióticos
AP	Potencial acidificación del suelo y agua
ARCONEL	Agencia de Control y Regulación de Electricidad
ASPROINCA	Asociación de productores indígenas y campesinos de Riosucio
BEES	Building for Environmental and Economic Sustainability
Btu	British Thermal Unit
C	Carbono
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de carbono
EICV	Evaluación del impacto del ciclo de vida
EMAC EP	Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca
EP	Potencial de Eutrofización
EEUU	Estados Unidos de América
gal	Galón
gal/año	Galón-año
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GHG Protocol	Greenhouse Gas Protocol
GW	Gigavatio
GWh	Gigavatio-hora
GWP	Potencial de calentamiento global
Ha	Hectáreas
HC	Huella de Carbono
IATA	Agencia Internacional de Transporte Aéreo
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
ISO	Organización Internacional de Estandarización

km	Kilómetro
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio-hora
LAC	Latino América y el Caribe
MEER	Ministerio de Electricidad y Energía Renovable
MSW	Municipal Solid Waste (Residuos municipales sólidos)
MWh	Megavatio-hora
N	Nitrógeno
N₂O	Monóxido de nitrógeno
NF₃	Trifluoruro de nitrógeno
Nm³ / h	Metros cúbicos normales por hora
ODP	Potencial de agotamiento de la capa de ozono
ONG	Organización no gubernamental
PAD	Poliétileno de alta densidad
pH	Potencial de hidrógeno
POCP	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos
PVC	Policloruro de vinilo
PROSUCO	Asociación Promoción de la Sustentabilidad y Conocimientos Compartidos
ROI	Radio Influencia
SF₆	Hexafluoruro de azufre
t	Tonelada
TRACI	The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts
TWh	Teravatio-hora
UE	Unión Europea
V	Voltios

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	i
Agradecimientos	iii
Resumen	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tablas	xi
Lista de Acrónimos	xiii
Tabla de Contenidos.....	xv
1. CAPITULO.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. MOTIVACIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.3. OBJETIVOS	2
1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	2
2. CAPITULO.....	5
2.1. ESTADO DEL ARTE DEL BIOGÁS	5
2.1.1. Biomasa	5
2.2. BIOCOMBUSTIBLES.....	6
2.2.1. Obtención de los Biocombustibles.....	6
2.2.2. Tipos de Biocombustible.....	7
2.2.2.1. Bioetanol.....	7
2.2.2.2. Biodiesel.....	7
2.2.2.3. Biogás	7
2.3. FUNDAMENTOS DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	8
2.3.1. Fermentación Anaeróbica:	8
2.3.2. Respiración anaeróbica.....	9
2.3.3. Etapas de la Digestión Anaeróbica	10
Hidrólisis:.....	10
Etapas fermentativa o acidogénica:	10
Etapas acetogénica:.....	10
Etapas metanogénica:.....	10
2.3.4. Factores determinantes en la producción de Biogás en el Reactor	11
Oxígeno:	11

Temperatura	12
Valor de pH	12
Suministro de nutrientes	13
Inhibidores	13
2.4. BIODIGESTORES DE PEQUEÑA ESCALA	13
2.4.1. Biodigestores	13
2.4.2. Aplicación de Biodigestores de pequeña escala	16
2.5. SITUACIÓN ACTUAL DEL USO DE BIOMASA A NIVEL MUNDIAL	18
2.6. SITUACIÓN ACTUAL DEL USO DE BIOMASA EN ECUADOR	23
2.7. GENERACION DISTRIBUIDA EN EL MUNDO Y ECUADOR, ESPECIALMENTE RELACIONADA CON BIOGAS	24
3. CAPÍTULO	27
3.1. ANALISIS DEL CICLO DE VIDA	27
3.1.1. Definición ACV	27
3.1.2. Etapas del ACV	28
3.1.2.1. Definición del objetivo y alcance	29
3.1.2.2. Análisis del Inventario	30
3.1.2.5. Interpretación de Resultados	36
3.2. HUELLA DE CARBONO (HC)	36
3.2.1. Normativa de la medición de la huella de carbono y medición de emisiones de GEI 37	
3.3. SOFTWARE UTILIZADO	39
4. CAPÍTULO	41
4.1. CASO DE ESTUDIO	41
4.1.1. Central Pichacay	41
4.1.2. Ubicación	41
4.1.3. Ingreso y composición de los residuos	42
4.1.4. Características de los depósitos	43
4.1.5. Lixiviados.....	43
4.1.6. Disponibilidad de biogás	44
4.2. SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA	46
4.2.1. Cantidad de Energía Generada	46
4.3. POCESO DE PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD	47
4.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO ACV	49
4.4.1. Determinación de los objetivos y alcance del ACV	49
Objetivo del ACV.....	49

Aplicación del ACV	49
Alcance del ACV	49
a) Unidad Funcional	49
b) Límites del Sistema	49
Selección de categorías de impacto.....	50
4.4.2. Inventario del Ciclo de Vida (ICV)	50
4.4.2.2. Registro del gas	52
4.4.2.3. Grupo generador de electricidad	54
4.4.2.4. Estación de transformación	54
5. CAPÍTULO	55
5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	55
5.1.1. EVALUACION DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA.	55
5.1.2. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN	57
5.1.3. HUELLA DE CARBONO.	62
6. CONCLUSIONES	65
7. BIBLIOGRAFÍA	67
8. ANEXOS	69
ANEXO 1. MAPA DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA CON FUENTES RENOVABLES	69
ANEXO 2. TABLAS DE RECORRIDOS Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE LOS VEHÍCULOS RECOLECTORES DE BASURA	71
Anexo 2.1 Consumo de Combustible sectores concéntricos	71
Anexo 2.2 Consumo de Combustible sectores periféricos	72
ANEXO 3 TABLAS DE RESULTADOS SIMAPRO DE LOS IMPACTOS ASOCIADOS A CADA ETAPA.....	73
Anexo 3.1 Resultados de los impactos asociados al transporte de residuos al relleno sanitario	73
ANEXO 3.2 Resultados de los impactos asociados a la etapa Subestación de transformación	74
ANEXO 3.3. Resultados de los impactos asociados a la etapa Equipo de Generación de Electricidad	75
ANEXO 3.4 Resultados de los impactos asociados a la etapa Biogás para Generar Electricidad	76
Anexo 3.5 Resultados de los impactos asociados al proceso completo de generación de electricidad a partir de biogás del relleno sanitario Pichacay.	77

1. CAPITULO

1.1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía ha ido incrementando a medida que la humanidad se ha desarrollado, lo cual implica un uso mayor de recursos para conseguir la energía necesaria y continuar este proceso. Los recursos que mayormente se han venido utilizando son combustibles fósiles que generan impactos ambientales negativos tales como la destrucción de la capa de ozono y emisiones de gases efecto invernadero, motivo por el cual desde años atrás se están haciendo esfuerzos por cambiar esta situación haciendo uso de energías renovables, tales como eólica, termo-solar, fotovoltaica, hidráulica, biomasa y mareomotriz.

Este trabajo está enfocado a un análisis de ciclo de vida de una central de biogás, es decir de una central de generación de energía a partir de biomasa que produce biogás en un relleno sanitario. Este análisis es un procedimiento que permite la evaluación de energía y cargas medioambientales que se encuentran asociadas a determinada actividad o servicio, llevada a cabo mediante la identificación de energía y materiales usados y, además, los residuos liberados al medio ambiente.

El análisis de ciclo de vida, permite conocer las oportunidades y riesgos que se presentan en cada una de las etapas de producción de energía en una central de biogás, desde sus materias primas (biomasa) hasta el producto final (energía eléctrica). Para este análisis se usará el software SIMAPRO.8 que es un instrumento muy extendido a nivel internacional para el análisis energético, ecológico y económico de sistemas de energía, de transporte y de flujo de materiales. Este ayudó a imponer el análisis del impacto ambiental como parte de la toma de decisiones sobre el ahorro de energía.

En el presente trabajo también se pretende hablar sobre biodigestores a pequeña escala, es decir para pequeñas comunidades o centros agrícolas, describiendo brevemente los tipos y tamaños que pueden ser acoplados para estos lugares.

A continuación se explica las razones que motivaron este trabajo, teniendo en cuenta los objetivos que se pretenden alcanzar.

1.2. MOTIVACIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El Ecuador se encuentra en un proceso de transformación de su matriz energética por lo cual se realizan proyectos que usan principalmente fuentes renovables para la generación eléctrica (hidroeléctrica, eólica, fotovoltaica, biomasa) con el fin de reducir la dependencia de combustibles fósiles y contribuir positivamente al cambio climático global. Sin embargo, durante la conversión de energía a partir de recursos renovables existen distintas etapas o procedimientos que podrían reducir la eficiencia en el proceso de conversión energética y afectar de forma directa o indirecta al medio ambiente.

Para identificar cuáles son y en qué etapas se producen los mayores impactos ambientales, es necesario realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y determinar los procedimientos adecuados en cada etapa.

Actualmente el Ecuador no dispone de información precisa y detallada sobre ACV para una central de generación eléctrica a partir de biogás, lo cual dificulta obtener mayor rendimiento en cada una de las etapas de operación, mantenimiento y fin de vida útil de éste tipo de sistemas.

Esta falta de información contribuye a que nuestro país mantenga una política de economía lineal en la cual el proceso es crear, utilizar y desechar. Es por ello que se deben investigar tanto el ACV como el sistema de economía circular, que es un modelo económico basado en el principio de “cerrar el ciclo de vida de los recursos”. Esto implica producir lo útil y necesario al tiempo de reducir el consumo de energía y el desperdicio de materias primas [1].

La economía circular no pretende solamente responder a los desafíos globales como el cambio climático, la sostenibilidad y la preservación de la biodiversidad, sino también ofrece la oportunidad de fortalecer el bienestar, la prosperidad y el potencial innovador ecosistémico, desacoplando desarrollo y bienestar del consumo creciente de recurso naturales y de la presencia de impactos negativos para el medioambiente [2].

1.3. OBJETIVOS

- Describir la importancia del análisis de ciclo de vida.
- Analizar los pasos y las normas con las que se realizan este análisis.
- Recolectar datos de un sistema de producción de energía eléctrica a partir de una fuente de biogás.
- Utilizar un software que permita simular los escenarios en un análisis de ciclo de vida.
- Encontrar soluciones viables para incrementar la eficiencia de una central de biogás y disminuir los impactos asociados a los procesos durante su operación.

1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.

En el primer capítulo de Introducción se exponen genéricamente el contexto y los objetivos.

En el capítulo 2 se presenta una caracterización de la biomasa, sus diferentes formas de aprovechamiento, tecnologías para aprovechar el biogás y situación del uso de la biomasa a nivel mundial.

En el capítulo 3 se define y se identifican etapas del ACV, se define qué es la huella de carbono y se describen las normas ISO que son aplicables para estas dos metodologías.

En el capítulo 4 se realizó un levantamiento de información de la central en estudio, la central de biogás Pichacay, su ubicación y proceso de generación de electricidad. Se aplican del ACV y HC para esta central de generación eléctrica.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del ACV y HC, utilizando el software Simarpo.8, y a su vez la interpretación de cada uno de ellos.

En el capítulo 6, se exponen las conclusiones y perspectivas futuras.
Finalmente se presenta la bibliografía y anexos.

2. CAPITULO

En este capítulo se describirán conceptos tales como la biomasa, los biocombustibles, tipos de biocombustibles, digestión anaeróbica, etapas de la digestión anaeróbica, biodigestores tipos de biodigestores para producción de biogás a pequeña escala, también se hablará sobre el uso de la biomasa, las tecnologías desarrolladas para implementar esta fuente de energía a nivel mundial y a nivel de Ecuador.

2.1. ESTADO DEL ARTE DEL BIOGÁS

2.1.1. Biomasa

Es la fracción biodegradable de productos y residuos provenientes de la agricultura (incluyendo residuos vegetales y animales), silvicultura y de las industrias afines, así como la fracción biodegradable de residuos industriales y urbanos.

El gas, carbón, petróleo y otros combustibles fósiles a pesar de derivar de materia orgánica no se consideran como renovables ya que les tomó millones de años acumular carbono y formarse.

Durante el proceso de combustión, la biomasa libera dióxido de carbono (CO_2) hacia la atmósfera, el mismo CO_2 que fue absorbido durante su crecimiento (en el caso de materia orgánica vegetal) o que absorbieron las plantas ingeridas (en el caso de materia orgánica animal).

En la figura 2.1, se observa el ciclo de la biomasa, en la cual se puede ver que es un ciclo cerrado y limpio.

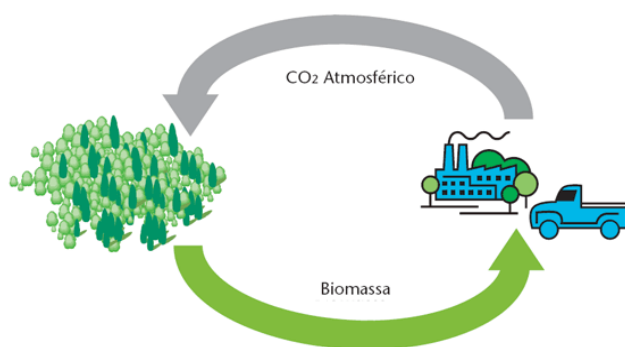


Fig. 2.1. Ciclo de la Biomasa.

La biomasa puede ser seca o húmeda; la primera proviene ya sea de residuos forestales o agrícolas (paja, leña, etc.) cuyo contenido de humedad sea menor que el 60%, para convertir en energía en este tipo de biomasa se usan procesos Termoquímicos o Físicos, obteniendo directamente energía térmica o productos secundarios tales como combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.

Ahora bien la biomasa húmeda es aquella que su contenido de humedad es superior al 60%, como por ejemplo aguas residuales urbanas, residuos ganaderos, residuos industriales

biodegradables, para su tratamiento se usan procesos químicos y en algunos casos particulares procesos físicos obteniendo combustibles líquidos o gaseosos. A continuación en la figura 2.2, se presenta el proceso energético de la biomasa.

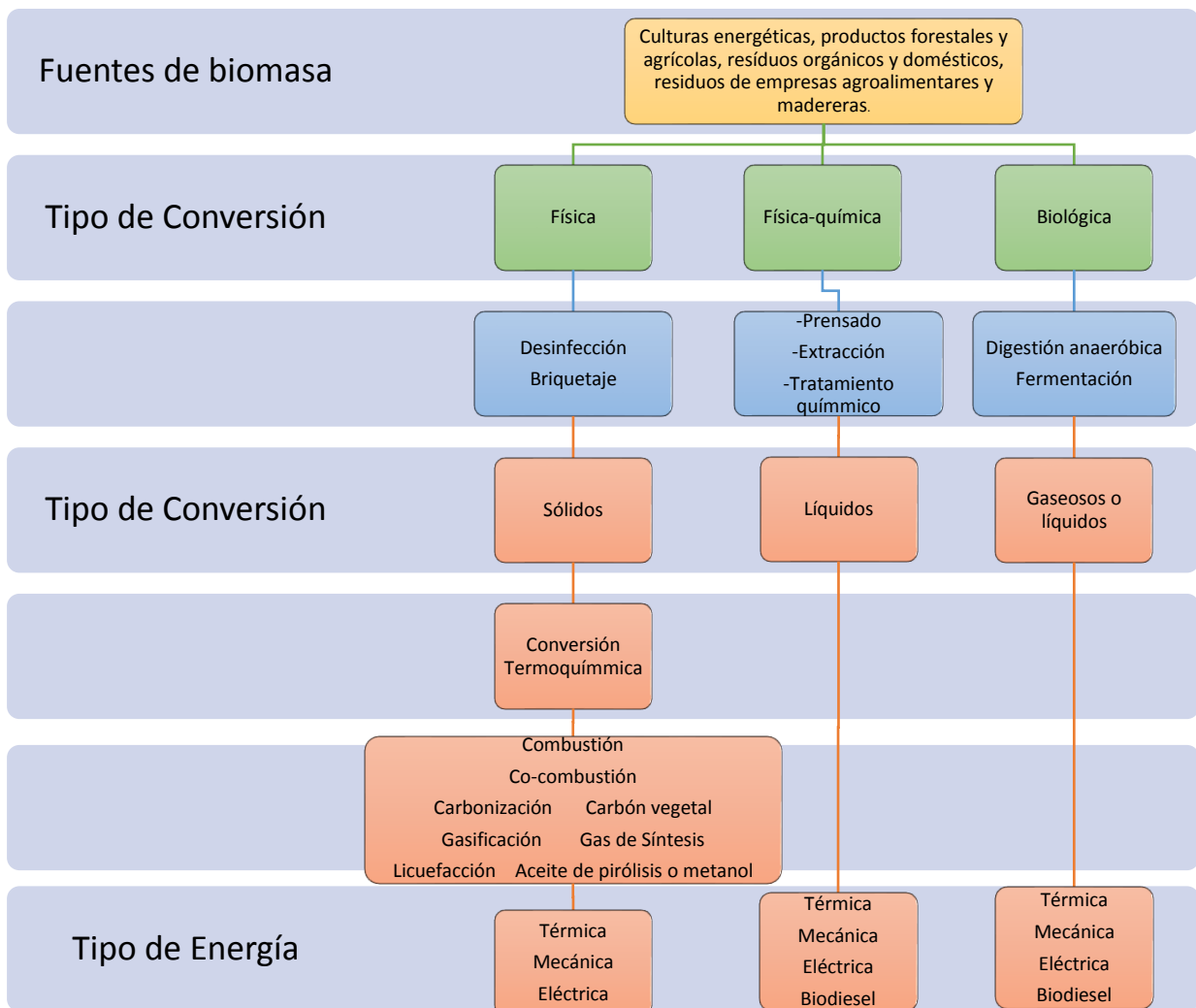


Fig. 2.2. Proceso Energético de la Biomasa.

2.2. BIOCOMBUSTIBLES

Este tipo de combustibles se obtienen a partir de biomasa, que es la materia orgánica producida por los productos y desechos de los seres vivos.

A diferencia de los combustibles que provienen de materia orgánica que se encuentra acumulada durante un gran período tiempo, se dice que la biomasa es una fuente renovable de energía ya que su formación no conlleva muchos años y su tasa de utilización no mucho mayor que su formación [3, p. 1].

2.2.1. Obtención de los Biocombustibles

Según la naturaleza de la biomasa, y el tipo de combustible deseado, se pueden utilizar diferentes métodos para obtener biocombustibles: mecánicos (astillado, trituración, compactación), termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), biotecnológicos (fermentación y digestión microbiana anaeróbica) y extractivos [3, p. 1].

2.2.2. Tipos de Biocombustible

Los principales biocombustibles son el bioetanol, biodiesel y biogás.

2.2.2.1. Bioetanol

Es un alcohol que se obtiene a partir de la fermentación de materia orgánica rica en azúcares, principalmente a partir de caña de azúcar o maíz (en algunos casos mezclado con otros cereales).

La producción de este biocombustible se basa en un proceso bien conocido como es la fermentación alcohólica. En todos los casos se parte de almidón o celulosa. Una vez hidrolizados para obtener glucosa, ésta se somete a fermentación de donde se obtiene el etanol [4].

Éste puede ser utilizado como combustible de vehículos ya sea puro o mezclado con gasolina en cantidades variables para de esta manera reducir el consumo de derivados de petróleo. El combustible resultante se conoce como “gasohol” o “alconafta”. También puede utilizarse como combustible en las celdas de combustible [5].

Los principales países productores de alcohol combustible son: Brasil que lo produce a partir de la caña de azúcar, Estados Unidos y Canadá lo producen a partir de maíz con un poco de trigo y cebada [3, p. 3].

2.2.2.2. Biodiesel

Es un biocombustible sintético líquido que se obtiene a partir de los lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, nuevos o usados, mediante procesos industriales de esterificación¹ y transesterificación², y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petro-diésel o gasóleo obtenido del petróleo.

El biodiesel tiene una cantidad de energía similar al diésel de petróleo pero es un combustible más limpio, y puede ser utilizado por cualquier tipo de motor diésel (en vehículos de transporte, embarcaciones, naves turísticas y lanchas) solo o como aditivos para mejorar la lubricidad del motor [3, p. 3].

2.2.2.3. Biogás

El biogás es obtenido a través de un proceso anaeróbico, es decir en ausencia de oxígeno por medio de microorganismos que permiten que ésta se descomponga en una mezcla de gases denominado biogás.

La mezcla de gases resultantes consiste principalmente de metano (50-75 vol. %) y de dióxido de carbono (25-50 vol. %). El biogás también contiene pequeñas cantidades de

¹ **Esterificación:** proceso por el cual se sintetiza un éster

Éster: es un compuesto derivado formalmente de la reacción química entre un ácido carboxílico y un alcohol.

² **Transesterificación:** proceso en el cual el glicerol contenido en los aceites es sustituido por un alcohol ante la presencia de un catalizador.

hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y otros gases, debido a que las bacterias que intervienen en este proceso son las siguientes [3, p. 5]:

- Hidrolíticas, que producen ácido acético, compuestos monocarbonados, ácidos grasos y otros compuestos policarbonados.
- Acetogénicas, son las productoras de hidrógeno.
- Homoacetogénicas, pueden convertir una cantidad considerable de compuestos carbonados en ácido acético.
- Metanogénicas, productoras del gas metano, principal componente del biogás.

Una planta de biogás es la instalación en la cual se genera o produce el biogás. Existen variedad en sus diseños y formas, ya que dependen del tipo de materia prima utilizada, materiales de construcción, su tamaño, etc.

El biogás rico en metano que puede ser empleado para generar energía eléctrica o mecánica mediante su combustión, sea en plantas industriales o para uso doméstico

2.3. FUNDAMENTOS DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica es un proceso biológico producido por varios microorganismos en ausencia de oxígeno que consiste en la degradación de la materia orgánica (residuos animales y vegetales), dando como resultado a un compuesto de gases (biogás), que como se mencionó anteriormente está constituido en su mayor parte por metano y una suspensión acuosa de materiales sólidos (*lodo o fango*).

Esta tecnología utiliza reactores (digestores) cerrados en los que se controlan los parámetros que favorecen el proceso de fermentación anaeróbica, éste es un proceso muy conocido ya que también se produce de un modo natural y espontáneo, como por ejemplo en pantanos, en yacimientos subterráneos o incluso en el estómago de los animales.

Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, efluentes de la industria alimentaria, fermentativa, papelera y de algunas industrias químicas en subproductos útiles.

En la digestión anaeróbica más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico [6, p. 14].

Éste proceso se clasifica como fermentación anaeróbica o respiración anaeróbica dependiendo del tipo de aceptores de electrones [6, p. 14].

2.3.1. Fermentación Anaeróbica:

En este proceso la materia orgánica es catabolizada³ en ausencia de un aceptor de electrones externo mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad.

³ **Catabolizar:** proceso orgánico mediante el cual se reducen diferentes elementos a sus formas más simples

El producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones.

En la figura 2.3, se puede observar la fermentación anaeróbica de glucosa en etanol. Cabe recalcar que la mayor parte (dos tercios) del metano se produce mediante fermentación anaeróbica en el cual el acetato actúa como dador y aceptor de electrones, lo cual se conoce comúnmente como metanogénesis acetotrófica.

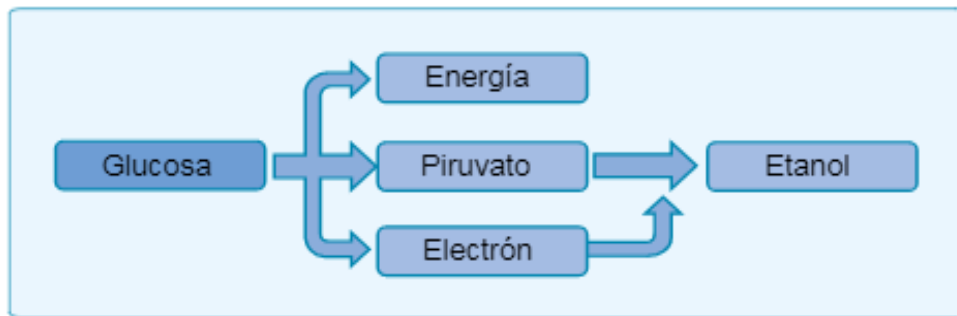


Fig. 2.3. Fermentación anaeróbica de la glucosa en etanol.

2.3.2. Respiración anaeróbica

La respiración anaeróbica es un proceso biológico de óxido-reducción de monosacáridos⁴ y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno, y más raramente una molécula orgánica.

La realizan exclusivamente algunos grupos de bacterias y para ello utilizan una cadena transportadora de electrones análoga a la de las mitocondria en la respiración aeróbica. No debe confundirse con la fermentación [6, p. 15].

En forma general puede decirse que la respiración anaeróbica es la serie de reacciones que suministran energía, en las que el oxígeno es el aceptor final de electrones. En la figura 2.4, se presenta el proceso de respiración anaeróbica.

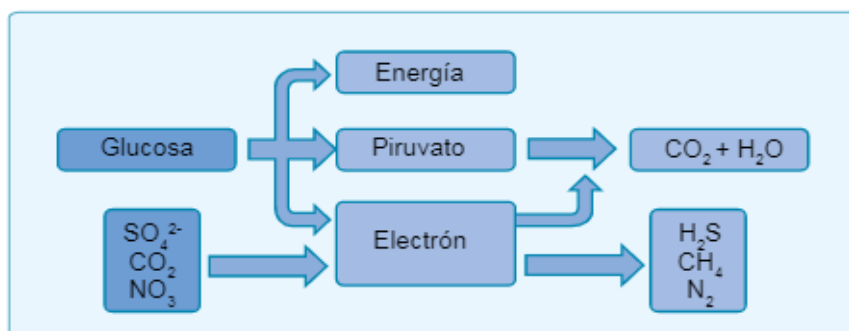


Fig. 2.4. Respiración anaeróbica

⁴ Los **monosacáridos** o **azúcares simples** son los glúcidos más sencillos; no se hidrolizan, es decir, que no se descomponen en otros compuestos más simples

Los productos finales que se obtienen de la digestión anaeróbica son el biogás y un bioabono que es un efluente estabilizado cuyas características dependen de la materia prima utilizada para la digestión.

2.3.3. Etapas de la Digestión Anaeróbica

El proceso de digestión anaeróbica es complejo debido a que se realiza una serie de reacciones bioquímicas y por la cantidad de microorganismos que intervienen en el proceso. Estudios tanto bioquímicos como microbiológicos realizados hasta ahora, han descompuesto el proceso en cuatro etapas:

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica

Hidrólisis: Es el primer paso para la descomposición anaeróbica, en el que los elementos complejos de la materia orgánica utilizada se divide en compuestos orgánicos más simples, este proceso es controlado por enzimas extracelulares.

Etapa fermentativa o acidogénica: en esta etapa los productos generados en la hidrólisis se convierten en productos intermedios como dióxido de carbono, hidrógeno, ácidos y alcoholes alifáticos, metilamina, amoníaco y sulfhídrico, a través de bacterias fermentadoras.

Etapa acetogénica: las bacterias acetogénicas, transforman los productos que no pudieron ser metabolizados en la segunda etapa (etanol, ácidos grasos volátiles, compuestos aromáticos), en compuestos más simples como ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

Etapa metanogénica: es la etapa final para la generación de biogás, en esta etapa un grupo de bacterias metanogénicas estrictamente anaeróbicas se encargan de transformar el ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno.

Las cuatro fases que se cumplen en la digestión anaeróbica ocurren simultáneamente en un proceso de etapa única. Debido a que las bacterias que intervienen en cada una de las fases antes mencionadas tienen distintas necesidades en términos de hábitat se debe encontrar una solución adecuada en la tecnología del proceso.

Puesto que los microorganismos metanogénicos son el eslabón más débil en la biocenosis debido a su baja tasa de crecimiento y son los más sensibles en responder a las perturbaciones, las condiciones ambientales se tienen que ser apropiadas a las necesidades de las bacterias que forman metano. En la figura 2.5 se puede observar el proceso de digestión anaeróbica y cada una de sus etapas.

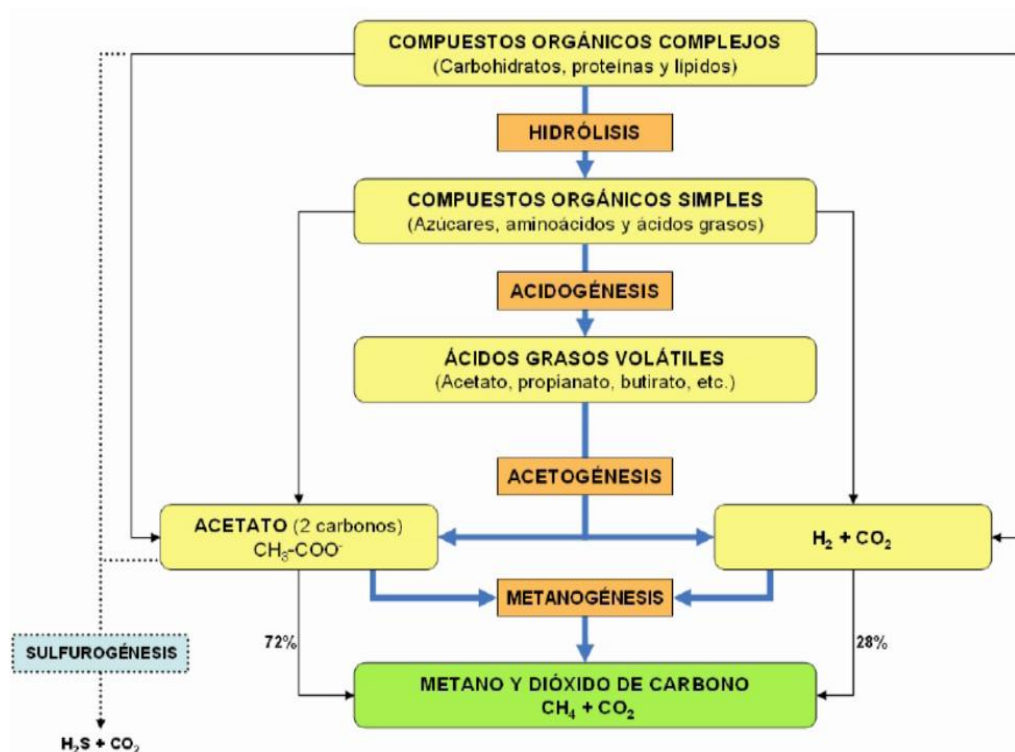


Fig. 2.5. Esquema del proceso de Digestión Anaeróbica.

2.3.4. Factores determinantes en la producción de Biogás en el Reactor

Una de las tecnologías utilizadas para la producción de biogás es el reactor anaeróbico, que es una cámara que facilita la degradación de la materia orgánica inicial, para producir el biogás y un lodo digerido (bio-abono) que puede ser usado posteriormente como fertilizante o abono natural para cultivos.

Como ya se mencionó, para que el proceso pueda desarrollarse se deben mantener una serie de condiciones ambientales y operacionales adecuadas, para ello se controlan diversos parámetros ambientales tales como:

- Oxígeno
- Temperatura
- Valor del potencial de hidrógeno (pH)
- Suministro de nutrientes
- Inhibidores

Oxígeno: Los microorganismos metanogénicos dependen de un ambiente carente de oxígeno, la mayoría de estos microorganismos mueren incluso a exposiciones de pequeñas cantidades de oxígeno.

Pero en el proceso de digestión anaeróbica la actividad de las bacterias metanogénicas no se inhibe es debido a que también existen otras que consumen oxígeno de las etapas precedentes a la degradación; a estas bacterias se las llama bacterias anaeróbicas facultativas ya que pueden sobrevivir con o sin oxígeno.

Temperatura: es uno de los parámetros más importantes en procesos anaeróbicos ya que si aumenta la temperatura aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y acelera el proceso de digestión produciendo una mayor cantidad de biogás.

Pero hay que tener cuidado con los cambios bruscos de temperatura ya que esto puede ocasionar la muerte de varios microorganismos desestabilizando el proceso, motivo por el cual es necesario mantener la estabilidad a una cierta temperatura.

Existen tres grupos de microorganismos que participan en la descomposición en función de la temperatura.

- Microorganismos psicrófilicos a temperaturas por debajo de los 25°C
- Microorganismos mesófilico entre 37°C y 42°C
- Microorganismos termófilicos entre 50°C y 60°C

Valor de pH

Al igual que la temperatura un pequeño cambio en el valor de PH óptimo afecta significativamente a los microorganismos metanogénicos ya que estos son más susceptibles que los demás microorganismos que intervienen en el proceso de digestión anaeróbica.

Los diferentes grupos bacterianos presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5,5 y 6,5 para acidogénicos y entre 7,8 y 8,2 para metanogénicos y el pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6,8 y 7,4, el pH neutro sería el ideal, conforme figura 2.6 [6, p. 43].

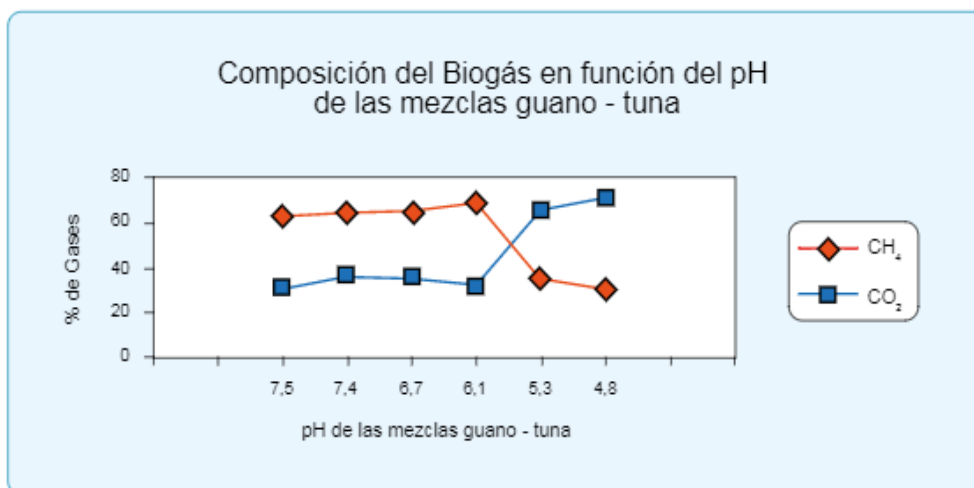


Fig. 2.6. Composición del Biogás en función del pH.

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0, ya que si existe un pH bajo se reduce la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético y H₂, es decir el biogás generado es muy pobre en metano y por tanto, tiene menores cualidades energéticas.

Suministro de nutrientes

La tasa de crecimiento actividad de los microorganismos que intervienen en la digestión anaeróbica, depende de los macronutrientes, micronutriente y vitaminas, es por ello que para obtener tanto metano como sea posible es necesario suministrar los nutrientes óptimos a dichos microorganismos.

La cantidad de metano que se puede obtener finalmente, depende de las proporciones de proteínas, grasas y carbohidratos que contengan. Se necesita una tasa equilibrada entre macronutrientes y micronutrientes para asegurar un manejo estable del proceso.

Las principales fuentes de alimento de las bacterias que forman el metano son el Carbono y el Nitrógeno, ya que el carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación C/N óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 [6, p. 35].

Un alto contenido de carbono (superior a 35:1) la descomposición de materiales ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo debido a la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

Inhibidores

La digestión anaeróbica puede ser impedida por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Sustancias tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles, forman parte del primer grupo, en tanto que, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga, forman parte del último grupo mencionado.

2.4. BIODIGESTORES DE PEQUEÑA ESCALA

2.4.1. Biodigestores

Son contenedores cerrados herméticamente en los cuales se depositan residuos orgánicos para ser descompuestos y producir biogás, el cual podrá reemplazar o complementar el gas natural, también se produce un compuesto fertilizante natural llamado biol o digestato, mismo que puede usarse como abono para mejorar el suelo del jardín y abonar las plantas. El proceso de descomposición en el interior del biodigestor es un proceso biológico (digestión anaeróbica), descrita en los puntos anteriores. En la figura 2.7 se presenta el esquema de un biodigestor de domo fijo.

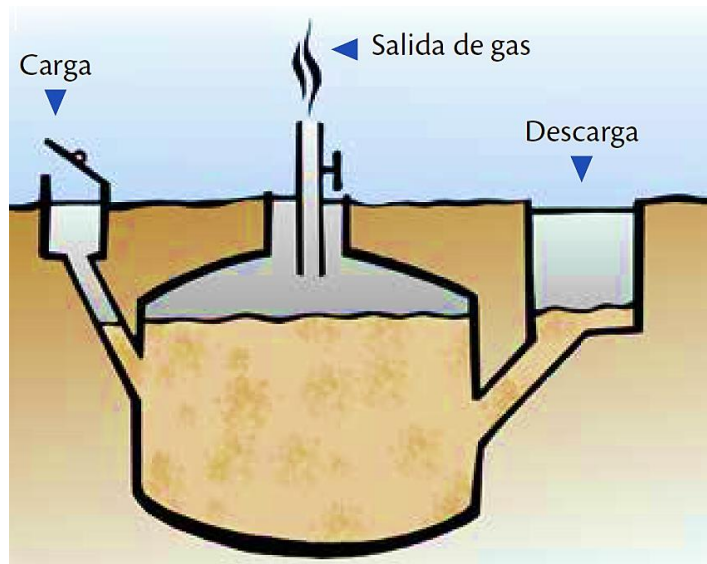


Fig. 2.7. Biodigestor de domo fijo

Los biodigestores pueden ser[7]:

- Biodigestores de flujo Continuo
- Biodigestores de flujo Semicontinuo
- Biodigestores de flujo Discontinuo

Biodigestores de flujo Continuo: Son aquellos en los que la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga, con producciones de biogás, uniformes en el tiempo [7]. Este tipo de biodigestores son usados por lo general en el tratamiento de aguas residuales [8].

Biodigestores de flujo Semicontinuo: realizan la descarga del material orgánico algunas veces al día y por lo general requieren de una mezcla más fluida y movilizadada [8].

Biodigestores de flujo Discontinuo: Se cargan con materias primas en una sola carga o lote. Estos biodigestores normalmente se aplican a concentraciones de residuos con una alta concentración de sólidos en los que exista la dificultad de tener un sistema de bombeo como por ejemplo los residuos de ganado [9, p. 37].

Los tipos de biodigestores más usados son:

- a) **Biodigestor de tambor flotante:** existen varios diseños pero por lo general son verticales y enterrados, constan de un recipiente móvil para gas, Éste recipiente flota, ya sea sobre la mezcla de fermentación o en una chaqueta de agua [9, p. 39].

En la figura 2.8, se presenta un diagrama de un biodigestor de tambor flotante.

Una de sus ventajas se debe a que su operación es simple y fácil de entender, puesto que el volumen de gas almacenado es de fácil visibilidad directamente y sus desventajas se encuentra en los altos costos de los materiales para el tambor de acero y la susceptibilidad a la corrosión por estar compuesto de acero, por lo que reduce y limita la vida útil de este biodigestor.

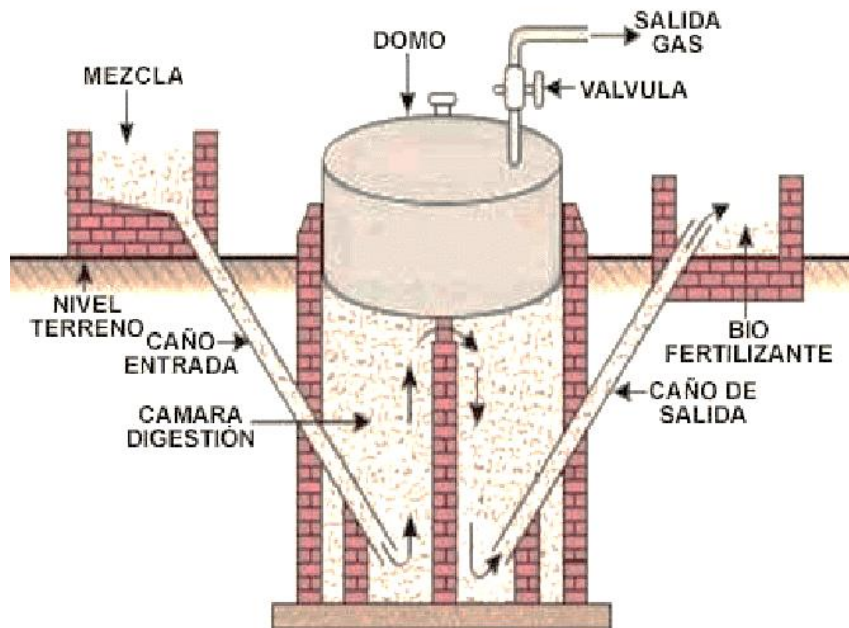


Fig. 2.8. Diagrama de un Biodigestor de tambor flotante.

- b) **Biodigestor chino o cúpula fija:** son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo, y se construyen totalmente enterrados, básicamente cuentan con un recipiente fijo para el gas, el mismo que se encuentra en la parte superior del digestor.

Algunas de las ventajas presenta este tipo de biodigestores son la vida útil larga y el relativo bajo costo de construcción. Una de las desventajas es que es poco eficiente para generar biogás pero es excelente en la producción de bio-fertilizante, ya que los tiempos de retención son en general extensos. En la figura 2.9 se presenta el diagrama de un biodigestor de domo fijo.

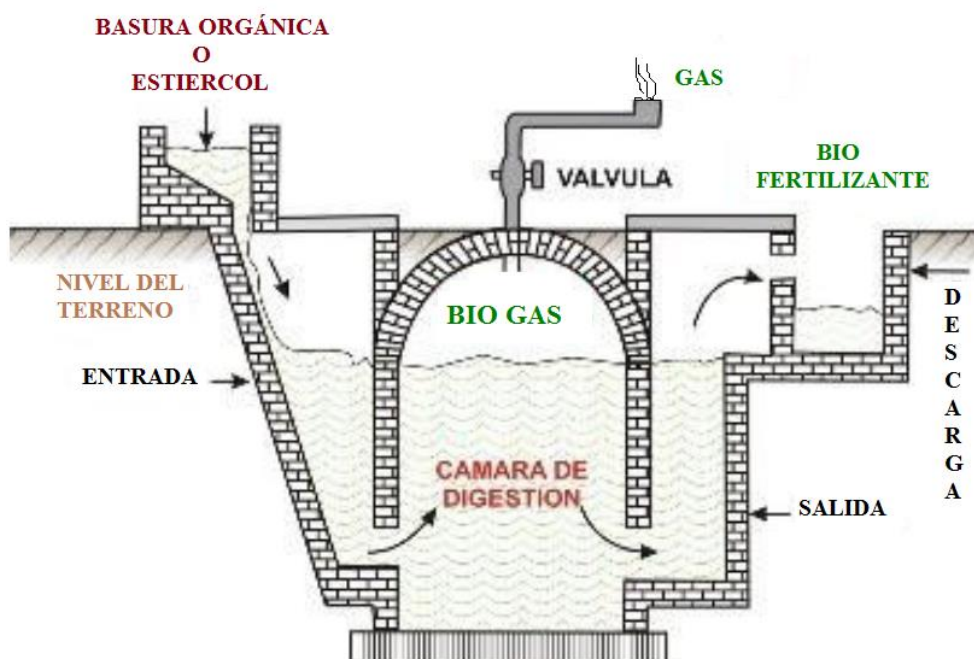


Fig. 2.9. Diagrama de un biodigestor de domo fijo.

- c) **Biodigestor tubular:** Es una manga hermética cerrada de forma cilíndrica, fabricada en material de geomembrana de PVC con alta protección a la acción de los rayos ultra violeta, impermeable al agua y baja permeabilidad a los gases. Es fabricado mediante sellado electrónico de alta frecuencia; en los extremos del biodigestor se instalan 3 tuberías de PVC de 4” de diámetro para que, por un lado se cargue al biodigestor la mezcla del estiércol con agua en una proporción de 1:3, es decir 1 parte de estiércol y 3 partes de agua [10]. En la figura 2.10 se muestra un biodigestor tubular.



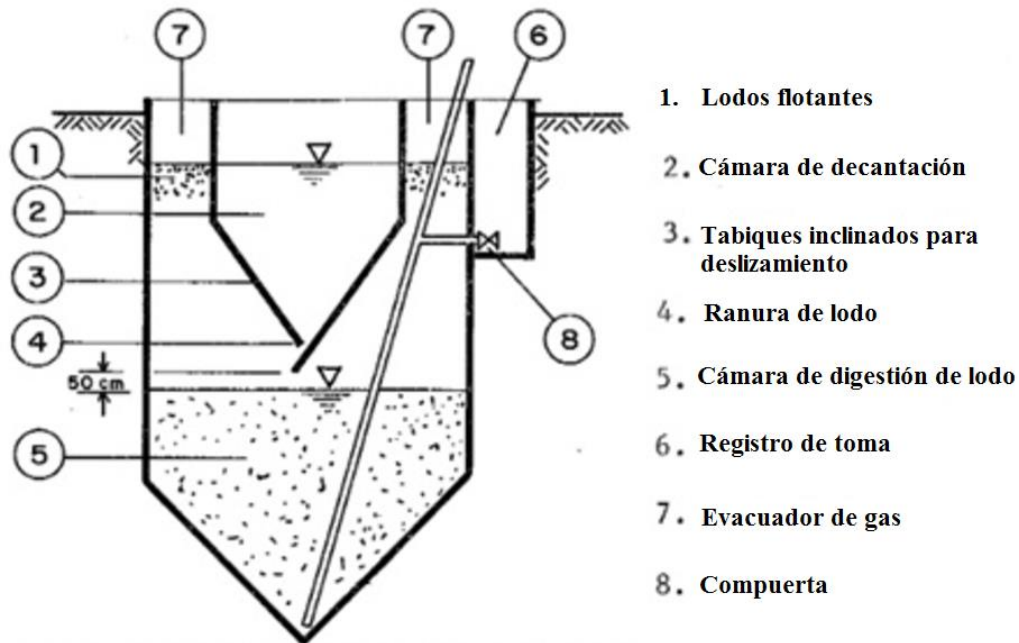
Fig. 2.10. Biodigestor Tubular

2.4.2. Aplicación de Biodigestores de pequeña escala

Las primeras apariciones de los biodigestores de los cuales se tiene conocimiento fueron en 1890 en la India, aquí se construyó el primer biodigestor a escala real y en 1896 en Exeter, Inglaterra los biodigestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad producían biogás que era usado en las lámparas de alumbrado público [11, p. 15].

Tras las guerras mundiales se empieza a difundir este tipo de tecnología por Europa, para usar el biogás en tractores y automóviles de la época. En todo el mundo se propagó el uso de los tanques Imhoff⁵ para producir biogás que sería usado para el funcionamiento de las propias plantas, en vehículos municipales e incluso en algunas ciudades se llegó a conectar el biogás a la red comunal. En los años de la segunda guerra mundial se propaga el uso de biodigestores a nivel rural en países como China, India y en Europa. En la figura 2.11 se puede apreciar el esquema de un tanque Imhoff.

⁵ El tanque **Imhoff** es un tipo de tanque de doble función -recepción y procesamiento- para aguas residuales.



Fuente: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/022518/022518-18.pdf>

Fig. 2.11. Esquema de un tanque Imhoff.

El desarrollo de este tipo de tecnología fue interrumpida por el fácil acceso a los combustibles fósiles, pero es en la crisis energética de la década de los 70 en la que se reinicia con mucho ímpetu la investigación y desarrollo de esta tecnología a nivel mundial y la mayoría de los países latinoamericanos.

Los últimos 20 años han sido muy fructíferos en cuanto a la investigación y desarrollo del funcionamiento microbiológico y bioquímico que usan los procesos anaeróbicos. Los países más importantes que han desarrollado esta fuente de energía son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EEUU, Filipinas y Alemania [11, p. 16].

A nivel de Latinoamérica y el Caribe (LAC), los biodigestores han empezado a implementarse desde los años setenta y ochenta a través de proyectos pilotos, lo cuales tenían como objetivo estudiar que dicha tecnología era viable y se podía obtener biogás mediante productos orgánicos, principalmente estiércol, para lo cual se usaron sistemas sencillos como el biodigestor de domo fijo, a pesar de que se pudo demostrar su objetivo, éste tuvo inconvenientes debido a que el costo de implementación y mantenimiento eran elevados es decir se analizaron datos técnicos pero se dejaron de lado los aspectos socio-económicos.

Motivo por el cual a finales de los ochenta y principios de los noventa se cambió el uso de biodigestores de domo fijo por biodigestores tubulares ya que estos resultaban más económicos y más sencillos de instalar. En la primera década del siglo XXI, tras numerosos proyectos fallidos con tubulares, se concluyó que el problema de estos era su fragilidad y su poca vida útil, sin prestar atención a los aspectos socioeconómico [12, p. 19]. Esto se trató de solucionar usando material más resistente como es la geo-membrana en la elaboración de éste tipo de biodigestores, lo que llevó a que éstos sean más costosos pero con una vida útil más larga.

A partir de 2006 se empieza a constatar la inviabilidad de la masificación de los biodigestores, entre los productores agropecuarios de mediana y pequeña escala, empleando proyectos aislados que no consideran los factores técnicos, sociales y económicos juntos, independientemente del modelo de biodigestor empleado. Lo cual lleva a reflexionar acerca de los factores de éxito y de fracaso, los países empiezan a buscar las lecciones y experiencias de otras regiones que ya hayan tratado con biodigestores, motivo por el cual en el 2009 se realiza en Perú el primer encuentro de intercambio de experiencias en biodigestores entre actores de diferentes países de LAC. Esto condujo a la formación de la RedBioLAC al año siguiente en Costa Rica (2010) [12, p. 20].

En esta década se empieza a revalorizar los demás productos (además del biogás) que se obtienen de los biodigestores tales como, el bio-fertilizante y el potencial del biodigestor como sistema de gestión y tratamiento adecuado de residuos orgánicos. Además se formalizan alianzas entre universidades y centros de investigación con empresas y Organizaciones no Gubernamentales (ONGs) para optimizar las tecnologías, monitorear el funcionamiento de sistemas, y profundizar en las aplicaciones de biogás y bio-fertilizante.

Actualmente en LAC existen varios proyectos de mediana y pequeña escala para el uso de biodigestores, en la tabla 2.1 se presentan las organizaciones y los países en los que se vienen implementando el uso de biodigestores.

PAÍS	ORGANIZACIÓN	ACTIVIDADES
Bolivia	PROSUCO (Asociación Promoción de la Sustentabilidad y Conocimientos Compartidos) ONG	Enfocada en combatir la pobreza, agricultura sostenible y cambio climático
Chile	Bioconstructora de mujeres	Organización integradora de estrategias de trabajo colectivo entre mujeres, utilizan técnicas constructivas y materiales de bajo impacto ambiental
México	Sistema Biobolsa	Empresa de biodigestores
Costa Rica	Viogaz	Empresa de biodigestores
Colombia	ASPROINCA (Asociación de Productores Indígenas y Campesinos de Riosucio, Caldas)	Autosuficiencia alimentaria, biodiversidad, manejo integrado de recursos naturales, agroecología

Tabla 2.1. Organizaciones y países de LAC donde se han desarrollado proyectos con biodigestores.

2.5. SITUACIÓN ACTUAL DEL USO DE BIOMASA A NIVEL MUNDIAL

La bioenergía es una de las fuentes de energía renovable que más contribuye al suministro energético global primario, es decir tiene un rol muy importante en los tres sectores de energía como son el calor, la electricidad y el transporte, la demanda total de energía suministrada por la biomasa en 2015 fue de aproximadamente 60 exajoules (EJ) [13, p. 43].

Según el informe global del estado de la energías renovables (RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT), el uso de biomasa para producir energía ha estado creciendo

alrededor del 2% anual desde 2010 y la participación en el consumo global total de energía primaria se ha mantenido relativamente constante, alrededor del 10% desde el 2005.

Este tipo de energía se puede usar principalmente como sólidos, líquidos o gases, ya sea quemándolo directamente para producir calor o cocinar en el sector residencial utilizando métodos tradicionales o modernos, también se puede usar para generar calor a gran escala ya sea para clientes residenciales, comerciales o industriales; el calor puede ser producido directamente o coproducido con electricidad mediante sistemas combinados de calor y electricidad.

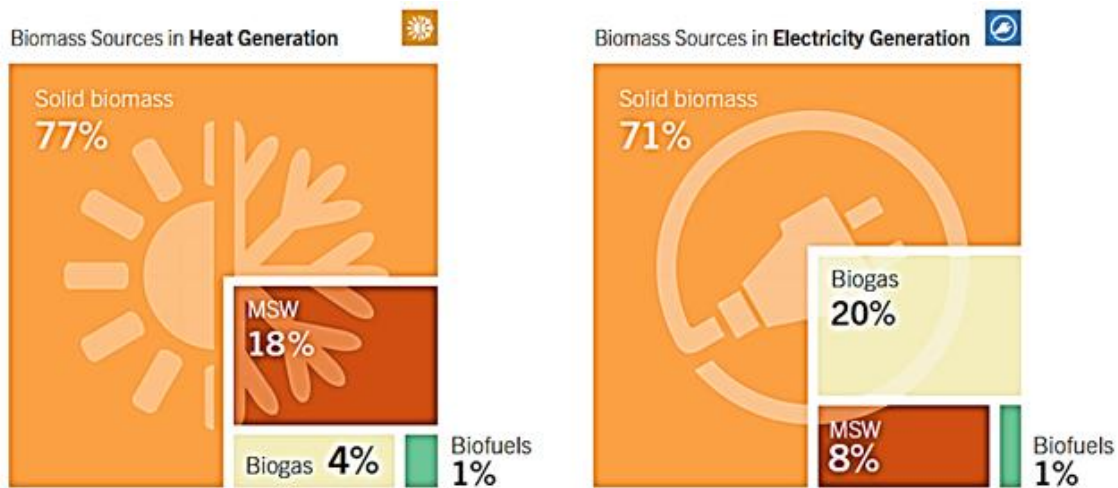
El consumo de leña para los usos tradicionales de la energía se mantuvo estable en 2015 en comparación con años anteriores, en un estimado de 1,9 mil millones de metros cúbicos (m³) [13, p. 14].

Ahora bien a nivel mundial la producción de calor a partir de la biomasa, se puede decir que Asia, América del Sur y África son las regiones donde se consumen las mayores proporciones de leña (así como otros combustibles como estiércol y residuos agrícolas), en tanto a generación de calor mediante biomasa los principales países consumidores de esta energía en el sector de la construcción son: Estados Unidos, Alemania, Francia, Suecia, Italia y Finlandia y que Europa es el mayor consumidor por región, esto debido en gran parte a los esfuerzos de los Estados miembros de la UE para cumplir los objetivos obligatorios establecidos en la Directiva sobre las energías renovables.

El aumento de la demanda de este tipo de energía es impulsado en su gran mayoría de los casos por los amplios recursos de biomasa de los países, el uso generalizado de la calefacción urbana y el deseo de reducir las cantidades de gas natural importado. En Lituania, por ejemplo, el 61% de la energía utilizada en la calefacción urbana en 2015 se derivó de los residuos de la industria forestal local, la capacidad de calor basada en la biomasa se triplicó entre 2011 y 2015, a 1.530 MWh [13, p. 44].

A nivel mundial Asia lidera el uso de digestores de biogás a pequeña escala para producir gas para cocción y calefacción, además más de 100 millones de personas en el área rural de China y 4,83 millones de personas en la India tienen acceso a gas proveniente de biodigestores.

A continuación en la figura 2.12 se presenta un cuadro con los porcentajes del uso de biomasa ya sea para generar calor como para electricidad, a nivel mundial y en la figura 2.13, se puede apreciar la producción global de biocombustibles a nivel global.



Municipal solid waste (MSW) includes the renewable portion only.

Fig. 2.12. Fuentes de Biomasa para la generación global de Calor y Electricidad.

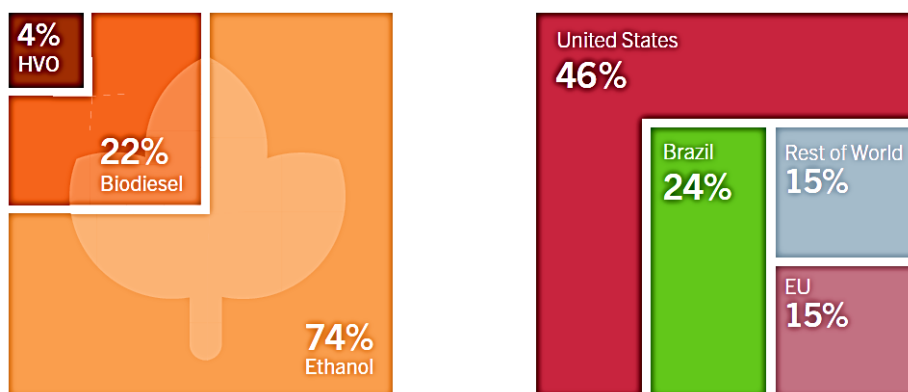


Fig. 2.13. Producción global de biocombustibles por tipo y por País/ Región

A continuación se hablará sobre la producción de electricidad a partir de la biomasa, los principales países para la generación de electricidad a partir de esta fuente de energía en el 2015 fueron: Estados Unidos de América (69 TWh), Alemania (50 TWh), China (48 TWh), Brasil (40 TWh) y Japón (36 TWh), seguidos por Reino Unido e India [13, p. 46].

La capacidad de bioenergía a nivel global aumentó en un estimado del 5% estimado en 2015, a 106,4 GW, y la generación aumentó un 8% a 464 TWh; el aumento de la generación se debió en parte al mayor uso de la capacidad existente.

Por países se puede decir lo siguiente, en Estados Unidos de América es uno de los grandes productores de electricidad a partir de esta fuente de energía renovable, en 2013, había cerca de 80 plantas de generación de energía a partir de los residuos, que generaban electricidad o producían vapor. Estas plantas quemaron cerca de 30 millones de toneladas de Residuos sólidos Municipales (Municipal Solid Waste, MSW) y generaron cerca de 14 mil millones de kilovatios de electricidad, aproximadamente la misma cantidad utilizada por 1,3 millones de hogares en 2013. Muchos rellenos sanitarios grandes también generan electricidad usando el gas metano que se produce a medida que la biomasa se descompone en el vertedero [14].

En el 2015 la capacidad de operación incrementó en un 4% a 16,7 GW y la generación en este mismo año fue aproximadamente de 69.3 TWh [13, p. 46].

En Europa continua creciendo la producción de bioenergía a partir de fuentes de biomasa sólida y de biogás, Alemania sigue siendo uno de los más grandes productores de bioenergía en este continente, para finales de 2013, funcionaban en Alemania unas 7.700 plantas de biogás con una capacidad total instalada de alrededor 3,5 GW de potencia eléctrica. Estas plantas producían a cerca de 24.000 GWh de electricidad, en 2014 alrededor de 151 plantas de biometano suministraban la red alemana de distribución de gas [15].

Ahora bien en 2015 Alemania mantuvo su capacidad en 7,1 GW, gran parte de esta capacidad (4,8 GW) se refiere a instalaciones de biogás basadas en cultivos energéticos, puesto que este país es simultáneamente líder del mercado y de la tecnología y ha adquirido importantes conocimientos, especialmente en el ámbito de la gasificación basada en residuos orgánicos y recursos renovables, sin embargo, el crecimiento de la capacidad de energía del biogás fue limitado en 2015 debido a reducciones en el apoyo financiero para las plantas de biogás. La producción de bioelectricidad aumentó un 2% en 2014, a 50 TWh [13, p. 46].

Por otra parte en Europa en el Reino Unido, en el 2015 se ha incrementado tanto la capacidad como la generación de bioenergía de un 12% a 27%, convirtiendo de esta manera al país en el sexto mayor consumidor de biomasa para la producción de electricidad. Alrededor del 4% de electricidad es producido por biomasa en éste país.

En China, la capacidad de bioenergía alcanzó 10,3 GW en 2015, un aumento de 0,8 GW durante el año. La generación aumentó un 16% respecto a 2014, a un estimado de 48,3 TWh.

En Asia, Japón ha realizado grandes esfuerzos para estimular el uso de energías renovables tras el desastre nuclear de Fukushima, tales esfuerzos han tenido como resultado un mayor uso de bioenergía.

En India, la capacidad de bioenergía registró ganancias relativamente pequeñas en 2015, la capacidad de la red aumentó en 144 MW (un 0,3%) a 4,67 GW y la capacidad fuera de la red aumentó 18,9MW (hasta 2%) hasta 927 MW [13, p. 46].

En Brasil, la producción de bioenergía se basa principalmente en residuos de caña de azúcar, como el bagazo, el cual se usa como combustible. La capacidad aumentó 250 MW en el período 2013-2015, a 9,7 GW a finales de 2015, tuvo un crecimiento lento debido a que la energía eólica fue la que dominó las energías renovables de este país durante dicho período. En la figura 2.14 se presenta el uso de la biomasa para producir energía, por región o país.

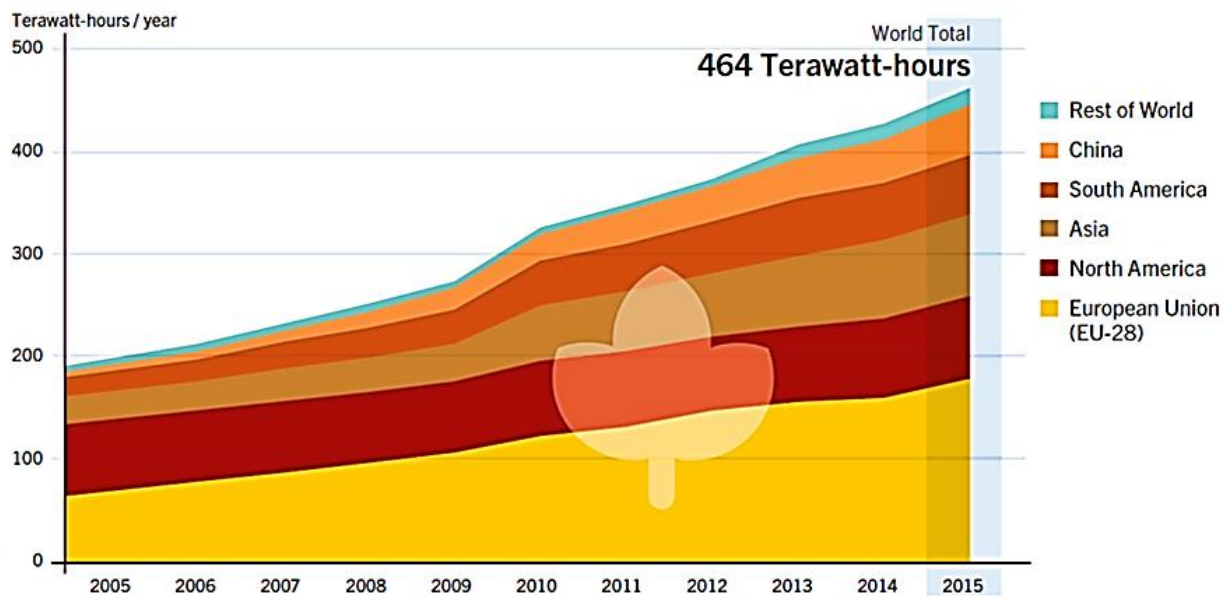


Fig. 2.14. Generación a nivel Global de Bioenergía por País/Región

La mayor parte de la producción de biogás se encuentra en Estados Unidos y Europa, aunque otras regiones también están desplegando la tecnología, como es el caso de Macedonia que en el 2015 construyó la primera planta de biogás. Ésta planta digiere residuos de ganado y tiene una capacidad de generación de energía de 3 MW. También durante el año, el Banco Europeo para la Reconstrucción y el Desarrollo (BERD) acordó proporcionar USD 32 millones para una planta de biogás en Ucrania [13, p. 49].

En Asia, especialmente en Tailandia e Indonesia, se están expandiendo las plantas de digestión anaeróbica para tratar los efluentes y desechos líquidos, entre las principales materias primas se tienen los efluentes de la producción de almidón de yuca, procesamiento de aceite de palma y producción de etanol.

Por ejemplo, a principios de 2016, el proyecto de residuos de energía de Krabi comenzó a operar en Tailandia, procesando el efluente del molino de aceite de palma y produciendo 12.300 MWh anuales, que se exporta a la red eléctrica vecina [16].

De igual manera en África la producción de biogás se ha ido incrementando, en particular proyectos basados en residuos que incluyen gas de vertedero de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y residuos agrícolas. En Octubre de 2015 el proyecto Bronkhorstspruit en Sudáfrica, inyectó energía por primera vez a la red nacional, este proyecto tiene una capacidad instalada de 4,6 MW a partir de la digestión de residuos de ganado, es el primer proyecto de este tipo en la región [17].

En Kenia, existe un sistema de digestores de 2,2 MW conectados a la red, que usa residuos de cultivos locales, se inauguró en el país de Nakuru. En Dakar, Senegal, los desechos animales en un matadero se digieren y se utilizan en un sistema de cogeneración para generar electricidad y calor; Produce 800 MWh de electricidad y 1.600 MWh de energía térmica anualmente para uso interno [13, p. 49].

2.6. SITUACIÓN ACTUAL DEL USO DE BIOMASA EN ECUADOR

Actualmente el Ecuador apunta a la diversificación de la matriz energética con la incorporación de energías renovables, entre ellas, aquella proveniente de la biomasa, con la finalidad de reemplazar el uso de combustibles fósiles altamente contaminantes y garantizar su autonomía energética.

En este sentido se han venido desarrollando varios proyectos para producir energía a partir de fuentes renovables tales como, hidroeléctricas, eólica, solar, biomasa, entre otras, a continuación en la figura 2.15, se presenta la evolución proyectada de la generación por tipo de tecnología en el periodo 2013 - 2022.

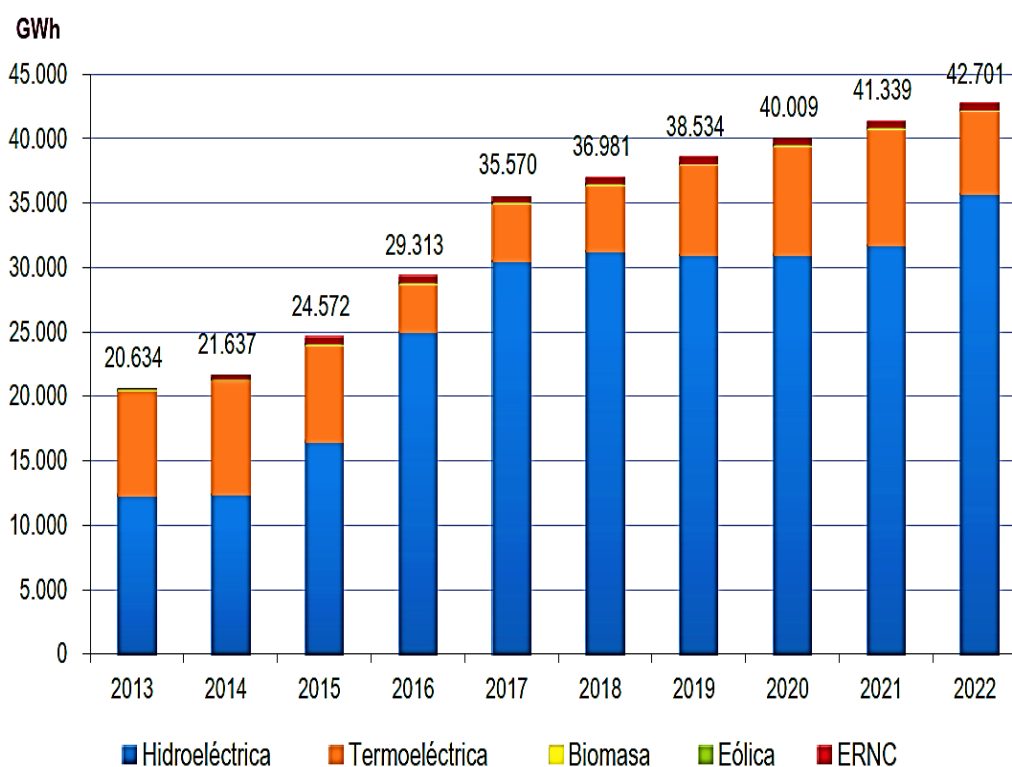


Fig. 2.15. Evolución proyectada de la Generación por tipo de Tecnología.

La generación a través de biomasa en el Ecuador se ha desarrollado principalmente mediante el aprovechamiento del bagazo de caña en los grandes ingenios azucareros y gracias a los proyectos impulsados por el MEER para la elaboración de biocombustibles y construcción de biodigestores, entre otros se tiene por ejemplo el proyecto para generar electricidad a partir del aceite de piñón para sustituir el uso de diésel para generar electricidad en la Isla Floreana perteneciente a las Islas Galápagos.

En las grandes ciudades donde los residuos sólidos son considerables, se pueden aprovechar mediante las plantas de tratamiento de basura que incluyan centrales de generación de energía eléctrica, una empresa española concluyó los estudios de factibilidad de un proyecto al cual la Agencia de Control y Regulación de Electricidad (ARCONEL), antes CONELEC,

otorgó el Permiso respectivo para la construcción de una planta generadora (10,7 MW) en la ciudad de Chone bajo el auspicio del Municipio de esa ciudad [18, p. 290].

Se están analizando la producción de biocombustibles basados en alimentos, ya que su utilización podría afectar tanto el abastecimiento de suministros a la población, cuanto el uso de la tierra para producción de monocultivos para biocombustibles, puesto que son por lo general más extensos que los necesarios para la alimentación de la población.

2.7. GENERACION DISTRIBUIDA EN EL MUNDO Y ECUADOR, ESPECIALMENTE RELACIONADA CON BIOGAS

De acuerdo a las estadísticas del sector eléctrico ecuatoriano para el 2011, la composición energética renovable en el Ecuador está dividida en: hidráulica 46 %, biomasa 1,97%, eólica 0,03% y solar fotovoltaica 0,002%. Aún no se han desarrollado más investigaciones sobre los demás recursos renovables no convencionales pero existen estudios y proyectos en: energía solar, geotérmica, biomasa y eólica [18, p. 287].

En el Ecuador ya se han instalado algunas centrales térmicas a biomasa, principalmente en base a la utilización del bagazo de caña en el sector privado. Debido a que en el Ecuador existen recursos de biomasa muy variados, es necesario analizarlos detalladamente en cuando a la producción de bioenergía.

En la ciudad de Cuenca, en el Relleno Sanitario de Pichacay de la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca, EMAC EP se procesaron aproximadamente 864 m³/h de biogás en el 2012. La energía eléctrica será producida por dos generadores de combustión interna a biogás (gas metano), para una potencia estimada de 2 MW [19].

Existen también programas de promoción por parte de las entidades gubernamentales relacionadas al agro, mediante los cuales se pretende fomentar la producción de biogás por medio de construcción de biodigestores para el aprovechamiento de los desechos animales o vegetales en las zonas de producción ganadera o agrícola. La finalidad de este tipo de programas es obtener el combustible necesario para utilizarlo en motores para bombeo, calefacción e iluminación en los sitios en donde se produzca este biocombustible.

El MEER se encuentra desarrollando importantes proyectos para aprovechamiento de la biomasa. Uno de ellos consiste en la construcción de biodigestores a nivel nacional para el aprovechamiento de residuos sólidos de origen agrícola y urbano. Actualmente a través de este proyecto se cuenta con dos biodigestores, uno en el Jardín Botánico de Quito y otro en el Camal Metropolitano.

Otro proyecto que se lleva a cabo consiste en la contratación de los estudios de consultoría de factibilidad para la elaboración de biocombustible a partir del aceite de palma en Galápagos mediante la iniciativa “Cero Combustibles Fósiles en Galápagos” Alemana. Este

proyecto prevé la producción de la planta y extracción del aceite en las provincias de Manabí y Santa Elena y la generación eléctrica en la Isla Floreana.

Ahora bien en Sudamérica algunas aerolíneas ya han utilizado biocombustibles para realizar viajes, como proyectos piloto, la Agencia Internacional de Transporte Aéreo, IATA, tiene como meta que el 5% de los vuelos sean operados con biocombustibles de segunda generación para el año 2020.

Otro proyecto piloto que se inició en el 2011 es el denominado Ecopaís, en la ciudad de Guayaquil el cual consiste en comercializar un combustible mezcla de 95% gasolina y 5% etanol, el plan tendrá una evaluación de dos años antes de extenderlo a todo el Ecuador.

Por otra parte en cuanto a generación de electricidad mediante energías renovables se tienen varios proyectos en estudio o construcción ya sean estos fotovoltaicos, eólicos o de biomasa en el Ecuador, en el anexo 1, se presenta un mapa con los diferentes proyectos de generación de electricidad a partir de fuentes renovables.



Fig. 2.16. Fuentes de Energía eólica, biomasa, solar, e hídrica.

3. CAPÍTULO

El trabajo realizado está enfocado en un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), motivo por el cual este capítulo está enfocado en dar a conocer que es un ACV, las etapas que se desarrollan dentro de este, las normas aplicables que permiten desarrollar este análisis de la manera correcta, también se presenta información sobre el software utilizado para este propósito.

3.1. ANALISIS DEL CICLO DE VIDA

3.1.1. Definición ACV

El legado de un medio ambiente apto para la continuidad de las futuras generaciones se ha convertido en una de las principales preocupaciones a nivel mundial, razón por la cual han sido desarrollados diversos tratados, normativas y procedimientos que promueven la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente.

Todas las actividades o procesos involucran impactos medioambientales, ya que emiten sustancias al entorno y generan modificaciones ambientales durante su periodo vital (cambio climático, reducción de la capa de ozono, eutrofización, acidificación, etc.). El análisis de los impactos producidos durante el periodo de vida de un producto o servicio, así como el desarrollo de estrategias adecuadas para su disminución puede ser evaluado a través de la herramienta de análisis de impacto ambiental denominada Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Existen varias definiciones del ACV, las cuales están orientadas a un objetivo común (evaluación y disminución de impactos ambientales), para el desarrollo de este trabajo se utilizará las normas de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por su abreviación en inglés), que es uno de los organismos que ha desarrollado estándares que se enfocan a la Administración o Gestión Ambiental, éstos estándares incluyen las series ISO -14040 sobre el ACV, motivo por el cual a continuación se presenta la definición que estas normas han dado al ACV.

La Norma ISO 14040 define al ACV como *“una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”* [20, p. 1].

Es decir este tipo de análisis se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema, obteniendo resultados donde se muestren sus impactos ambientales potenciales con la finalidad de determinar estrategias adecuadas para la reducción de los mismos. En la figura 3.1, se presenta un esquema del ACV.

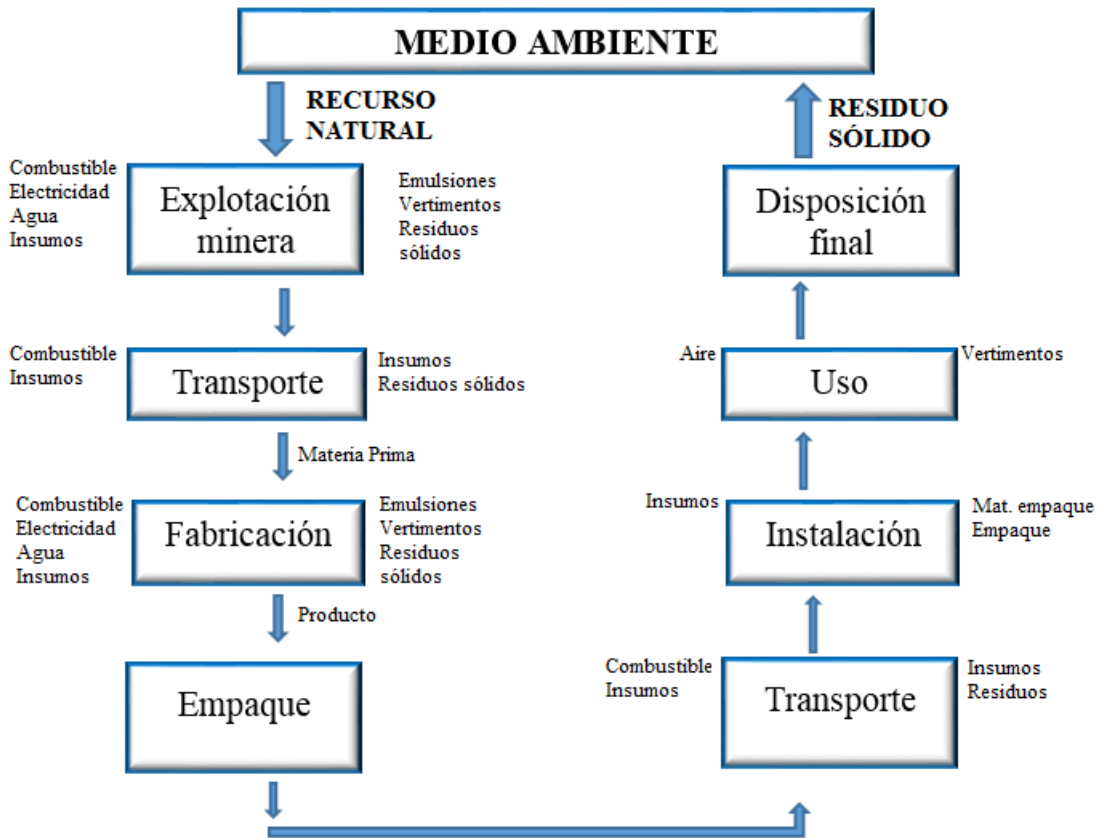


Fig. 3.1. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

3.1.2. Etapas del ACV

Para realizar el ACV a un producto se debe definir [21, p. 15]:

- El objetivo y alcance,
- Análisis del inventario (ISO 14041)
- La evaluación del impacto (ISO 14042) y
- La interpretación de los resultados (ISO 14043).

A continuación en la figura 3.2 se presenta la relación entre las etapas del ACV.

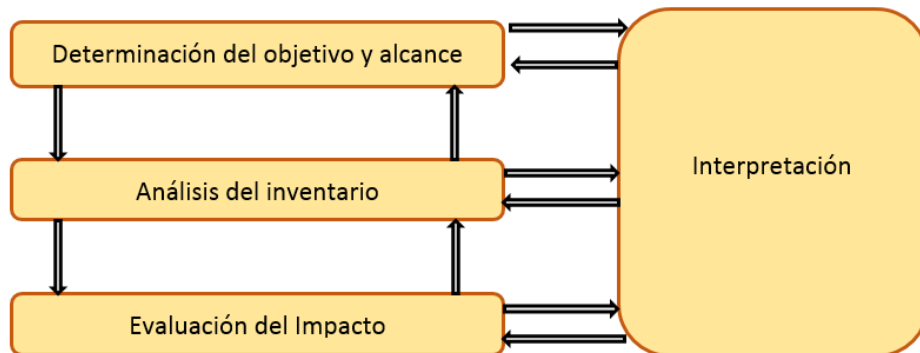


Fig. 3.2. Relación entre Etapas del ACV

En el Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV), se recopilan las entradas y salidas del sistema analizado pero con el inconveniente de que muchos de los datos utilizados son imprecisos ya que provienen de estimaciones y consideraciones asumidas por el realizador del ACV [22].

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), en este punto se determina la importancia de cada elemento del inventario y se agregan en un conjunto de indicadores denominado categorías de impacto.

Dentro de la EICV existe el paso de la valoración, que consiste en asignar una importancia a cada una de las categorías de impacto para después sumarlas y obtener un único índice ambiental global, facilitando comparaciones entre sistemas de productos o servicios y el proceso de toma de decisiones.

A continuación se detalla cada una de las etapas de esta metodología:

3.1.2.1. Definición del objetivo y alcance

La determinación del objetivo y del alcance de un ACV ayuda a desarrollar un trabajo consistente y simplificar modelos complejos. Una definición inicial adecuada permite evitar que las simplificaciones realizadas influyan en los resultados de gran manera [23, p. 21].

En esta fase se describen las razones del estudio, así como lo que se espera obtener. De igual manera, se define los criterios con los que se trabajará de acuerdo al producto, proceso o sistema objeto de estudio [24, p. 46].

Estos objetivos deben establecer la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio, el público a quién se dirige el estudio y si se prevé utilizar los resultados en aseveraciones comparativas que se divulgarán en un futuro (ISO, 2006a) [25, pp. 1–6].

En la norma ISO 14040:2006 existen los siguientes requerimientos específicos para la definición del objetivo del ACV (ISO 14040:2006) [23, p. 21].

- ✓ Aplicación del ACV.
- ✓ Razones para llevar a cabo el estudio.
- ✓ Audiencia objetivo.
- ✓ Uso de los resultados (Comparaciones entre ACV).

El alcance del ACV consiste en la definición de la amplitud, profundidad y detalle del estudio; de acuerdo a la norma NC ISO 14040. 2009; el alcance debe considerar y escribir los siguientes puntos [21, p. 15]:

- ✓ Funciones del sistema en estudio.
- ✓ Selección de la unidad funcional, (debe estar claramente definida, ser medible y representativas de todas las entradas y salidas).
- ✓ Descripción del sistema en estudio.
- ✓ Establecimiento de los límites del sistema, (determinando lo que entra dentro del sistema en estudio y lo que se queda fuera).
- ✓ Hipótesis y limitaciones.
- ✓ Requisitos de calidad de los datos.

A continuación se definen las partes más importantes de la determinación del alcance de un ACV como aporte fundamental para el desarrollo del Análisis de Inventario [23, p. 22]:

- **Función del sistema:** Se deben representar las funciones que precisan el sistema en estudio. Esto es de suma importancia en aquellos casos donde el producto puede cumplir diferentes funciones.
- **Unidad funcional:** La unidad funcional se describe a la base de cálculo sobre la cual se desarrollarán los balances de materias y energía. En el caso de ACV comparativos, se debe seleccionar una unidad funcional que refleje la función que interesa comparar.
- **Límites del sistema:** Se debe ubicar el conjunto de procesos unitarios o subsistemas que aprueban producir el producto en estudio. Es indispensable identificar qué procesos y etapas del sistema se van a incluir en el estudio, así como los criterios que se utilizan para tal decisión y su compatibilidad con los objetivos del ACV. Es importante establecer los límites geográficos de las actividades a incluir en el ACV, ya que pueden ser afectadas por condiciones locales [20, p. 8].

3.1.2.2. Análisis del Inventario

Es la fase del ACV que conlleva mayor trabajo ya que se deben recolectar los datos de entradas y salidas asociadas al sistema en estudio, cuantificándose la energía y materias consumidas; las emisiones a la atmósfera, los residuos sólidos y cualquier otro vertido al medio que se produzca durante cualquier etapa incluida en el ciclo de vida [25, pp. 1–8].

Ésta es la segunda etapa del ACV, en la cual se realiza una recopilación de datos para mediante cálculos cuantificar y calificar cada una de las entradas y salidas de todos los procesos considerados para el ACV del proceso, producto o servicio.

Es un proceso iterativo, en cual a medida que se obtienen los datos, se pueden ir adquiriendo nuevos requisitos, modificando los límites del sistema o incluso algunas veces puede requerir la revisión del alcance y definición de objetivos.

Las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 presentan una serie de temas que debería contener el ICV, como se muestra en la tabla 3.1 [24, p. 48].

Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)				
ISO 14040	ISO 14044	Título	Contenido	Descripción
5.3	4.3	Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)		
5.3.1	4.3.1	Generalidades	Recopilación de datos	<i>El ICV es un proceso iterativo; a medida que se recopilan datos, se puede identificar nuevos requisitos y cambiar procedimientos</i>
			Procedimientos de cálculo de entradas y salidas	
5.3.2	4.3.2, 4.3.2.1, 4.3.2.2, 4.3.2.3	Recopilación de datos	Datos por proceso unitario	<i>Datos cualitativos y cuantitativos registrados por proceso; referenciar fuente; señalar si los datos no cumplen requisitos de calidad</i>
			Medidas para comprensión uniforme y coherente	<i>Diagramas de flujo de procesos específicos, interrelaciones; detalle de cada proceso unitario; flujos y datos de condiciones operativas; descripción de técnicas de recopilación de datos, otros</i>
			Principales títulos de clasificación de datos	
			Entradas de energía, materias primas, entradas auxiliares, otras entradas físicas	<i>Proceso iterativo en materia de recursos; tener en cuenta limitaciones prácticas en el alcance y documentarse en el informe. Detallar datos individuales de cada título</i>
			Productos, coproductos y residuos	
			Emisiones al aire, vertidos al agua y al suelo	
Otros aspectos ambientales				
5.3.3.	4.3.3, 4.3.3.1, 4.3.3.2, 4.3.3.3, 4.3.3.4	Cálculo de datos	Validación de los datos	<i>Verificar que se cumplen los requisitos de calidad de datos; realizar balances de materia, energía y análisis comparativos</i>
			Relación de los datos con los procesos unitarios y la unidad funcional	<i>Determinar flujo por cada proceso; datos de entrada y salida referenciados a unidad funcional</i>
			Relación de los datos con el flujo de referencia	
			Ajuste de los límites del sistema	<i>Revisión de límites iniciales del sistema; documentar resultados del proceso de ajuste</i>
5.3.4	4.3.4, 4.3.4.1, 4.3.4.2, 4.3.4.3, 4.3.4.3.1, 4.3.4.3.2, 4.3.4.3.3, 4.3.4.3.4	Asignación de flujos, emisiones y vertidos	Documentación	<i>Documentación y explicación de asignación de entradas y salidas</i>
			Evitar asignación	<i>Dividir proceso unitario a asignar en subprocesos de los cuales obtener más datos</i>
			Asignación por relación física	<i>Separar entradas y salidas entre los productos y funciones que reflejen relación física existente</i>
			Asignación por relación no física	<i>Cuando no se puede realizar la primera; puede ser otra relación, como el valor económico</i>
			Diferenciación entre coproductos y residuos	<i>Identificar proporción; asignar entradas y salidas a coproductos</i>
			Procedimiento de asignación para la reutilización y reciclado	<i>Tomar en cuenta ciclos cerrados y abiertos para cada proceso unitario o sistema</i>

Tabla 3.1. Las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, temas que debería contener el ICV.

El procedimiento para el desarrollo del ICV incluye las siguientes etapas[26]:

- Construcción del diagrama de flujo (para la detección y diferenciación de corriente en el sistema)
- Establecer la calidad de los datos (niveles de precisión requeridos)
- Definir los límites del sistema
- Recolección de los datos y cálculos de balances (Ecobalances)
- Redefinición de los objetivos y alcances

En figura 3.3 se puede apreciar mejor el esquema del ICV.

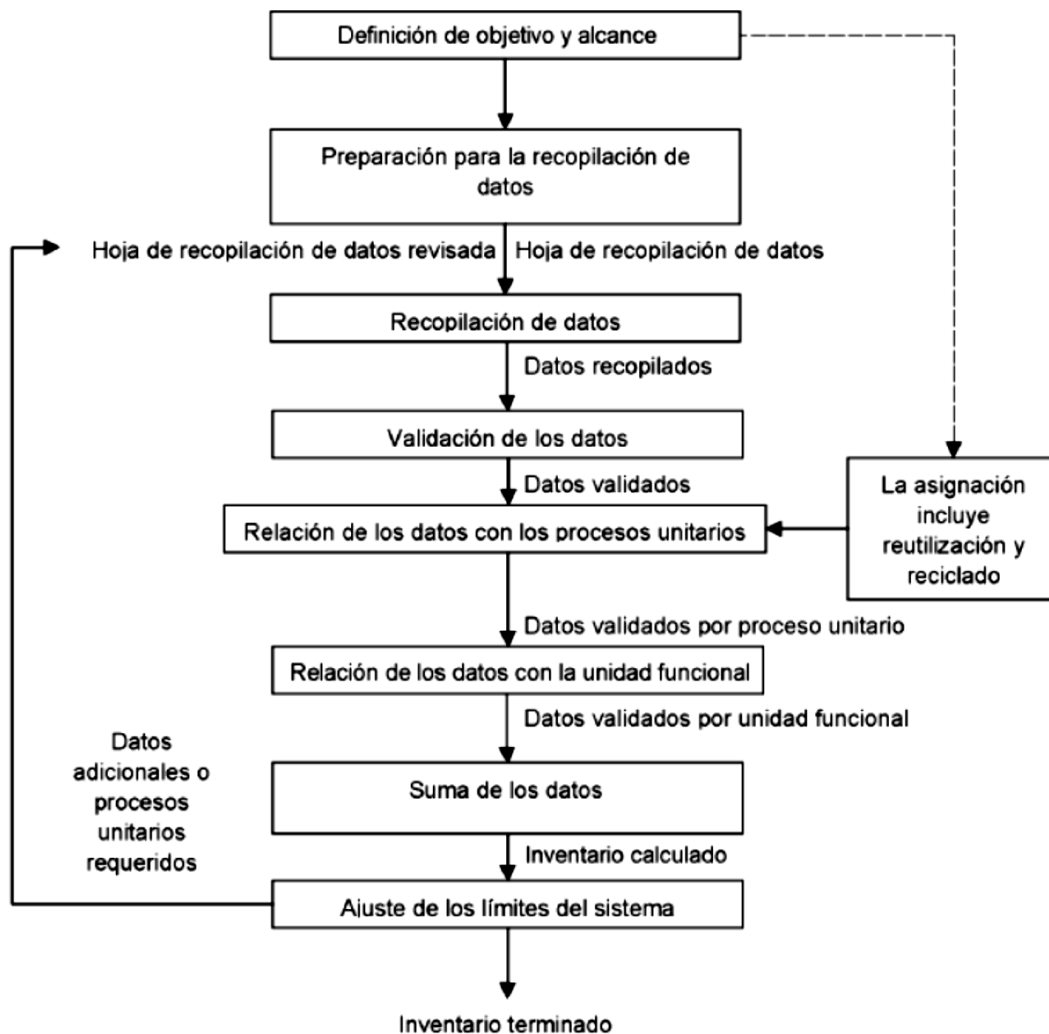


Fig. 3.3. Esquema de un ICV

3.1.2.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV)

Es un proceso técnico cuyo fin es evaluar cuantitativa o cualitativamente los impactos ambientales usados en el Inventario. Esta etapa utiliza los flujos de materiales y energía en términos de la unidad funcional para representarlos en un grupo de categorías de impacto de acuerdo el sistema a analizar [23, p. 28].

La norma ISO 14042 muestra la estructura de esta etapa, en las cuales existen sub etapas obligatorias y opcionales, a continuación se detalla las sub etapas obligatorias [25, pp. 1–9]:

- **Selección:** de las categorías de impacto, indicadores de categoría y métodos de caracterización. Se puede elegir entre métodos de efecto medio o efecto final.
- **Clasificación:** Supone la agrupación de los datos del inventario según su potencial impacto en las distintas categorías previamente seleccionadas. Al optar por una metodología de evaluación, se están seleccionando las categorías consideradas por esta metodología
- **Caracterización:** Implica la aplicación de modelos para obtener un indicador ambiental en cada categoría de impacto, unificando a una única unidad de referencia todas las sustancias clasificadas dentro de cada categoría mediante el empleo de factores de peso o equivalencia.

Sub etapas opcionales:

- **Normalización:** Es la relación entre una magnitud de impacto y un valor de referencia que puede ser geográfica y/o temporal [27].
- **Valoración:** Permite determinar, cualitativa o cuantitativamente, la importancia relativa de las distintas categorías de impacto con la finalidad de obtener un resultado único o índice ambiental.

Las normas ISO 14040:2006 y 14044:2006 determinan los elementos que debería contener una EICV, como se muestra en la tabla 3.2 [24, p. 51].

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)				
ISO 14040	ISO 14044	Título	Contenido	Descripción
5.4	4.4	Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)		
5.4.1	4.4.1	Generalidades	Evaluación de impactos ambientales	<i>Se utiliza los resultados del ICV</i>
			Asociación de datos	<i>Con categorías de impacto ambiental e indicadores</i>
			Información para fase de interpretación	
			Revisión de objetivo y alcance	<i>Cumplimiento de objetivos</i>
			Transparencia	<i>Suposiciones claramente descritas para evitar subjetividades</i>
5.4.2	4.4.2, 4.4.2.1, 4.4.2.2, 4.4.2.2.1, 4.4.2.2.2, 4.4.2.2.3, 4.4.2.2.4, 4.4.2.3, 4.4.2.4, 4.4.2.5	Elementos de la EICV (ISO 14044, elementos obligatorios)	Separación en elementos diferentes	
			Elementos	
			Categorías de Impacto, Indicadores y modelos de caracterización	<i>Referencia de información y fuentes; reflejo de asuntos ambientales inherentes</i>
			Asignación de resultados del ICV (clasificación)	<i>Asignación de resultados del ICV para cada categoría de impacto y en general</i>
			Cálculo de resultados del indicador de categoría (caracterización)	<i>Conversión de los resultados de indicadores; conjunto de resultados</i>
			Resultados de la EICV	<i>Compilación de los resultados de indicadores; conjunto de resultados de inventario</i>
			5.4.2	4.4.3, 4.4.3.1, 4.4.3.2, 4.4.3.2.1, 4.4.3.2.2, 4.4.3.3, 4.4.3.4, 4.4.3.4.1, 4.4.3.4.2, 4.4.3.4.3
Elementos				
Normalización	<i>Cálculo de la magnitud de los resultados en relación a la información de referencia</i>			
Agrupación	<i>Organización y posible clasificación de las categorías de impacto</i>			
Ponderación	<i>Conversión y posible suma de los resultados del indicador</i>			
Análisis de la calidad de datos	<i>Mejor comprensión de la fiabilidad en la recopilación de los resultados</i>			
4.4.4, 4.4.4.1, 4.4.4.2	Elementos de la EICV (ISO 14044, análisis de la calidad de datos)	Análisis de la gravedad		<i>Identificar datos que contribuyen mayoritariamente al resultado del indicador</i>
		Análisis de la incertidumbre		<i>Determinar la inferencia de incertidumbres y suposiciones</i>
		Análisis de la sensibilidad		<i>Determinar la manera en que los cambios en los datos afectan los resultados</i>
4.4.5	EICV para comparación y divulgación	Conjunto de indicadores completo		<i>Comparación entre indicadores de categoría ; de científica y técnica; importancia ambiental</i>
5.4.3	4.2.3.3, 4.2.3.3.1, 4.2.3.3.2	Limitaciones		Incertidumbre; la EICV no es completa acerca de todos los asuntos ambientales

Tabla 3.2. Las normas ISO 14040:2006 y 14044:2006, elementos de una EICV.

3.1.2.4. Métodos para la evaluación del Impacto de ciclo de vida

Existen diversas metodologías para realizar la EICV y calcular los indicadores de la relación existente entre los resultados del ICV y el daño final sobre la salud humana y el medio ambiente. Las diferentes metodologías de evaluación de impacto de ciclo de vida se pueden agrupar en dos grandes grupos: punto medio o *midpoint* y punto final o *endpoint* [23, p. 30].

Las metodologías *midpoint* definen el efecto ambiental (acidificación, destrucción de la capa de ozono, etc.) pero sin llegar a identificar el daño causado al hombre y a los sistemas naturales, como sí hacen las metodologías *endpoint* [25, pp. 1–10]. La norma ISO 14042 define de manera implícita tres áreas de protección como categorías de impactos finales (Salud humana, entorno natural y recursos renovables).

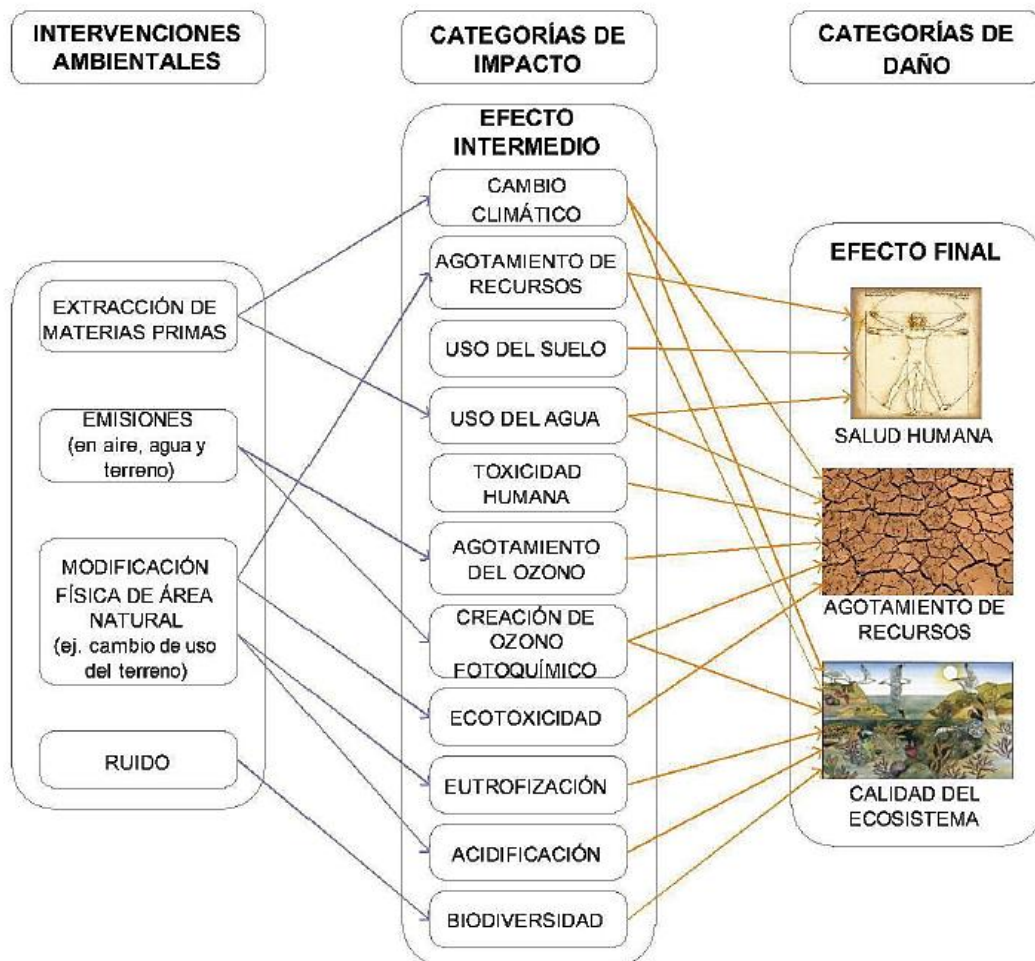


Fig. 3.4. Categorías de impacto de efecto medio y final.

Las metodologías más utilizadas en el contexto internacional son Ecoindicador 99 y CML 2000, mediante el estudio del efecto final e intermedio, respectivamente. En la tabla 3.3 se presentan los métodos más utilizados en una EICV [26].

METODOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS
CML 2 baseline 2000	Método de impacto intermedio muy utilizado con una caracterización relativamente simple y diversas opciones de normalización.
Ecoindicador 99	Método de impacto final orientado a daños, utiliza indicadores de categoría de impacto final. Incluye 3 versiones que consideran distintas hipótesis.
IMPACT 2000+	Método orientado a daños, con muchas semejanzas al método Ecoindicador 99, pero con los factores de toxicidad completamente recalculados.
RECIPE	Método que integra y actualiza los métodos Ecoindicador 99 y CML, incluyendo categorías de impacto intermedio y final.

Tabla 3.3. Métodos más utilizados en una EICV

En este trabajo se usará el método CML baseline 2000, por lo que en la tabla 3.4 se presenta las categorías del dicho método [23, p. 32].

CATEGORÍA DE IMPACTO POTENCIAL	ACRÓNIMO	UNIDAD
Agotamiento de recursos abióticos para elementos.	ADP_e	kg Sb eq./kWh
Agotamiento de recursos abióticos para recursos fósiles.	ADP_f	MJ eq./kWh
Calentamiento global.	GWP	kg CO ₂ eq./kWh
Agotamiento de la capa de ozono.	ODP	kg CFC-11 eq./kWh
Formación del suelo y del agua.	POCP	kg C ₂ H ₄ eq./kwh
Acidificación del suelo y agua	AP	kg SO ₂ eq./kwh
Eutrofización	EP	kg PO ₄ eq./kwh

Tabla 3.4. Categorías de Impacto para el método CML baseline 2000

3.1.2.5. Interpretación de Resultados

Esta es la etapa final del ACV, en la cual se combinan los resultados de las dos etapas anteriores (ICV Y EICV), la cual permitirá en base a los objetivos y alcance del ACV sacar conclusiones y recomendaciones. En este punto se identifica la fase o fases del ciclo de vida del sistema en las que se encuentra las cargas ambientales que mayor impacto genera, y por lo tanto que puntos del sistema deben o pueden mejorarse.

3.2. HUELLA DE CARBONO (HC)

Es un parámetro que sirve para indicar la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI), que son emitidos al ambiente ya sea directa o indirectamente, asociados a una empresa, evento, actividad o al ciclo de vida de un producto/servicio.

Según el Protocolo de Kioto, se consideran gases de efecto invernadero los siguientes[28]:

- dióxido de carbono (CO₂),
- metano (CH₄),
- monóxido de nitrógeno (N₂O),
- compuestos halocarbonados,
- hexafluoruro de azufre (SF₆)
- trifluoruro de nitrógeno (NF₃).

Debido a que de todos los GEI mencionados anteriormente el CO₂, es el que se emite a la atmósfera en mayor proporción, motivo por el cual es el que se usa como referencia para la medición de la huella de carbono.

El concepto de Huella de Carbono (HC) surge del concepto de Huella Ecológica, de la cual se podría decir que es un subconjunto. En realidad, la HC es una simplificación de un Análisis de Ciclo de Vida en el que, en lugar de considerar varias categorías de impacto ambiental al mismo tiempo, se considera únicamente una de ellas, la relativa a Calentamiento Global [29].

La huella de carbono se puede aplicar a múltiples conceptos. A continuación se presenta una clasificación en función del foco de emisiones sobre el que se centran:

Organizaciones: Si se considera las emisiones derivadas de la actividad propia de la organización.

Proyectos: Considera las emisiones derivadas de los proyectos realizados por las organizaciones o usuarios finales. Estos proyectos pueden contemplar también aquellos que permiten reducir las emisiones de GEI.

Actividades: Considera las emisiones derivadas de las acciones realizadas por el usuario final.

Producto: Considera las emisiones debidas a todo el ciclo de vida del mismo.

3.2.1. Normativa de la medición de la huella de carbono y medición de emisiones de GEI

Al igual que sucede en el caso de los estudios de ACV, la HC también viene regida por una serie de normativas aplicables a nivel internacional. El *Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard* (GHG Protocol) es una de las metodologías más empleadas para calcularla HC a nivel internacional, estando regulada para su aplicación por una serie de normativas, en la figura 3.5, se presenta un resumen de esta normativa.

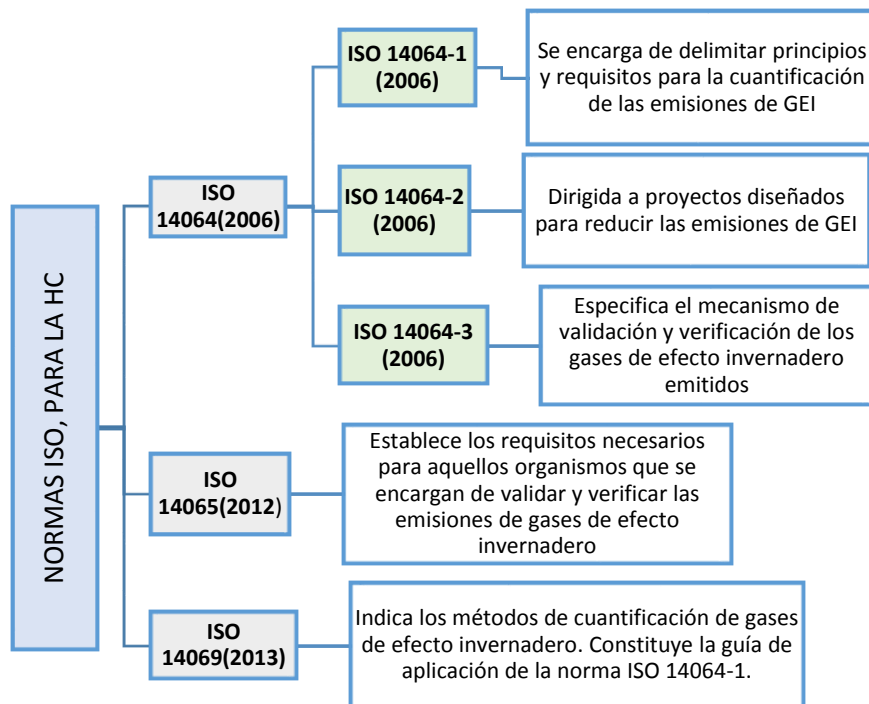


Fig. 3.5. Normativas para la Huella de Carbono

Metodologías de medición de la huella de carbono

El objetivo de medir la HC de un producto o sistema, no sólo es calcular las emisiones de GEI, sino también establecer medidas de reducción o compensación de dichas emisiones. Por ello los pasos habituales en proyectos de medición de HC suelen ser:

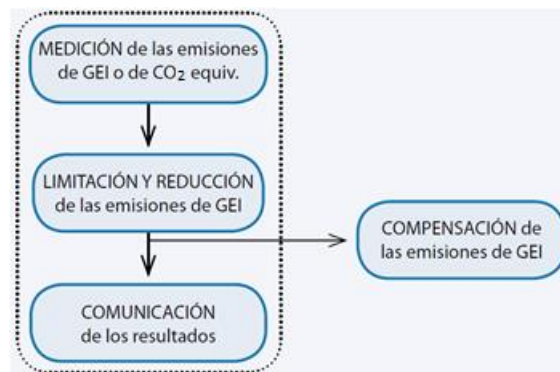


Fig. 3.6. Pasos para la medición de HC

- **Medición de las emisiones de GEI o de CO₂ eq:** Para la medición de la HC en relación a las emisiones estimadas para una actividad en concreto, se siguen metodologías diferentes las cuales se han simplificado en herramientas como las calculadoras de huella de carbono.
- **Limitación y reducción de las emisiones de GEI:** Mediante la implantación de tecnologías menos contaminantes u otras estrategias de reducción de emisiones.

- **Compensación de las emisiones de GEI:** Para neutralizar el impacto generado. Se deben centrar en la participación en proyectos de compensación de emisiones (PCE) para compensar las emisiones de GEI que se generen en el sistema analizado.
- **Comunicación de los resultados:** Tanto interna como externamente. Por un lado para motivar la concienciación medioambiental de los trabajadores, y por el otro para la mejora de la imagen corporativa.

3.3.SOFTWARE UTILIZADO

Para este estudio se utilizó el software Simapro 8, programa desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants que permite realizar Análisis de Ciclo de Vida (ACV), mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y bibliográficas (Ecoinvent 3, ELCD, Agri-footprint, EU27 and DK input-output, Industry data, LCA food DK, Methods, Swis Input Output, USA Input Output, U.S. Life Cycle Inventory Database). Ofrece una herramienta profesional para almacenar, analizar y realizar un seguimiento del perfil ambiental de productos y/o servicios.

Metodologías de evaluación de impacto

Este software permite utilizar las metodologías de evaluación de impacto más importantes y actualizadas tales como: *ILCD 2011 Midpoint*, *CML-IA*, *EDIP*, *EPD*, *ReCiPe*, éste último método evalúa impactos medio y finales, estos son métodos europeos de evaluación de impactos, los métodos Norte Americanos que se encuentran en las base de datos del software son: *BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability)* éste método combina una evaluación parcial del ciclo de vida y también el costo del ciclo de vida de los materiales de construcción, y *TRACI (The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts)*, método que facilita la caracterización de factores de estrés ambientales que tienen efectos potenciales, incluyendo el agotamiento de la capa de ozono, el calentamiento global, la acidificación, la eutrofización, la formación de ozono troposférico (smog), la eco-toxicidad, el agotamiento de los combustibles fósiles y los efectos del uso de la tierra[30]. Simapro.8 también posee en su base datos los métodos *Eco-indicador 99*, *Eco-points 97*, *EDIP LCA food*. Éstos son los métodos más usados para realizar análisis de ciclo de vida.

El software además permite calcular:

- La Huella de Carbono con la metodología IPCC 2013.
- La Huella Ambiental de la UE con la metodología ILCD 2011.
- La Huella de Agua con las metodologías Boulay et al 2011, Hoekstra et al 2012 (Water Footprint Network), Ecological Scarcity, Motoshita, Pfister.
- La Huella ecológica con la metodología Ecological footprint.

Con esta herramienta se facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos complejos de un modo sistemático y transparente.

4. CAPÍTULO

Para obtener una información más cercana a la real, es decir no realizar un escenario ficticio se decidió buscar un caso de estudio real, en este caso se tomó como tal el proyecto del relleno sanitario de Pichacay, ubicado en Ecuador en la provincia del Azuay ciudad Cuenca, en el cual se está generando biogás a partir de los residuos sólidos municipales. Dicho biogás será usado para generar energía con una potencia instalada de 2MW que corresponden a dos generadores de 1MW cada uno.

4.1. CASO DE ESTUDIO

4.1.1. Central Pichacay

4.1.2. Ubicación

El relleno sanitario se encuentra a 21 km de la ciudad de Cuenca, en la parroquia Santa Ana, es aquí donde se desarrolla el proyecto de captación de biogás con el propósito de generar electricidad a partir del mismo. Dicho proyecto se encuentra dividido en tres etapas Norte I, Norte II y Sur, con un área de 16 hectáreas, éste sitio pertenece a la Empresa Pública de Aseo de Cuenca (EMAC EP) de la Corporación de la Municipalidad de Cuenca, y los trabajos están a cargo de la empresa EMAC-BGP ENERGY COMPAÑÍA DE ECONOMÍA MIXTA CEM.

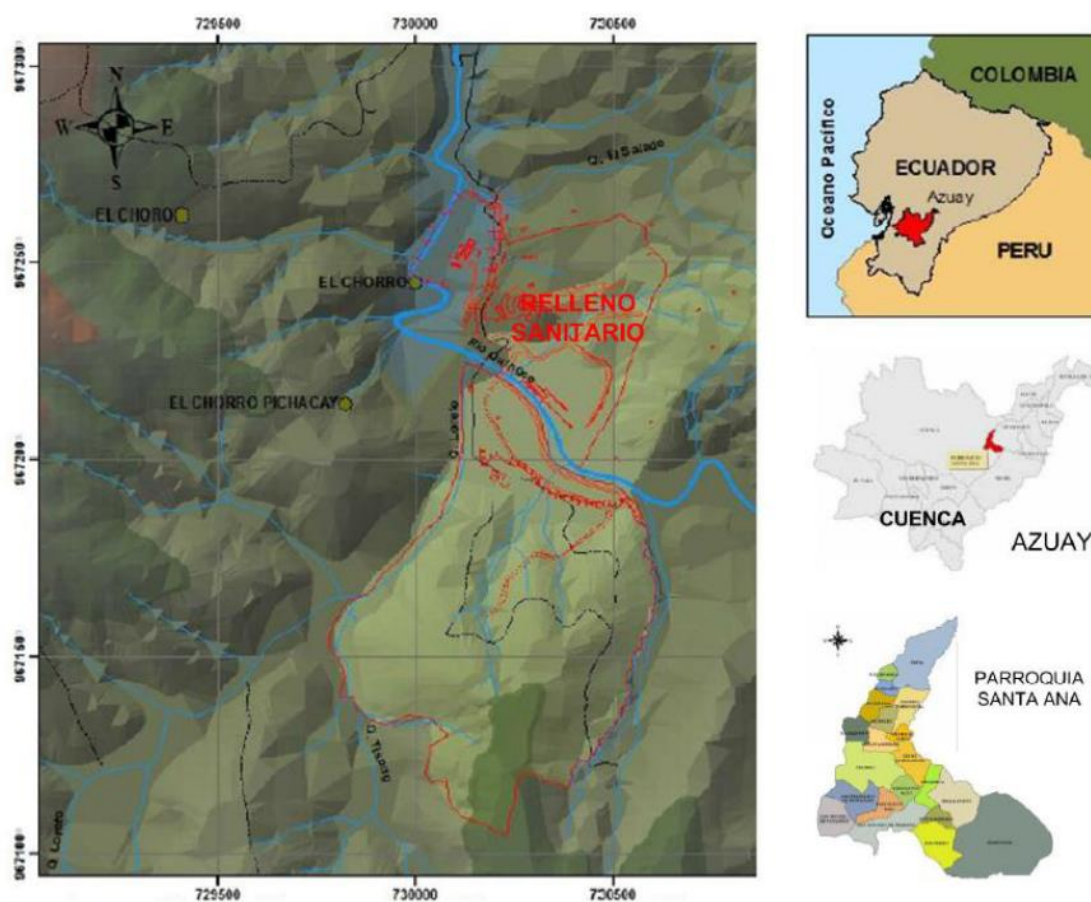


Fig. 4.1. Ubicación del Relleno Sanitario Pichacay

A continuación se detallan las tres fases del proyecto [31, p. 9]:

Fase Norte I: es la sección más antigua del relleno, los desechos sólidos se depositaron en el periodo comprendido entre septiembre de 2001 y mayo de 2009, porque su vida útil fue de cerca de 8 años. Consta de 9 terrazas de aproximadamente 5 metros de altura cada una, se calcula que en esta sección se encuentran depositadas aproximadamente 800.000 toneladas de desechos sólidos.

Fase Norte II: esta fase entró en funcionamiento desde mayo de 2009 y se encuentra operativa hasta la presente fecha.

Fase Sur: esta fase entrará en operación tras el cierre de la fase Norte II, de acuerdo a las negociaciones realizadas con la Junta Parroquial de Santa Ana, se tiene un proyecto de ampliación de esta fase, considerada inicialmente hasta el 2021.

4.1.3. Ingreso y composición de los residuos

Los residuos sólidos que llegan al relleno sanitario desde 2001 y se encuentran en una base de datos de EMAC EP, en el 2006 se realizaron proyecciones hasta el 2021, actualmente al relleno sanitario cuenta con una tasa de depósito anual de 143.124 toneladas y un incremento del 2,47 % anual.

A continuación en la tabla 4.1 se presentan la cantidad de basura ingresada.

Año	PESO PROYECTADO	PESO REAL
	TON / AÑO	TON / AÑO
2001	33.262,00	33.262,00
2002	103.636,00	103.636,00
2003	106.542,00	106.542,00
2004	109.247,00	109.247,00
2005	112.542,00	112.542,00
2006	114.781,00	106.111,45
2007	117.600,00	110.453,11
2008	121.039,00	118.874,01
2009	123.975,00	115.594,15
2010	126.963,00	122.720,71
2011	129.942,00	130.538,15
2012	132.960,00	126.334,00
2013	136.658,00	129.820,85
2014	139.785,00	145.005,97
2015	142.958,00	143.124,00
2016	146.129,00	147.183,10

Tabla 4.1. Ingreso de Desechos al Relleno Sanitario Pichacay (valores proyectados y reales).

Basándose en datos disponibles del relleno sanitario se sabe que los residuos que ingresan están compuestos por un 85,3% de desecho domestico municipal, 6,7% de desecho industrial y 8,0% de desecho inerte, esta composición es presentada en la tabla 4.2.

CATEGORÍA DE DESECHO	COMPOSICIÓN
Comida	66,0%
Papel y Cartón	12,5%
Plásticos	4,6%
Metal	1,5%
Vidrio	1,7%
Recortes de vidrio, abono	0,0%
Desecho de jardinería	0,0%
Madera (leña y troncos de árboles)	0,8%
Goma, neumaticos, textiles	0,3%
Desecho orgánico, incluye lodo no tóxico, desecho de tanques sépticos, pañales y animales muertos	0,0%
Otro desecho inerte	12,6%

Tabla 4.2. Composición de los Residuos que Ingresan al Relleno

4.1.4. Características de los depósitos

El relleno sanitario de Pichacay está conformado en siete plataformas, donde se depositan los desechos en capas de 2,30 m y una capa divisora de 0,2 m compuesta de arcilla y una geo-membrana de polietileno de alta densidad (PAD) de 0,75 mm que va únicamente al fondo del pozo.

Cada plataforma está construida encima de la capa anterior formando terrazas aproximadamente de 10 m de ancho con una inclinación de 35° en todos los lados creando gradientes empinados y que permiten el acceso del equipo de perforación, las medidas de inclinación se realizaron mediante el inclinómetro dando como resultado un bajo movimiento horizontal de los desechos.

La capa de arcilla utilizada está disponible en la localidad del relleno, con una permeabilidad baja y libre de arena y rocas. Para asegurar que la geo-membrana no se perfora, la primera capa de desechos son seleccionados para que no existan objetos punzo cortantes. La compactación del sitio es de 0.75 t/m³ [32, p. 85].

4.1.5. Lixiviados

Los lixiviados son una solución rica en elementos contaminantes provenientes de la degradación de la materia orgánica, además del contacto de la lluvia con los desechos. El líquido resultante tiene características químicas como: salinidad elevada, presencia de hidrocarburos solubles, carbono y nitrógeno orgánico [32, p. 86].

Debido a que los lixiviados son líquidos muy contaminantes éstos debe tener un tratamiento antes de su disposición final, motivo por el cual en el relleno sanitario Pichacay se ha construido un sistema de drenaje francés para recolectarlos, dicho drenaje consiste en zanjas de 1m de ancho con áreas llenas de rocas cubiertas de geotextil como se observa en la figura 4.2.



Fig. 4.2. Recolección de Lixiviados

En cada una de las fases del relleno se descargan los lixiviados en forma separada la distribución es la siguiente:

Fase Norte I: existen cuatro tanques de ferrocemento impermeabilizados con geomembrana. Cada uno de ellos posee una capacidad de 50 m^3 , adicionalmente se cuenta con tres tanques de tormentas, con capacidades de 900 m^3 , 750 m^3 y 700 m^3 .

Fase Norte II: aquí se almacenan los lixiviados en tres tanques de tormentas de 956 m^3 , 1470 m^3 y 3500 m^3 de capacidad.

Con la ayuda de bombas portátiles, los lixiviados almacenados son cargados a tres tanqueros encargados de transportarlos a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, que opera la empresa municipal ETAPA EP, para ser tratados con el mismo proceso y bajo los mismos parámetros que las aguas residuales de la ciudad [31, p. 13].

4.1.6. Disponibilidad de biogás

Para determinar la factibilidad energética del Relleno Sanitario Pichacay, se realizaron ensayos de bombeo en dos pozos perforados para la captación de gases y una de las chimeneas de gas pasivo existentes en el sitio. Los cálculos se basan en la extrapolación de resultados de los ensayos con el área total del relleno.

De acuerdo a la información entregada por EMAC EP, se dispone de una superficie total de 2,05 Ha para el uso e instalación de un sistema de gas, ocupando un 75,2% del área de disposición actual.

Disponibilidad del Gas Específico

Radio de Influencia (ROI, *Radius of Influence*) es la distancia del pozo de extracción a la masa del desecho donde se produce el biogás. Basado en la estimación del ROI de los pozos de gas y el flujo del gas determinado durante el ensayo, el área que puede ser considerada para extracción de biogás es de 2.120 m^2 ($3 \times 15 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times \text{Pi}$), el ROI de los pozos de gas se extiende a 10m de radio y una distancia de 30m entre pozos.

Durante la última semana del ensayo de bombeo el flujo de gas fue 51,2 Nm³/h (*metros cúbicos normales por hora*⁶) [33] a 51% de metano. Corrigiendo el ritmo del flujo a 50% de metano se obtiene un flujo de 52,2 Nm³/h. La disponibilidad específica del gas, es entonces la siguiente:

$$\frac{52,2 \text{ m}^3/\text{h}}{2.120\text{m}^2} = 0,0246 \text{ Nm}^3/\text{h}/\text{m}^2$$

Es decir se obtiene un flujo del biogás por cada metro cuadrado disponible total del relleno sanitario de 0,0246 Nm³/h/m². Pequeñas variaciones en el ROI produce una gran variación en la cosecha de gas específico. A continuación en la Tabla 4.3 se presenta un análisis de sensibilidad del ROI estimado.

ROI	Cambio en % del ROI	Cosecha de gas específico	Cambio en el % de la cosecha de gas específico
14m	-6,70%	0,02826 Nm ³ /h/m ²	14,70%
15m	0%	0,02462 Nm ³ /h/m ²	0%
16m	6,70%	0,02164 Nm ³ /h/m ²	-12,20%

Tabla 4.3. Análisis de sensibilidad del ROI estimado

Disponibilidad del Gas en el Sitio

En base al área estimada del sitio de relleno disponible para la instalación y operación del sistema de colección de gas (2,05 Ha), y con la cantidad de gas específico, se obtiene la cantidad de biogás disponible en el relleno sanitario de Pichacay:

$$0,0246 \text{ Nm}^3/\text{h}/\text{m}^2 \times 20500\text{m}^2 = 504 \text{ Nm}^3/\text{h} \text{ **Concentración 50% metano.**}$$

Si el aprovechamiento del gas se produjera en todo el sitio del relleno, la disponibilidad de gas en el sitio generaría 4,8 % más que el modelo base

$$0,0246 \text{ Nm}^3/\text{h}/\text{m}^2 \times 27200\text{m}^2 = 669 \text{ Nm}^3/\text{h} \text{ **Concentración 50% metano.**}$$

En la tabla 4.4 se muestran un promedio del estimado de flujo de gas disponible hasta el año 2027, además de su energía térmica.

⁶ *Metros cúbicos normales por hora (Nm³ / h)*: Unidad SI para el caudal volumétrico de aire o gas a una temperatura de 0 ° C ya una presión de 101,3 kPa, expresada en metros cúbicos por hora.

Año	Promedio disponible,	Energía Térmica MJ/h	Energía Térmica kW
2007	504	8.946,00	2485,00
2008	562	9.975,50	2771,00
2009	618	10.969,50	3047,10
2010	671	11.910,30	3308,40
2011	721	12.797,80	3554,90
2012	770	13.667,50	3796,50
2013	817	14.501,80	4028,30
2014	862	15.300,50	4250,10
2015	907	16.099,30	4472,00
2016	950	16.862,50	4684,00
2017	992	17.608,00	4891,10
2018	1033	18.335,80	5093,30
2019	1075	19.791,30	5431,70
2020	1115	19.791,30	5497,60
2021	1154	20.483,50	5689,90
2022	1168	20.732,00	5758,90
2023	1092	19.383,00	5384,20
2024	999	17.732,30	4925,60
2025	919	16.312,30	4531,20
2026	848	15.052,00	4181,10
2027	786	13.951,50	3875,40

Tabla 4.4. Estimación de Energía Térmica disponible

4.2. SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

Las aplicaciones del biogás obtenido de los rellenos sanitarios, pueden ser varias ya sea en la industria, en la agricultura o en la generación de energía eléctrica.

Puesto que el gas metano contenido en el biogás produce un gran impacto ambiental se debe evitar su emanación al medioambiente, motivo por el cual y basándose en la cantidad estimada de biogás y las conversiones de energía obtenidas del relleno sanitario de Pichacay se ha decidido aprovechar el biogás para producir energía eléctrica, debido a los avances tecnológicos para este tipo de generación y por del costo preferencial que tiene el comercio de emisiones.

La generación de energía se la puede realizar, mediante un motor de combustión interna de mezcla pobre y las micro-turbinas, puesto que los motores de combustión interna de mezcla pobre son los más económicos y tienen menor requerimiento en cuanto a la calidad del biogás, por este motivo la central de biogás de Pichacay decide utilizar este tipo de tecnología para la generación de electricidad.

4.2.1. Cantidad de Energía Generada

Según el estudio de pre factibilidad realizado por la EMAC para la central de biogás Pichacay, la capacidad de generación eléctrica basada en las estimaciones del biogás disponibles en el sitio, es como se muestra en la tabla 4.5

Año	Promedio Nm^3/h disponible, 50% CH_4	Capacidad en Bruto kW	Capacidad Neta kW
2007	504	944,00	896
2008	562	1.090,00	1.035,00
2009	618	1.229,00	1.167,00
2010	671	1.363,00	1.294,00
2011	721	1.493,00	1.418,00
2012	770	1.618,00	1.527,00
2013	817	1.740,00	1.653,00
2014	862	1.858,00	1.765,00
2015	907	1.974,00	1.875,00
2016	950	2.089,00	1.984,00
2017	992	2.199,00	2.089,00
2018	1033	2.308,00	2.192,00
2019	1075	2.416,00	2.295,00
2020	1115	2.525,00	2.398,00
2021	1154	2.630,00	2.498,00
2022	1168	2.686,00	2.551,00
2023	1092	2.508,00	2.382,00
2024	999	2.302,00	2.186,00
2025	919	2.120,00	2.014,00
2026	848	1.957,00	1.859,00
2027	786	1.811,00	1.720,00

Tabla 4.5. Capacidad Estimada de Generación Eléctrica

La central termoeléctrica proyectada constara de dos etapas cada una de ellas de 1MW de potencia estimada, es decir la planta generará aproximadamente un total de 2MW.

4.3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

El biogás será recolectado en las tres etapas del relleno sanitario de “Pichacay”: Norte I, Norte II y Sur. El esquema general de la instalación se presenta en la figura 4.3:

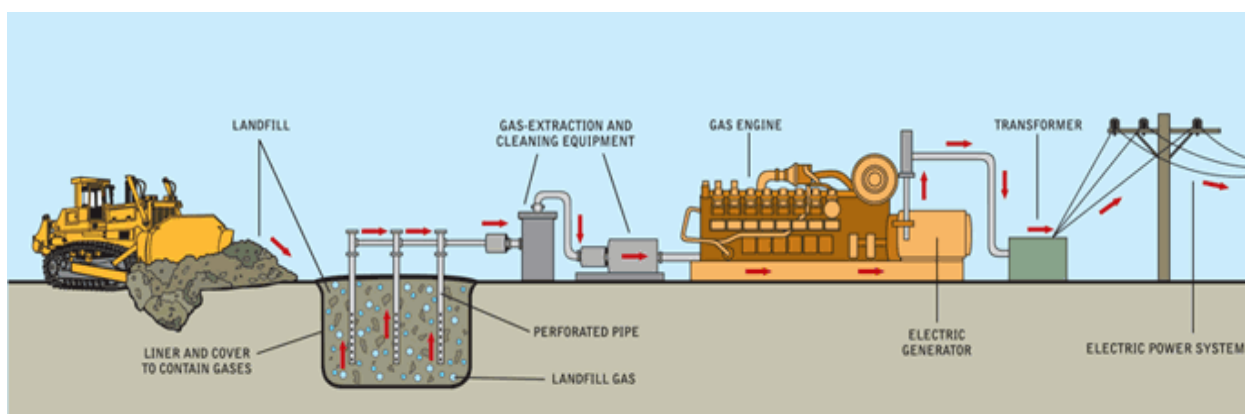


Fig. 4.3. Esquema General de una Instalación de Biogás

El proceso de producción de energía eléctrica utilizando como energía primaria al biogás, se puede dividir en cuatro elementos fundamentales:

- a) Red vertical y horizontal para extracción y transporte de gas.
- b) Equipo de extracción y tratamiento de biogás (Bioprocesador).
- c) Grupos motor – generador.
- d) Equipamiento para manejo de energía, elevación de tensión y conexión a la red.

a) Red vertical y horizontal para extracción y transporte de gas

La red vertical consiste en una tubería de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) perforada, el objetivo de las perforaciones es permitir el paso del biogás e impedir que ingresen desechos o materia sólida al interior de misma. La red horizontal también es de PEAD pero esta no posee perforaciones y se encarga de transportar el biogás desde el pozo hasta el equipo de tratamiento de gas, denominado bioprocesador, ésta red se une con la vertical en el punto superior del pozo.

A esta red también pertenecen elementos tales como las cabezas de pozo, encargada de la cerrada hermética del pozo; colector, equipo que reúne y concentra las diferentes redes; y condensador, equipo encargado de retener el excedente de humedad del gas [31, p. 29].

b) Equipo de extracción y tratamiento de biogás - Bioprocesador

Básicamente el bioprocesador consiste en una bomba de succión la cual se encarga de extraer el biogás, un sistema de tratamiento de biogás éste elimina el oxígeno y nitrógeno contenidos en forma de humedad, mediante el calentamiento y condensación del gas, elimina también partículas como siloxanos y compuestos de azufre y finalmente por una antorcha donde se quemará el gas excedente o que no cumpla con las condiciones de cantidad y calidad requeridas por el generador.

c) Grupos motor – generador

Está formado por un motor de combustión interna que usa el biogás extraído como combustible, mismo que mediante la explosión del gas dentro de la cámara de combustión transforma la energía química del gas en energía mecánica, transfiriendo este movimiento al cigüeñal a través de los pistones y a su vez la energía de giro de cada uno de ellos se transmite a un alternador, el cual es capaz de transformar la energía mecánica en eléctrica, generando corriente alterna mediante inducción electromagnética.

d) Equipamiento para manejo de energía, elevación de tensión y conexión a la red

La energía generada en el alternador se transmite mediante conductores al transformador de potencia, para que el voltaje sea elevado de 480V a 22.000V, voltaje al cual opera el sistema de distribución al que la central será conectada. Previo al punto de conexión se instalan dispositivos de medición y protección, a través de los cuales se recibirán las señales necesarias para el monitoreo, adquisición de datos, control y operación de la central.

4.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO ACV

4.4.1. Determinación de los objetivos y alcance del ACV

En este capítulo se desarrollan las dos primeras etapas del ACV, puesto que es donde se van recolectar los datos para el posterior análisis e interpretación según esta metodología como es el ACV.

Para definir el objetivo y alcance es necesario considerar los flujos y procesos más relevantes del sistema a estudiar. La calidad de los resultados va a depender de la calidad de datos obtenidos, dichos resultados serán utilizados para la modelización de los sistemas en el software Simapro8.

Objetivo del ACV

El objetivo de este estudio, es analizar cuantitativamente el comportamiento ambiental y energético para de esta manera evaluar los potenciales impactos que se generen en el proceso de obtención de energía eléctrica a partir del biogás en un relleno sanitario, a lo largo de su ciclo de vida.

Aplicación del ACV

Este ACV se aplica a la generación de energía eléctrica en un sistema que usa la biomasa, como es un relleno sanitario. Las etapas comprendidas en este estudio son: recolección de residuos, operación, mantenimiento y la estimación de la disposición final del relleno.

Alcance del ACV

El ACV comienza en el punto de recogida de residuos, y se sigue con los residuos depositados en el vertedero, la generación de gas y por consiguiente la electricidad producida.

a) Unidad Funcional

La unidad funcional que se usó en este trabajo fue 1MWh, por energía eléctrica generada.

b) Límites del Sistema

Los límites que se consideran en este estudio es la fase de operación en la cual se consideran las siguientes etapas:

- Transporte de basura al relleno sanitario,
- La recolección y tratamiento del biogás,
- Generación de electricidad y
- Estación de transformación.

En la figura 4.4 se pueden ver los límites del sistema.

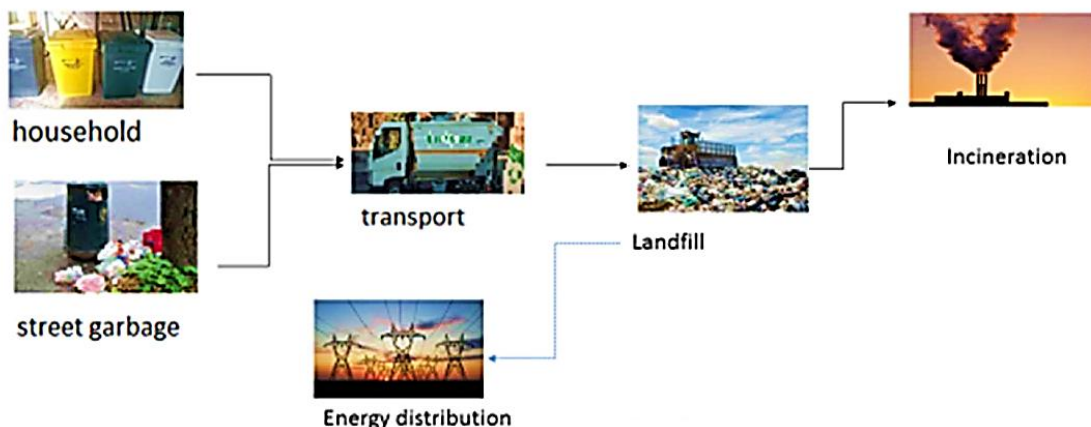


Fig. 4.4. Límites del Sistema a estudiar

Selección de categorías de impacto

Se usaron las categorías de impacto que se encuentran en el método CML 2 baseline 2000, mediante el software Simapro 8.

CML es una metodología elaborada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden en los Países Bajos, es la más utilizada ya que suele considerarse más completa, las categorías de impactos evaluados en esta metodología son:

- Agotamiento de recursos abióticos para elementos.
- Agotamiento de recursos abióticos para recursos fósiles.
- Calentamiento global.
- Agotamiento de la capa de ozono.
- Formación de oxidantes fotoquímicos.
- Acidificación del suelo y del agua.
- Eutrofización.

4.4.2. Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

4.4.2.1. Transporte de basura

En términos generales la recolección de residuos es transportar los residuos sólidos desde la fuente generadora hasta el vehículo recolector y luego trasladarlos hasta el sitio de disposición final o a la estación de transferencia [34].

Los residuos de material reciclable y desechos de jardín son recolectados de manera independientemente, ya sea en compartimientos separados del mismo vehículo o en uno diferente. Cuando el vehículo reúna la mayor cantidad de desechos y este lleno o cumpla con la carga por rueda permitida, debe transportar los desechos a su disposición final, que para el caso del cantón Cuenca es el relleno sanitario de Pichacay.

- **Cantidad de camiones**

En la tabla 4.6 se presentan las características y la cantidad de vehículos recolectores que dispone EMAC EP, para recorrer la ciudad y recolectar los residuos sólidos.

Flota de Recoleccion EMAC EP			
Cantidad	Marca	Año Fabricación	Capacidad de carga (t)
11	VOLKSWAGEN	2011	14
10	STERLING	2003	13
13	KENWORTH	2012	15

Tabla 4.6. Flota de Recolección EMAC EP

- Consumo de combustible

La ciudad de Cuenca consta de 48 rutas para recolección de residuos, divididas en dos sectores: periféricos y concéntricos. En el Anexo 2.1 se presenta la distancia de las rutas de recolección en el entorno concéntrico de la ciudad así como el consumo de combustible. El Anexo 2.2 se muestran los valores de consumo de combustible y la distancia para los sectores periféricos. Obteniéndose un consumo de combustible de 212.625,05 gal/año.

Ahora bien para ingresar los datos en el Software se necesita tener en toneladas por kilómetro (tkm), para obtener en esta unidad se multiplicó el total de km recorridos de los camiones recolectores por las toneladas de basura que ingresaron en 2017, obteniendo 228'188'181,672 tkm al año, para lo cual se usó la opción *truck 16 t*, de Simapro, ésta permitirá la simulación de los camiones recolectores de basura.

También se consideró el uso de combustible, para ingresar este valor primero se convirtió los galones de diésel usados al año en Btu, es decir al convertir los 212.625,05 gal/año de diésel se obtuvieron 80'898.972,15Btu. Los datos que se ingresaron en el software se presentan en la figura 4.5, y el esquema de esta etapa se puede observar en la figura 4.6.

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos							
Nombre	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Categoría	Comentario	
Transporte de Residuos Municipales_1	1	tkm	Transport	100 %	Road		
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados							
Nombre	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DSMin	Máx	Comentario	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DSMin	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)							
Nombre	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DSMin	Máx	Comentario	
Truck 16t_residuos_pichacay	228188181,67	tkm	Indefnido				
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)							
Nombre	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DSMin	Máx	Comentario	
(Insertar línea aquí)							
Salidas							

Fig. 4.5. Ingreso de datos en Simapro 8 Etapa Transporte de Residuos

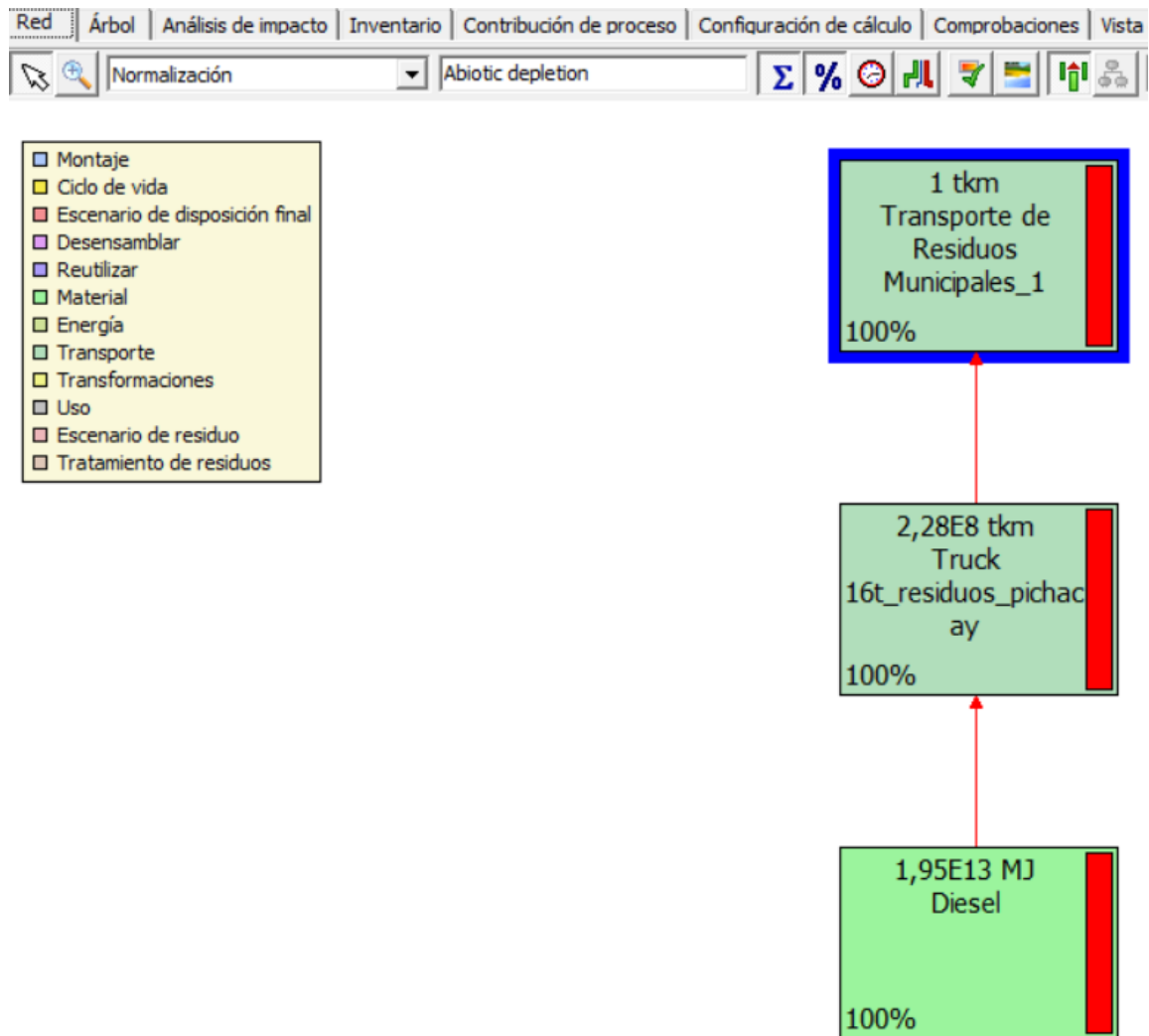


Fig. 4.6. Esquema etapa transporte de Residuos Simapro

4.4.2.2.Registro del gas

Para la extracción del biogás se utiliza un bioprocesador como se explicó en las secciones anteriores, para simular esta etapa se utilizó las bombas de absorción que se presenta en el programa como *absorption chiller*, además dentro de este proceso se ingresó un subproceso denominado tratamiento del biogás, para el cual se usó la opción *Biogás {CH₄} treatment of, purification to methane*, del mismo programa, en el cual se ingresó el valor de 992 m³, valor correspondiente al promedio de biogás generado en el 2017.

Considerando los datos de la tabla 4.4 donde el biogás que se genera en el relleno sanitario cumple las condiciones específicas para ser quemados en los motores de combustión interna y generen electricidad se han ingresado el valor de biogás correspondiente al 2017. En la imagen 4.7 se observa el ingreso de los datos para el subproceso tratamiento del biogás en Simapro, en la figura 4.8 se presenta el ingreso de valores de energía producida al usar el biogás y finalmente en la figura 4.9 se presenta el esquema final de este proceso.

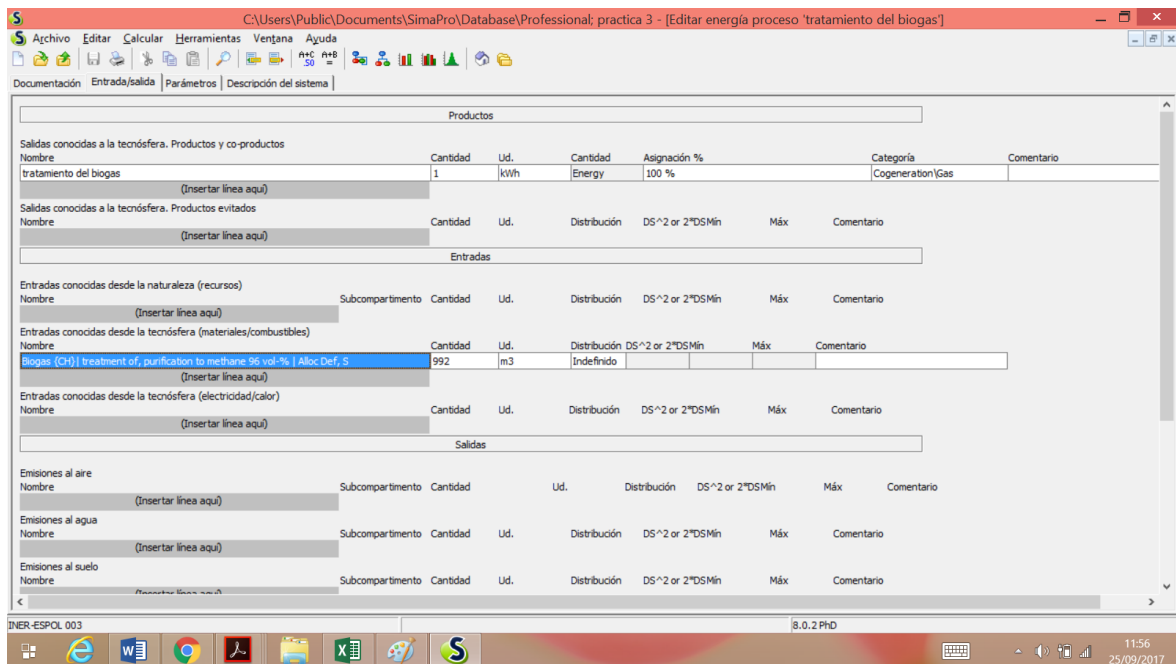


Fig. 4.7. Ingreso de datos para el subproceso Tratamiento del biogás en Simapro.

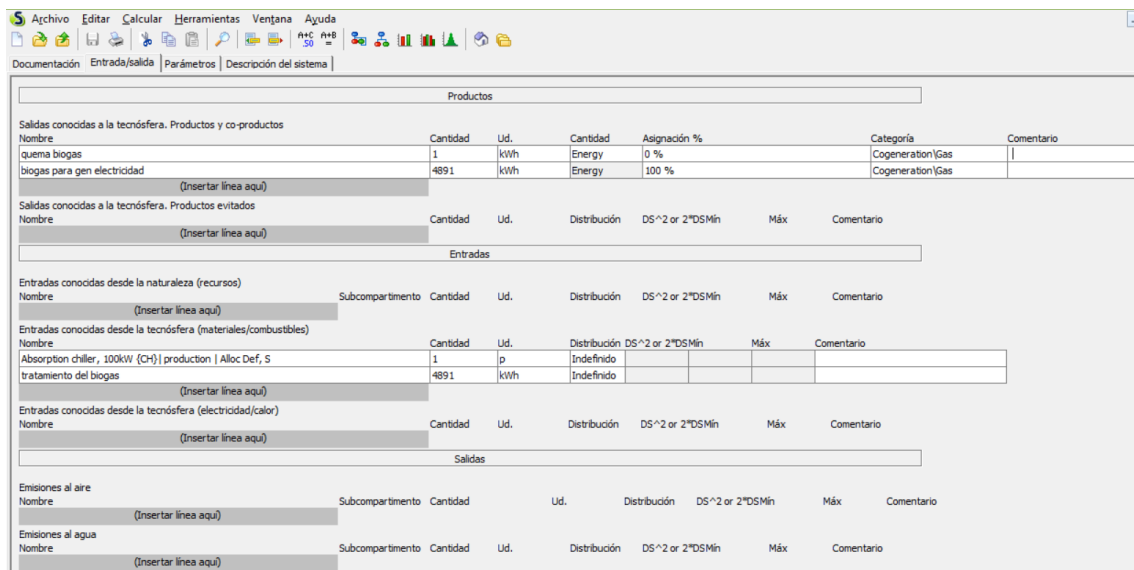


Fig. 4.8. Ingreso de datos en Simapro etapa extracción del biogás para Generar electricidad

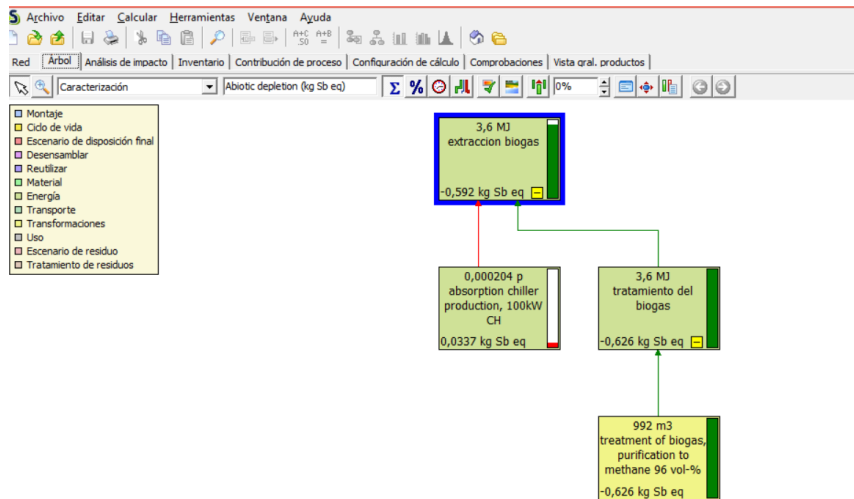


Fig. 4.9. Esquema de etapa extracción de biogás para generar electricidad.

4.4.2.3. Grupo generador de electricidad

En este punto se ingresaron los siguientes datos:

- Micro turbinas a gas de 100kW en cantidad se pusieron 20 debido a que la central generará 2MW.

En la figura 4.10 se presenta el ingreso de valores para esta etapa en Simapro, se utiliza la opción de Simapro *Micro gas turbine, 100kW electrical*.

Nombre	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DSMin	Máx	Comentario
Micro gas turbine, 100kW electrical (GLO) market for Alloc Def, S	20	kWh	Indefinido			
biogás para gen electricidad	2089	kWh	Indefinido			

Fig. 4.10. Ingreso de valores para la etapa de Generar electricidad en Simapro

4.4.2.4. Estación de transformación

- Transformador elevador de tensión de 480V a 22kV os datos ingresados fueron 850kg debido a que se usa un transformador con capacidad nominal de 2,2MVA y ese valor corresponde al peso de un transformador de esas características.

5. CAPÍTULO

Luego de haber obtenido la información necesaria e importante en los capítulos anteriores, se procedió a simular los datos en el software Simapro.8, en este capítulo se presenta el desarrollo de dicha simulación y los resultados que se obtuvieron de la misma.

5.1. ANALISIS DE RESULTADOS.

5.1.1. EVALUACION DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA.

Como se sugiere en las normas ISO 14040, después de la definición de objetivo y alcance, se debe realizar un inventario detallado del ciclo de vida (ICV), para luego usar los resultados del ICV en la caracterización de impactos (EICV).

Existen diferentes métodos que pueden utilizarse para realizar una Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida. Estos métodos son continuamente investigados y desarrollados por diferentes grupos científicos basados en diferentes enfoques.

El nivel medio describe el impacto como el cambio climático, la eco-toxicidad y la acidificación, en contraste con el nivel final en el que se describen los daños a la salud humana y los ecosistemas.

CML 2 Baseline 2000

Como se mencionó en el capítulo dos, este es uno de los modelos más empleados para la evaluación de impactos ambientales, razón por la cual se elige como método predefinido para realizar los cálculos en el software Simapro 8. A continuación se detalla cada uno de los impactos que se evalúan dentro de este método.

Agotamiento de recursos abióticos (ADF)

Este indicador de categoría de impacto está relacionado con la extracción de minerales y combustibles fósiles, debidas a las entradas al sistema desde la tecnosfera y la naturaleza. El factor ADF se determina en $S_b \text{ kg eq (kg equivalentes de antimonio / kg de extracción)}$, basado en las reservas de la concentración y el ritmo de des acumulación [35].

Potencial de Acidificación (AP)

Esta categoría mide la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera. Las sustancias acidificantes causan un gran impacto en el suelo, aguas subterráneas y superficiales y ecosistemas. El potencial de acidificación (AP) se expresa como $\text{kg dióxido de azufre equivalentes/kWh}$ [23, p. 34].

Potencial de Eutrofización (EP)

La Eutrofización consiste en el enriquecimiento de nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, que culmina en una sobrealimentación en ecosistemas acuáticos y terrestres. Esto puede causar el aumento de la producción de biomasa y, por consiguiente, un cambio en la composición de las especies.

Por ejemplo en los ecosistemas acuáticos, el aumento del crecimiento de las algas impide que la luz solar llegue a capas más profundas por lo tanto se produce menos fotosíntesis y la concentración de oxígeno disminuye, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas evitando que peces y otros animales puedan sobrevivir. Y en los ecosistemas terrestres, la eutrofización podría causar un cambio en la flora y la fauna, la biodiversidad puede disminuir.

Potencial de Calentamiento Global (GWP)

Está relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero. En ACV, el potencial de calentamiento global (GWP) se mide en kg de CO₂ equivalente de acuerdo con el IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Esta es una medida de cuánto una unidad de masa de gas contribuye al calentamiento global en comparación con el dióxido de carbono. Los otros gases como CH₄, N₂O, SF₆, PFC y HFC se expresan en CO₂ equivalente [36, p. 32].

Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP)

La capa de ozono es el escudo de la tierra contra la radiación UV y de esta manera previene el calentamiento excesivo de la superficie de la tierra, pero debido a emisiones como los clorofluorocarbonos (CFC) se ha ido debilitando esta capa.

Esta categoría mide los efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de Ozono atmosférica. El modelo de caracterización define el Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (kg CFC-11 equivalentes/kWh) [23, p. 33].

Potencial de Toxicidad Humana, Eco-Toxicidad Terrestre, de agua dulce y marina

Los metales pesados emitidos al aire, agua o suelo son los que contribuyen principalmente en la toxicidad. Algunos de los parámetros en los que se basa la toxicidad de una sustancia son:

- Composición química,
- Propiedades físicas,
- Fuente puntual de emisión y
- Tiempo de exposición

Las sustancias dañinas pueden propagarse a la atmósfera, a los cuerpos de agua o al suelo. La evaluación del Potencial de Toxicidad Humana (HTP) tiene como objetivo estimar el impacto negativo en los seres humanos, el potencial de Eco-Toxicidad apunta a esbozar los efectos perjudiciales en el ecosistema [36, p. 34].

Potencial de Formación de Oxidantes Fotoquímicos (POCP)

Esta categoría mide el impacto causado por foto-oxidantes⁷ o sustancias reactivas mismas que son perjudiciales para la salud humana y cultivos. El potencial de formación de oxidantes fotoquímicos (POCP) es expresado en kg etileno equivalentes/kWh.

5.1.2. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Los resultados que se obtuvieron al usar Simapro 8 y el método CML 2 baseline 2000, se presentan a continuación por etapas y al final todo en conjunto, las etapas son:

- Transporte de Residuos.
- Subestación de Transformación
- Equipo de Generación de Electricidad
- Biogás para Generación de electricidad.

Transporte de Residuos.

En esta etapa se consideró el combustible consumido en un recorrido diario de los camiones recolectores de basura, en la imagen siguiente se puede observar la contribución que tiene ésta etapa en cada uno de los impactos estudiados por el método CML baseline 2000.

En la figura 5.1, se puede observar que como era de esperarse el diésel por ser combustible fósil contribuye con el agotamiento de recursos abióticos en un 99,99%, la eco-toxicidad terrestre en un 90,91%, seguida de toxicidad de aguas dulces con el 74,60% y finalmente con la toxicidad humana con el 69,17%. El uso de un camión de 16t, aporta en su mayor parte a los impactos ambientales, esto se debe a que se considera el consumo directo de energía y material de trabajo y emisiones durante el funcionamiento, es por ello que los impactos con mayor contribución de éste camión son el agotamiento de capa de ozono con un 100% de aporte, calentamiento global con un 99,94%, eco-toxicidad del agua marina con un 99,83% y finalmente oxidación fotoquímica con un 86,89%.

En el Anexo 3.1 se presentan las tablas resultantes en porcentaje y en valores equivalentes de la contribución de cada una de estas etapas con los impactos ambientales.

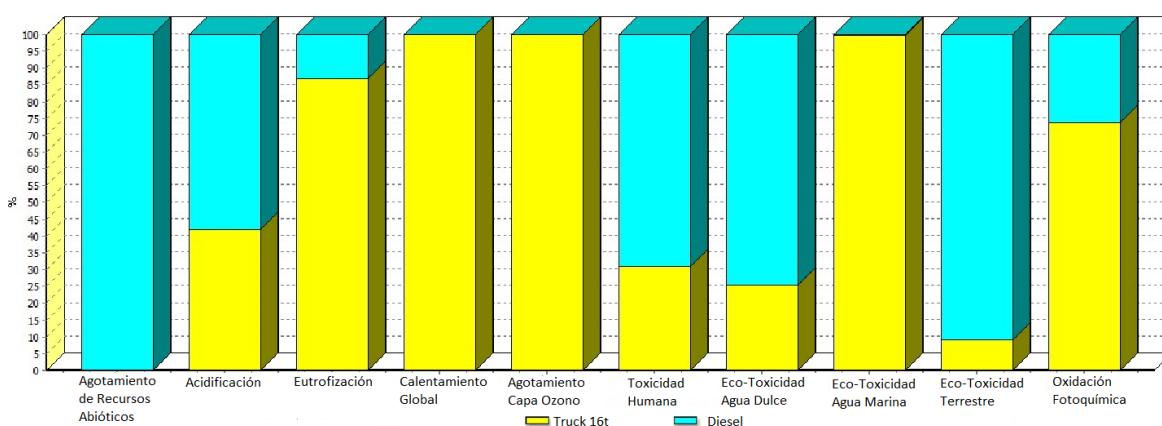


Fig. 5.1. Impactos asociados a la etapa Transporte de Residuos

⁷ **Foto-oxidantes** son una mezcla de gases reactivos, perjudiciales para la salud, que en presencia de la luz solar, producen emisiones antropogénicas (en particular compuestos de nitrógeno e hidrocarburos procedentes de emisiones). El ozono es el producto más importante de estas reacciones fotoquímicas.

Subestación de Transformación

En esta etapa se encuentran las dos sub etapas Equipo de Generación de Electricidad y Biogás para la generación de Electricidad, ya que luego de cada una de estas etapas o procesos la energía generada en el relleno pasa a una subestación de transformación como se explicó en el capítulo 4. En la Figura 5.2 se puede observar la contribución de esta etapa a cada uno de los impactos, en la cual se ve que existen algunos “*impactos negativos*”, esto de hecho quiere decir que se trata de un beneficio ambiental, los impactos en los cuales existe un beneficio ambiental son: calentamiento global, desgaste de la capa de ozono y oxidación fotoquímica, esto se debe al equipo generación de electricidad ya que éste al evitar que el metano sea enviado al aire directamente contribuye de buena manera con el ambiente, aunque se observa que la mayoría impactos se dan en esta misma etapa, en la sección siguiente se analizará el porqué de esta situación. La sub etapa *transformer* no contribuye mucho en los impactos ya que sólo consideramos el transformador, la mayor contribución es para el impacto foto-oxidación con un 10,25%. En el Anexo 3.2, se presentan las tablas con los valores en porcentajes y equivalentes de esta etapa, resultados de la simulación.

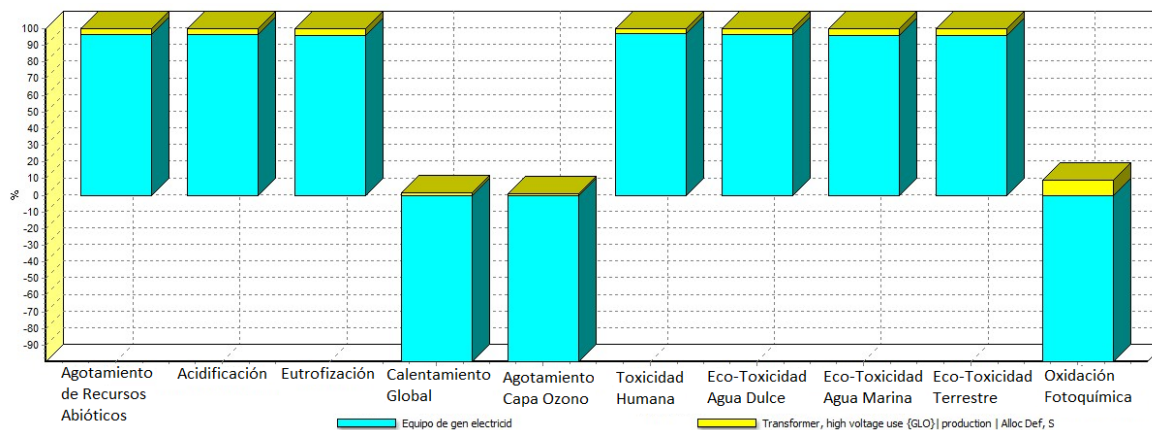


Fig. 5.2. Impactos asociados a la etapa Subestación de transformación

Equipo de Generación de Electricidad

Dentro de este grupo para el análisis de impactos se encuentra las micro turbinas, dentro del tratamiento de biogás las bombas de succión de biogás para luego este ser tratado a través de un condensador para dejar sólo el gas metano y oxígeno. En la Figura 5.3 se puede ver los impactos que aporta esta etapa en todo el proceso de generación de electricidad en el Relleno Sanitario Pichacay, en la cual se observa que causa más impactos es el uso de las micro turbinas, dichos impactos son el agotamiento de recursos abióticos, acidificación, eutrofización toxicidad humana, de agua dulce, agua marina y terrestre y la foto-oxidación, pero estos impactos negativos son contrarrestados con aspectos positivos generados por el uso adecuado del biogás para generar electricidad, como se puede observar contribuye de forma positiva en un 100% aproximadamente en los impactos calentamiento global, desgaste de la capa de ozono y foto-oxidación. En el Anexo 3.3 se muestras las tablas con los resultados de la simulación de esta etapa.

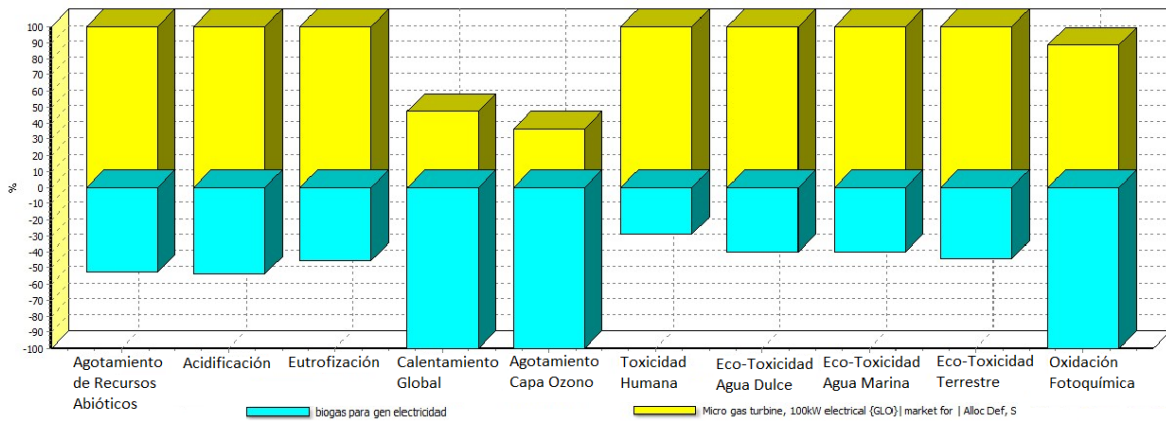


Fig. 5.3. Impactos asociados a la etapa Equipo de Generación de Electricidad

Biogás para la Generación de Electricidad

Por último se tiene la etapa donde se extrae el biogás para ser tratado y enviado al grupo de generación eléctrica. En la figura 5.4 se puede observar que existe en su mayor parte aspectos positivos en cuanto a los impactos, debido a que el biogás no es enviado directamente al aire sino que es utilizado para generar electricidad, evitando la mayoría de estos, se puede observar que existe aspectos negativos ambientalmente hablando, en cuanto al uso de la bomba de absorción ya que en esta se considera el consumo de energía y algunas emisiones al aire, los impactos con los que contribuye esta bomba de absorción son toxicidad humana con un 20.40%, seguida de eco-toxicidad marina con un 16.73% y eutrofización con un 14,52%. En el anexo 3.4, se presentan las tablas con los resultados de estos impactos.

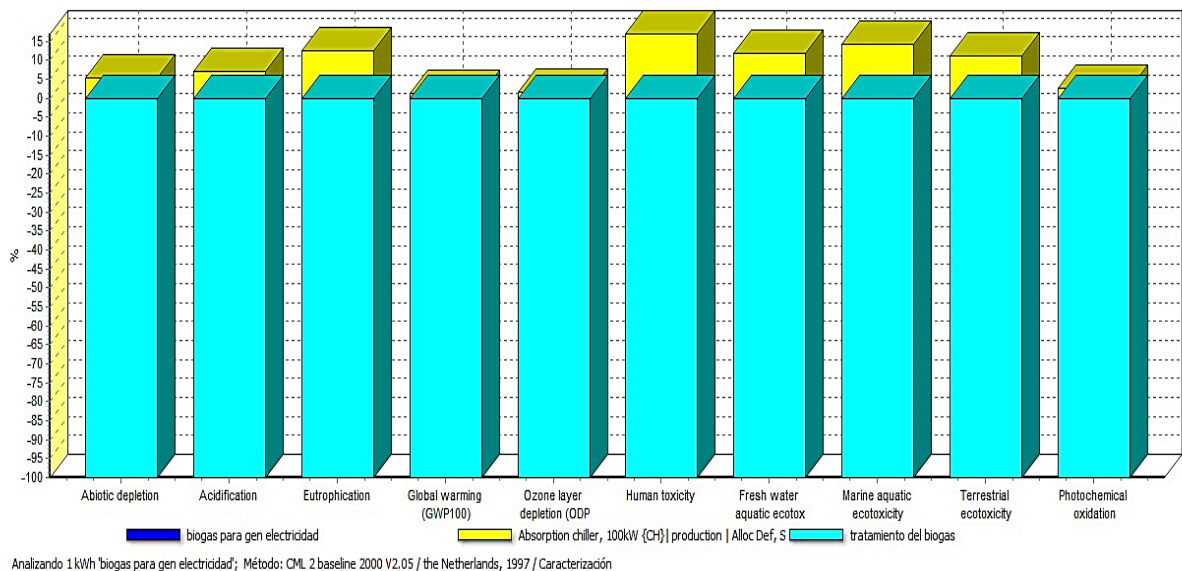


Fig. 5.4. Impactos asociados a la etapa Biogás para la Generación de Electricidad.

Generación de electricidad a partir de Biogás del Relleno Sanitario Pichacay

Ahora bien se presenta el análisis de ciclo de vida del proceso completo de generación de electricidad a partir del biogás que se obtiene del relleno sanitario Pichacay. En la figura 5.5, se presenta el resultado de los impactos ambientales que intervienen en dicho proceso. Se

puede observar que los impactos ambientales negativos se producen más en las etapas de transporte de los residuos y en el equipo de generación de electricidad es decir las micro turbinas, pero también existe un impacto favorable en el proceso de generar electricidad mediante el biogás.

En el transporte de residuos se tiene una contribución del 100% en el impacto foto-oxidación y calentamiento global, un 99,98% en agotamiento de los recursos abióticos, 99,93% en acidificación y 99,75% en eutrofización, mientras que los impactos asociados a la etapa del equipo de generación de electricidad son, en la eco-toxicidad de aguas dulces, marinas y terrestre. En el anexo 3.5 se puede observar los valores cada uno de estos impactos asociados a las etapas analizadas en el presente trabajo.

En la figura 5.6 se presenta el esquema final correspondiente a todo el proceso para generar electricidad a utilizando el biogás del relleno sanitario como combustible.

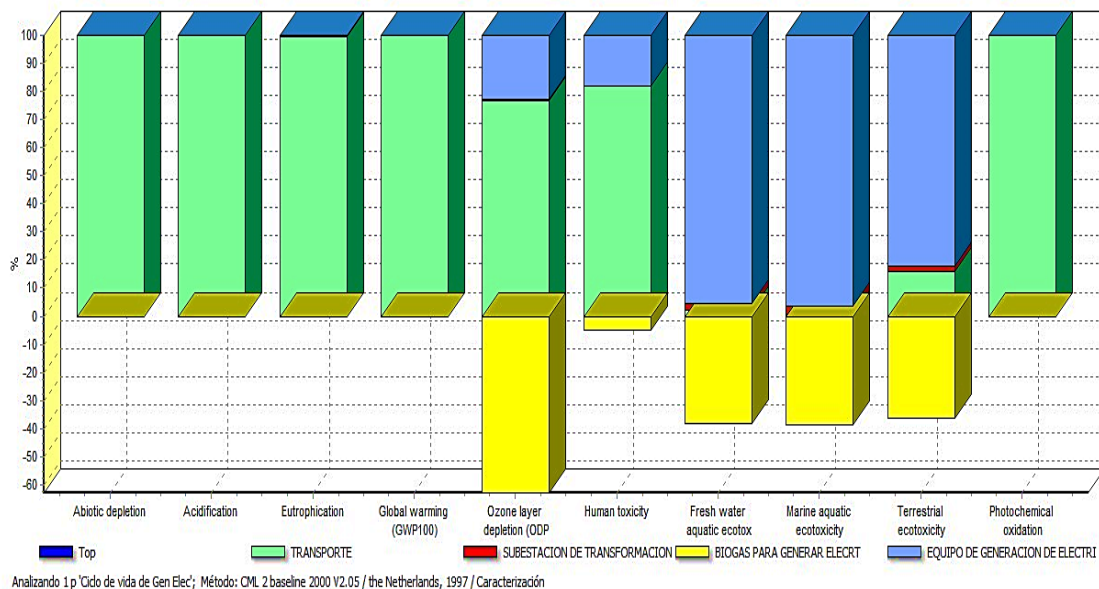


Fig. 5.5. Generación de electricidad a partir de Biogás del Relleno Sanitario Pichacay

En función a los resultados obtenidos con este estudio se pueden establecer las actividades que más afectan medioambientalmente y en las que habría que realizar esfuerzos para mejorar el comportamiento medioambiental.

En primer lugar, el aspecto más destacado a tener en cuenta es que el subsistema que más influye, perjudicialmente, en las diferentes categorías de impacto ambiental estudiadas es el transporte de los residuos hacia el relleno sanitario. En el anexo 3.5, se presentan los resultados de los impactos asociados al proceso completo de generación de electricidad a partir de biogás del relleno sanitario Pichacay. En la figura 5.6 se puede observar el diagrama de bloques completo del proceso estudiado.

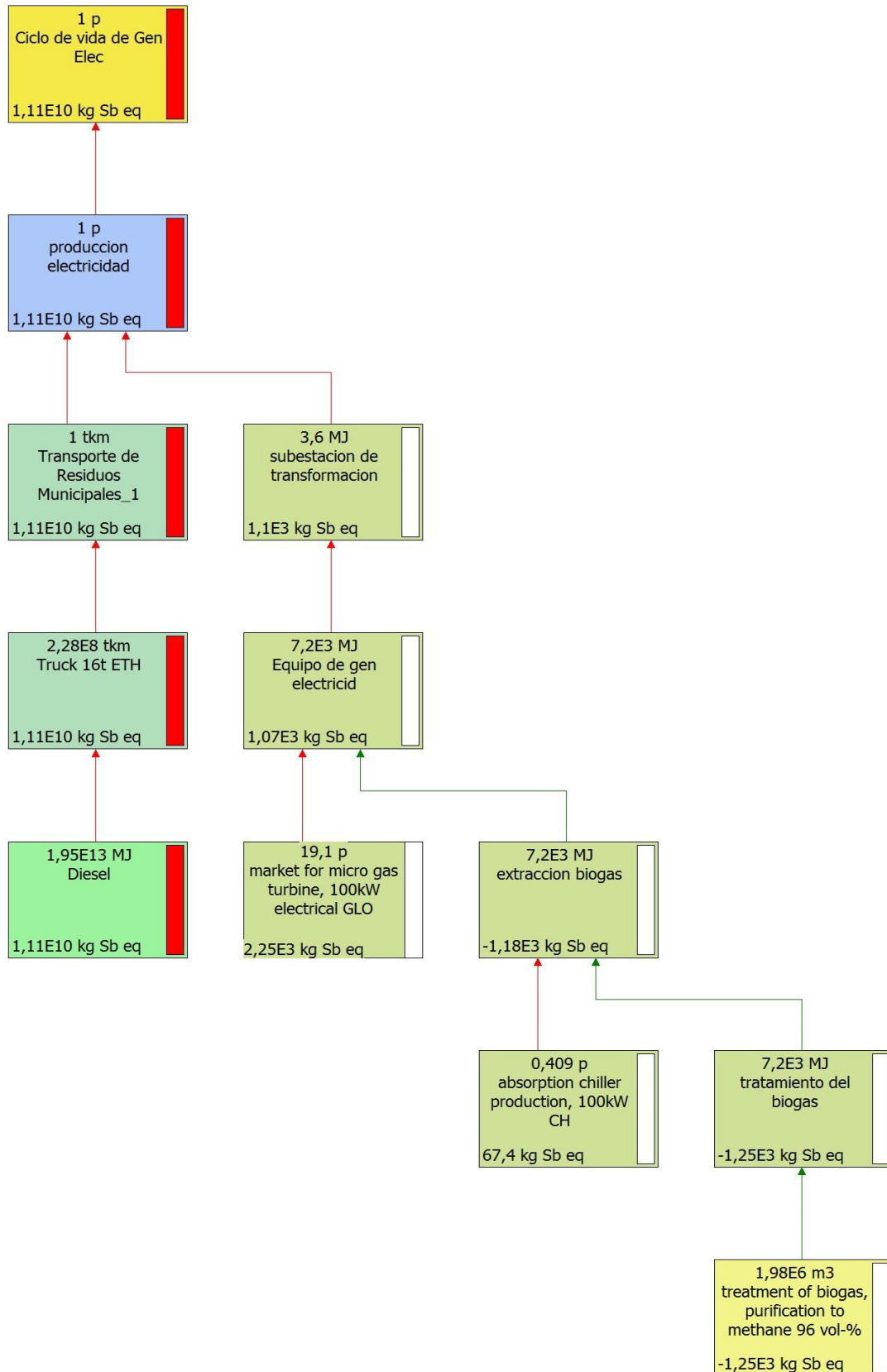


Fig. 5.6. Esquema del proceso de Generación de Biogás del Relleno sanitario

5.1.3. HUELLA DE CARBONO.

Para el análisis de la huella de carbono, se empleó el método Greenhouse Gas Protocol V1.01 del software Simapro, a partir de los datos de inventario ya descritos. Este método permite obtener el CO₂ eq fósil, que es el CO₂ que surge de la combustión de los combustibles fósiles; el CO₂ eq biogénico, que es aquel que surge de fuentes biológicas; el CO₂ eq. debido a la transformación de la tierra y la absorción de CO₂, que hace referencia al CO₂ que se almacena en las plantas durante su crecimiento [28].

En la figura 5.7, se presenta la caracterización de la huella de carbono asociada a la producción de 1kWh a partir del biogás del relleno sanitario Pichacay. Se puede observar que al igual que con el método CML 2 Baseline 2000, existe las influencias por las distintas sub-etapas o subsistemas del inventario sobre los diferentes aspectos que considera el método para éste análisis acerca de la huella de carbono, en términos porcentuales.

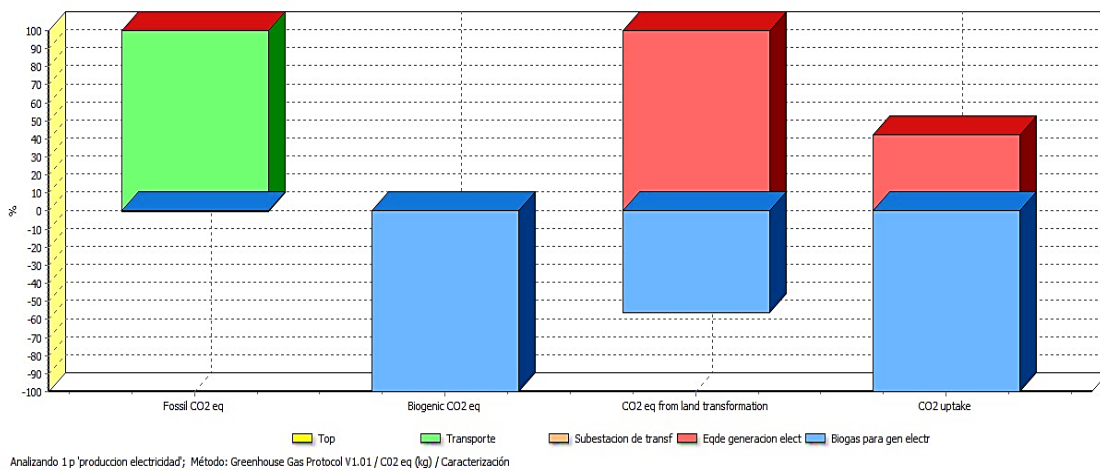


Fig. 5.7. Caracterización de huella de carbono asociada a la producción de 1 kWh de electricidad en la subestación Pichacay según el método Greenhouse Gas Protocol.

En lo que respecta al CO₂ eq fósil, existe una gran influencia de la sub-etapa correspondiente al transporte de los residuos al relleno sanitario con un 100%, lo cual es normal debido a la consumo de combustibles fósiles. En el caso del CO₂ eq biogénico, se observa que existe un impacto beneficioso el subsistema Biogás para generar electricidad.

Aunque según la norma ISO 14067, no son de información obligatoria las emisiones debido a transformaciones de la tierra y absorción de CO₂, el método Greenhouse Gas Protocol los incluye, es así que para este caso de estudio las emisiones debido a transformaciones de la tierra tiene un impacto positivo el subsistema biogás para generar electricidad, mientras que el subsistema Equipo de generación de electricidad, afecta de manera negativa. Para el término de absorción de CO₂, se observa que tiene un comportamiento parecido al anterior, existe un aspecto beneficioso ambientalmente hablando procedente del subsistema biogás para generar electricidad, y un impacto negativo aunque menor que el anterior debido al subsistema equipo para generar electricidad.

Así pues, se obtuvieron los siguientes resultados:

- CO₂ eq. fósil: 4,91E+14 kg de CO₂ eq. por kWh de electricidad producida.

- CO2 eq. biogénico: **-3,77E+09 kg de CO2** eq. por kWh de electricidad producida.
- CO2 eq. de transformación de la tierra: **3,32E+05 kg de CO2** eq. kWh de electricidad producida.
- Absorción de CO2: **-1,41E+07 kg de CO2** eq. por kWh de electricidad producida.

Ahora bien sumando estos valores, obtenemos la huella de carbono total, que es de **4,91E+14 kg de CO2** eq por kWh generado.

De los resultados obtenidos en el este caso de estudio, mediante la metodología del análisis de ciclo de vida y la huella de carbono, se puede ver claramente que el sistema que afecta de manera negativa y significativamente es el transporte, esto se debe a que los camiones recolectores tienen gran cantidad de recorridos que realizar y por ende un gran consumo de diésel, también se puede ver que el resto de subsistemas en especial en la generación de electricidad por combustión del biogás del relleno sanitario se tienen aspectos positivos debido a que se evitan emisiones al aire directamente del metano que es uno de los GEI más perjudiciales.

6. CONCLUSIONES

Desde hace algunos años se han venido promoviendo el uso de fuentes de energía renovable a nivel mundial, todo esto para disminuir el uso de combustibles fósiles y a la vez disminuir los impactos ambientales negativos, a pesar de todo los avances y estudios que se han desarrollado a nivel el mundial sobre dichas fuentes renovables, métodos para calcular los impactos ambientales que las actividades, productos, servicios y en general toda actividad que implique el uso de recursos ya sean renovables o no, en el Ecuador aún no se ha estudiado con profundidad lo que se refiere a los métodos Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la huella de carbono. Es importante que se desarrollen más estudios y proyectos en cuanto a estas actividades se refiere.

A pesar de que en nuestro país se reconocieron los “derechos de la naturaleza”, una visión circular de la economía aún es escasa. Es necesario que se usen políticas las cuales incentiven estas formas productivas innovadoras, ya que contamos con la capacidad necesaria para distinguimos en la región como un país que piense y aplique la sostenibilidad ambiental, y sobretodo recordar que es deber de todos contribuir a este cambio enmarcado en una economía circular.

El ACV de este caso de estudio tiene implícitamente las necesidades de mantenimiento, para una prolongación del tiempo de vida del caso de estudio, evitando costos en la construcción de una nueva estación a corto plazo.

Las categorías de impacto ambiental más afectadas en la producción de electricidad a partir del biogás generado en el relleno sanitario Pichacay, en orden de mayor a menor son, calentamiento global, agotamiento de los recursos abióticos, acidificación, eutrofización y foto-oxidación.

El subsistema o sub etapa que influye de gran manera en la generación de electricidad, es el transporte de residuos hacia el relleno sanitario, esto se debe a que el combustible de los camiones recolectores es el diésel, es decir un combustible fósil, otro aspecto es la cantidad de km que deben recorrer para recolectar la basura por ende consumen mucho combustible.

La huella de carbono para esta central a biogás, es de **4,91E+14 kg de CO₂ eq** por 1kWh generado.

Las mejoras ambientales deberían ir encaminadas a maximizar el transporte de residuos ya sea optimizando sus rutas de recorrido, para de esta manera tener un menor consumo de combustible, también se podría cambiar de combustible y usar bio-diesel, que como se mencionó en el capítulo 2, éste puede reemplazar al diésel ya que posee una cantidad de energía similar, con la diferencia de que éste es un combustible más limpio y puede ser utilizado por cualquier tipo de motor diésel, al realizar esta mejora no solo se consigue disminuir los impactos ambientales antes mencionados, sino que también disminuiría la huella de carbono, haciendo que esta central de biogás sea mucho más amigable con el ambiente.

Existen aspectos positivos al generar electricidad de esta manera, ya que el biogás no es liberado al aire directamente, si no que se primero se lo trata para obtener las condiciones necesarias para que pueda ser quemado en un motor de combustión interna, los aspectos ambientales que se reducen al realizar esta actividad son desgaste de la capa de ozono, la eco-toxicidad de aguas dulces, aguas marinas y eco-toxicidad terrestre.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Consorcio Ecuatoriano para la Responsabilidad Social - CERES, “¿Qué es la Economía Circular?” [Online]. Available: <http://www.redceres.com/single-post/2017/06/07/economia-circular>. [Accessed: 26-Sep-2017].
- [2] C. U. de S. de la U. Jordi Morató, R. C. I. N. R. Nicola Tollin, and A. para la S. y el P. de las S. (ASYPS). Luis Jiménez, *Situación Y Evolución De La Economía Circular En España*. 2017.
- [3] L. S. Ledes, “Los biocombustibles”, *ArgenBio, Cons. Argentino para la Inf. y el Desarro. la Biotecnol.*, p. 5.
- [4] C. Gracia, “Bioetanol”, in *Biocombustibles: ¿Energía o alimento?*, 2004, pp. 77–103.
- [5] J. Colon, *Biocombustibles una solución para el futuro energético*. 2009.
- [6] M. T. Vanero Moreno, *Manual de Biogás*. Santiago de Chile, 2011.
- [7] J. C. Páez Salvador, “Diseño de un biodigestor para el manejo de residuos orgánicos producidos en el enbalse Daule-Peripa”, Universidad Central del Ecuador, 2016.
- [8] “Biodigestores: ¿Qué son y cómo implementarlos en un Proyecto? | Arquinetpolis”, [Online]. Available: <http://arquinetpolis.com/biodigestores-000116/>. [Accessed: 21-Sep-2017].
- [9] M. F. Bonilla Arévalo, “Alternativas de los tratamientos de aguas residuales para la generación de energía eléctrica por medio de biogás en la ciudad de Guayaquil”, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2017.
- [10] V. Tapia Tapia, “Instalación y uso de biogás”, 2016.
- [11] J. J. Arce Cabrera, “Diseño de un biodigestor para generar biogas y abono a partir de desechos organicos de animales aplicable en las zonas agricolas del litoral”, Universidad Politécnica Salesiana de Guayaquil, 2011.
- [12] M. Pino Donoso, J. Martí Herrero, L. Gallo Mendoza, G. X. Pedraza, L. Rodríguez Jiménez, and J. Víquez Arias, “Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biodigestores de pequeña y mediana escala en LAC”, p. 52, 2016.
- [13] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), “Renewables 2016: global status report”, 2016.
- [14] “Waste-to-Energy (Municipal Solid Waste) - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy - Energy Information Administration”, [Online]. Available: http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=biomass_waste_to_energy. [Accessed: 12-Jan-2017].
- [15] D. E.-A. G. (dena) A. A. de E. Chausseestr., Ed., *renewables – Made in Germany*, 2014/2015. Berlin, Alemania, 2015.
- [16] BioenergyInsight, “Asia Biogas begins commercial operation at Thai biogas plant | Bioenergy Insight Magazine”, [Online]. Available: http://www.bioenergy-news.com/display_news/10121/Asia_Biogas_begins_commercial_operation_at_Thai_biogas_plant/. [Accessed: 18-Sep-2017].
- [17] Bio2Watt’s, “Bio2Watt’s Bronkhorstspruit Biogas Plant (Pty) Ltd”, [Online]. Available: [http://www.bio2watt.com/bio2watt’s-bronkhorstspruit-biogas-plant-\(pty\)-ltd.html](http://www.bio2watt.com/bio2watt’s-bronkhorstspruit-biogas-plant-(pty)-ltd.html). [Accessed: 16-Sep-2017].
- [18] Consejo Nacional de Electricidad, “Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022 VOL IV,” Quito, 2013.

- [19] Consejo Nacional de Electricidad, “Resumen ejecutivo. Plan Maestro de Electrificación 2013-2022”, 2013.
- [20] R. C. D. V. DEL PERU, “Análisis Del Ciclo De Vida”, *Red ciclo vida del Peru.*, pp. 1–14, 2015.
- [21] C. Garzón, “Evaluación de alternativas de generación de electricidad desde el punto de vista de su impacto ambiental, para sectores no conectados a redes eléctricas”, 2010.
- [22] L. P. G. Hernández, “Desarrollo de una metodología para la valoración en el Análisis del Ciclo de Vida aplicada a la Gestión Integral de Residuos Municipales”, UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA Programa, 2006.
- [23] D. Lazo Vásquez and C. Urbina Velasco, “Análisis De Ciclo De Vida Y Energético De La Centrales Hidroeléctricas Agoyan Y Paute”, Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [24] J. J. Estrella López, “Análisis del impacto ambiental de las tecnologías termo-solares de concentración, usando la herramienta ACV (análisis del ciclo de vida)”, Universidad de Cuenca, 2015.
- [25] A. G. Schmid, “Diferenciación espacial en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida: Desarrollo de factores regionales para la eutrofización acuática y terrestre”, *Dep. Ing. Química*, vol. Doctorado, no. September, p. 194, 2008.
- [26] Estructplan, “Análisis del ciclo de vida y su impacto ambiental”, [Online]. Available: <http://www.estrucplan.com.ar/secciones/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=3621>. [Accessed: 18-Sep-2017].
- [27] J. Hans, “Análisis del ciclo de vida”, *Metodol. Del Análisis Del Ciclo Vida*, p. 37, 2015.
- [28] F. Canellada Barbón, “Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono de una quesería tradicional asturiana”, Universidad de Oviedo, 2017.
- [29] G. V. Eusko Jaurlaritz, “Análisis de ciclo de vida y huella de carbono”, *Ihobe*, pp. 1–53, 2009.
- [30] Pre’ Consultants, *SimaPro Database Manual*. 2016.
- [31] EMAC EP, “Proyecto de generacion electrica (2 MW) mediante la extracción de biogas del relleno sanitario Pichacay”
- [32] F. P. Carpio Garay and J. L. Tepán Vele, “Influencia de la generación distribuida en la red de distribución eléctrica - caso práctico central de biogás de Pichacay”, Universidad de Cuenca, 2014.
- [33] IADC, “Definition of Normal Cubic Metres Per Hour (Nm³/h) - IADC Lexicon”, [Online]. Available: <http://www.iadclexicon.org/normal-cubic-metres-per-hour-nm3h/>. [Accessed: 20-Sep-2017].
- [34] J. W. Cusco Tenezaca and K. E. Picón Aguirre, “Optimización de rutas de recolección de desechos sólidos domiciliarios mediante uso de herramientas SIG”, Universidad de Cuenca, 2015.
- [35] A. I. Lynch Navarro, “Uso de la Metodología de Evaluación Ambiental de Ciclo de Vida en Productos con Aplicación a Baterías de Ion Litio para teléfonos móviles”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2014.
- [36] G. Ripaldí and Life, “Life Cycle Assessment of Waste Management System”, Royal Institute of Technology, 2015.

**ANEXO 2. TABLAS DE RECORRIDOS Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE
LOS VEHÍCULOS RECOLECTORES DE BASURA**

Anexo 2.1 Consumo de Combustible sectores concéntricos

Sectores	Distancia (km)	Consumo de Combustible (gla/año)
C1	28,8	4058,69
C2	37,91	5342,53
C3	36,56	5152,28
C4	29,5	4157,34
C5	23,32	3268,41
C6	25,13	3541,49
C7	61,46	8661,35
C8	21,03	2963,69
C9	30,16	4250,35
C10	12,94	1823,59
C11	27,44	3867,03
C12	13,59	1915,19
C13	34,78	4901,43
C14	15,3	2156,18
C15	44,36	6251,51
C16	57,8	8145,56
C17	15,88	2237,92
C18	8,37	1179,56
C19	29,33	4133,38
C20	10,55	1486,78
C21	11,08	1561,47
C22	7,77	1095,00
C23	10,8	1522,01
C24	27,81	3919,17

Tabla 8.1. Consumo de Combustible sectores concéntricos

Anexo 2.2 Consumo de Combustible sectores periféricos

Sectores	Distancia (km)	Consumo de Combustible (gla/año)
P1	94,12	13264,02
P2	58,81	8287,90
P3	43,91	6188,09
P4	32,90	4636,49
P5	49,06	6913,86
P6	60,02	8458,42
P7	54,41	7667,82
P8	54,36	7660,77
P9	44,58	6282,51
P10	31,21	4398,32
P11	46,17	6506,58
P12	28,29	3986,81
P13	20,96	2953,82
P14	58,98	8311,85
P15	72,90	10273,55
P16	25,02	3525,98
P17	16,93	2385,99
P18	8,90	1254,25
P19	15,02	2116,72
P20	26,41	2312,61
P21	20,18	2843,90
P22	17,31	2439,44
P23	14,01	82,31
P24	16,06	2263,80

Tabla 8.2. Consumo de Combustible sectores periféricos

ANEXO 3

ANEXO 3 TABLAS DE RESULTADOS SIMAPRO DE LOS IMPACTOS

ASOCIADOS A CADA ETAPA

Anexo 3.1 Resultados de los impactos asociados al transporte de residuos al relleno sanitario

Categoría de impacto	Unidad	Total	Truck 16t_residuos_ pichacay	Diesel
Abiotic depletion	%	100	0,01	99,99
Acidification	%	100	41,97	58,03
Eutrophication	%	100	86,89	13,11
Global warming (GWP100)	%	100	99,94	0,06
Ozone layer depletion (ODP)	%	100	100,00	0,00
Human toxicity	%	100	30,83	69,17
Fresh water aquatic ecotox.	%	100	25,40	74,60
Marine aquatic ecotoxicity	%	100	99,83	0,17
Terrestrial ecotoxicity	%	100	9,09	90,91
Photochemical oxidation	%	100	73,84	26,16

Tabla 8.3. Impactos asociados a la etapa Transporte de Residuos porcentajes

Categoría de impacto	Unidad	Total	Truck 16t_residuo s_pichacay	Diesel
Abiotic depletion	kg Sb eq	48,86	0,00	48,86
Acidification	kg SO2 eq	20,62	8,65	11,96
Eutrophication	kg PO4--- eq	2,59	2,25	0,34
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	2149703,07	2148381,18	1321,89
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,00	0,00	0,00
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	67,82	20,91	46,91
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,10	0,02	0,07
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	72,32	72,19	0,13
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,01	0,00	0,01
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	1,83	1,35	0,48

Tabla 8.4. Impactos asociados a la etapa Transporte de Residuos unidades equivalentes

ANEXO 3.2 Resultados de los impactos asociados a la etapa Subestación de transformación

Categoría de impacto	Unidad	Total	Equipo de Generación electricidad	Transformer, high voltage
Abiotic depletion	%	100,00	96,62	3,38
Acidification	%	100,00	96,47	3,53
Eutrophication	%	100,00	95,67	4,33
Global warming (GWP100)	%	-100,00	-101,24	1,24
Ozone layer depletion (ODP)	%	-100,00	-100,83	0,83
Human toxicity	%	100,00	96,96	3,04
Fresh water aquatic ecotox.	%	100,00	96,37	3,63
Marine aquatic ecotoxicity	%	100,00	95,82	4,18
Terrestrial ecotoxicity	%	100,00	96,20	3,80
Photochemical oxidation	%	-100,00	-110,25	10,25

Tabla 8.5. Impactos asociados a la etapa Subestación de Transformación porcentajes.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Equipo de Generación electricidad	Transformer, high voltage
Abiotic depletion	kg Sb eq	1104,25	1066,89	37,35
Acidification	kg SO2 eq	1666,50	1607,61	58,89
Eutrophication	kg PO4--- eq	746,35	714,01	32,33
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-388842,40	-393671,40	4829,00
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	-0,03	-0,03	0,00
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1237204,40	1199646,66	37557,74
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	284636,02	274308,47	10327,55
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	547337715,68	524433171,50	22904544,18
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2991,99	2878,25	113,74
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	-26,59	-29,32	2,73

Tabla 8.6. Impactos asociados a la etapa Subestación de Transformación

ANEXO 3.3. Resultados de los impactos asociados a la etapa Equipo de Generación de Electricidad

Categoría de impacto	Unidad	Total	Micro gas turbine, 100kW electrical	biogas para gen electricidad
Abiotic depletion	%	100,00	211,01	-111,01
Acidification	%	100,00	216,47	-116,47
Eutrophication	%	100,00	183,90	-83,90
Global warming (GWP100)	%	-100,00	90,11	-190,11
Ozone layer depletion (ODP)	%	-100,00	57,43	-157,43
Human toxicity	%	100,00	140,74	-40,74
Fresh water aquatic ecotox.	%	100,00	167,23	-67,23
Marine aquatic ecotoxicity	%	100,00	167,32	-67,32
Terrestrial ecotoxicity	%	100,00	179,02	-79,02
Photochemical oxidation	%	-100,00	786,71	-886,71

Tabla 8.7 Impactos asociados a la etapa Equipo de Generación de Electricidad porcentajes.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Micro gas turbine, 100kW electrical	biogas para gen electricidad
Abiotic depletion	kg Sb eq	0,53	1,13	-0,59
Acidification	kg SO2 eq	0,80	1,74	-0,94
Eutrophication	kg PO4--- eq	0,36	0,66	-0,30
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-196,84	177,36	-374,20
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,00	0,00	0,00
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	599,82	844,19	-244,36
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	137,15	229,37	-92,22
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	262216,59	438745,48	-176528,90
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1,44	2,58	-1,14
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	-0,01	0,12	-0,13

Tabla 8.8. Impactos asociados a la etapa Equipo de Generación de Electricidad

ANEXO 3.4 Resultados de los impactos asociados a la etapa Biogás para Generar Electricidad

Categoría de impacto	Unidad	Total	Absorption chiller, 100kW	tratamiento del biogas
Abiotic depletion	%	-100,00	5,69	-105,69
Acidification	%	-100,00	7,50	-107,50
Eutrophication	%	-100,00	14,52	-114,52
Global warming (GWP100)	%	-100,00	1,39	-101,39
Ozone layer depletion (ODP)	%	-100,00	1,71	-101,71
Human toxicity	%	-100,00	20,40	-120,40
Fresh water aquatic ecotox.	%	-100,00	13,20	-113,20
Marine aquatic ecotoxicity	%	-100,00	16,73	-116,73
Terrestrial ecotoxicity	%	-100,00	12,36	-112,36
Photochemical oxidation	%	-100,00	2,86	-102,86

Tabla 8.9. Impactos asociados a la etapa Biogás para la Generación de Electricidad, porcentajes.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Absorption chiller, 100kW	tratamiento del biogas
Abiotic depletion	kg Sb eq	-0,59	0,03	-0,63
Acidification	kg SO2 eq	-0,94	0,07	-1,01
Eutrophication	kg PO4--- eq	-0,30	0,04	-0,34
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-374,20	5,21	-379,41
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,00	0,00	0,00
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	-244,36	49,84	-294,21
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	-92,22	12,17	-104,39
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-176528,90	29524,47	-206053,37
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-1,14	0,14	-1,28
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	-0,13	0,00	-0,13

Tabla 8.10. Impactos asociados a la etapa Biogás para la Generación de Electricidad

Anexo 3.5 Resultados de los impactos asociados al proceso completo de generación de electricidad a partir de biogás del relleno sanitario Pichacay.

Categoría de impacto	Unidad	Total	TRANSPORTE	SUBESTACION DE TRANSFORMACION	BIOGAS PARA GENERAR ELECRT	EQUIPO DE GENERACION DE ELECTRICIDAD
Abiotic depletion	%	100,00	99,98	0,00	-0,021	0,040
Acidification	%	100,00	99,93	0,00	-0,080	0,148
Eutrophication	%	100,00	99,75	0,01	-0,202	0,443
Global warming (GWP100)	%	100,00	100,00	0,00	0,000	0,000
Ozone layer depletion (ODP)	%	100,00	206,95	0,89	-169,773	61,931
Human toxicity	%	100,00	86,21	0,42	-5,446	18,813
Fresh water aquatic ecotox.	%	100,00	3,69	3,49	-62,402	155,213
Marine aquatic ecotoxicity	%	100,00	1,49	4,12	-63,547	157,939
Terrestrial ecotoxicity	%	100,00	25,20	2,84	-56,860	128,813
Photochemical oxidation	%	100,00	100,01	0,00	-0,125	0,111

Tabla 8.11. Resultados de los impactos asociados al proceso completo, porcentajes

Categoría de impacto	Unidad	Total	TRANSPORTE	SUBESTACION DE TRANSFORMACION	BIOGAS PARA GENERAR ELECRT	EQUIPO DE GENERACION DE ELECTRICIDAD
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,12E+10	1,11E+10	7,47E+04	-2,37E+06	4,50E+06
Acidification	kg SO2 eq	4,71E+09	4,70E+09	1,18E+05	-3,74E+06	6,96E+06
Eutrophication	kg PO4--- eq	5,92E+08	5,91E+08	6,47E+04	-1,20E+06	2,63E+06
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	4,91E+14	4,91E+14	9,66E+06	-1,50E+09	7,09E+08
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	5,49E+01	1,14E+02	4,87E-01	-9,32E+01	3,40E+01
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,79E+10	1,55E+10	7,51E+07	-9,77E+08	3,38E+09
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,91E+08	2,18E+07	2,07E+07	-3,69E+08	9,17E+08
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1,11E+12	1,65E+10	4,58E+10	-7,06E+11	1,75E+12
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	8,00E+06	2,02E+06	2,27E+05	-4,55E+06	1,03E+07
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	4,17E+08	4,17E+08	5,45E+03	-5,20E+05	4,61E+05

Tabla 8.12. Resultados de los impactos asociados al proceso completo.