

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

*Trabajo de titulación previo a  
la obtención del título de  
Ingeniero Eléctrico*

**PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE GENERAL:  
“VALORACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL  
RELLENO SANITARIO CEIBALES DE LA CIUDAD DE  
MACHALA”**

**AUTORES:**

JONATHAN MIGUEL OLMEDO RUIZ

JONNATHAN DAVID CURILLO TIGRE

**TUTOR:**

ING. EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN, Ph.D.

CUENCA - ECUADOR

2019

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Nosotros, Jonathan Miguel Olmedo Ruiz con documento de identificación N° 0106383474 y Jonnathan David Curillo Tigre con documento de identificación N° 0105794036, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“VALORACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL RELLENO SANITARIO CEIBALES DE LA CIUDAD DE MACHALA”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Eléctrico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre del 2019

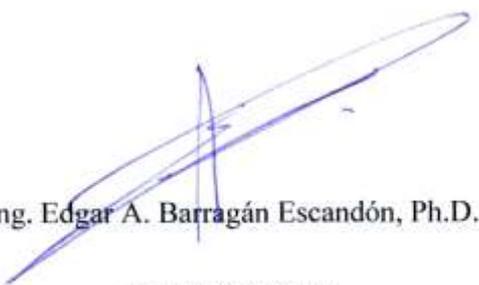
Jonathan M. Olmedo Ruiz  
C.I.: 0106383474

Jonnathan D. Curillo Tigre  
C.I.: 0105794036

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“VALORACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL RELLENO SANITARIO CEIBALES DE LA CIUDAD DE MACHALA”**, realizado por Jonathan Miguel Olmedo Ruiz y Jonnathan David Curillo Tigre, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque general* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre del 2019



Ing. Edgar A. Barragán Escandón, Ph.D.

C.I.: 0102516457

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Jonathan Miguel Olmedo Ruiz con documento de identificación N° 0106383474 y Jonnathan David Curillo Tigre con documento de identificación N° 0105794036, autores del trabajo de titulación: **“VALORACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL RELLENO SANITARIO CEIBALES DE LA CIUDAD DE MACHALA”** certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque general* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, noviembre del 2019



Jonathan M. Olmedo Ruiz  
C.I.: 0106383474



Jonnathan D. Curillo Tigre  
C.I.: 0105794036

## **AGRADECIMIENTOS**

Un profundo agradecimiento a todas las autoridades y docentes que hacen la Universidad Politécnica Salesiana, por ser la sede de todos los conocimientos adquiridos y por haber sido mi apoyo durante este tiempo.

Finalmente quiero agradecer a mi tutor de proyecto al Ing. Antonio Barragán, Ph.D. por haberme guiado y ser principal colaborador durante este proceso, quien con su conocimiento y enseñanza permitieron el desarrollo del presente trabajo.

***Jonathan Miguel Olmedo Ruiz***

Gracias a la Universidad Politécnica Salesiana y a todo su conjunto de profesores, personal técnico y administrativo, quienes han sido partícipes directa o indirectamente en mi formación profesional.

Quiero agradecer, a quienes intervinieron en este proyecto de titulación, especialmente al Ing. Antonio Barragán, Ph.D. quien me guio en este trabajo, pues sin su experiencia e ingenio, nunca se lograría concluir satisfactoriamente este trabajo, en verdad muchas gracias de todo corazón.

***Jonnathan David Curillo Tigre***

## **DEDICATORIAS**

El presente trabajo de titulación está dedicado a mi familia por ser un apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera universitaria. Quiero agradecer especialmente a mi madre ‘Martha Ruiz’ por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño sin importar la diferencia de opiniones que existiesen.

*Jonathan Miguel Olmedo Ruiz*

El presente trabajo de titulación lo dedico principalmente a Dios, por darme la vida y las fuerzas para culminar mis estudios. A mis padres, por su amor, trabajo, dedicación, sacrificio y apoyo incondicional durante todos estos años, es una verdadera suerte ser su hijo.

*Jonnathan David Curillo Tigre*

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIAS.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
GLOSARIO.....	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRAC.....	XII
OBJETIVOS.....	XIII
OBJETIVO GENERAL.....	XIII
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XIII
CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE.....	1
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
1.1    ENERGÍAS RENOVABLES Y SU ESTADO ACTUAL EN ECUADOR.....	2
1.1.1    ENERGÍAS RENOVABLES Y NO CONVENCIONALES EN ECUADOR.....	2
1.1.2    ESTADO ACTUAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN ECUADOR.....	5
1.2    BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO COMO FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	6
1.2.1    ¿QUÉ ES UN RELLENO SANITARIO?.....	7
1.2.2    ¿QUÉ ES EL BIOGÁS DE UN RELLENO SANITARIO?.....	9
1.2.3    COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS.....	9
1.2.4    VALOR CALORÍFICO DEL BIOGÁS.....	10
1.2.5    PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	10
CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO.....	13
2.1    INFORMACIÓN ACERCA DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DEL BIOGÁS.....	14
2.1.1    MODELO LANDGEM.....	15

2.1.2	MODELO IPCC .....	23
2.1.3	MODELO ECUATORIANO .....	24
2.1.4	GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS.....	27
	PROCESO PARA EXTRACCIÓN Y TRATAMIENTO DEL BIOGÁS ANTES DE INGRESAR AL ELEMENTO GENERADOR. ....	27
	ELEMENTOS GENERADORES DE ENERGÍA A PARTIR DE BGRS .....	29
	ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. ....	31
2.2	INFORMACIÓN ESPECÍFICA DEL RELLENO SANITARIO CEIBALES.....	34
2.2.1	UBICACIÓN DEL RELLENO SANITARIO CEIBALES.....	34
2.2.2	SUPERFICIE DEL RELLENO SANITARIO CEIBALES.....	35
2.2.3	CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS .....	36
2.2.4	DATOS CARACTERÍSTICOS DEL RS CEIBALES .....	37
2.2.5	COMPOSICIÓN DE LOS DESECHOS .....	38
2.2.6	OBSERVACIONES GENERALES .....	38
2.3	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....	41
2.3.1	RESULTADOS DEL MODELO LANDGEM .....	43
	CÁLCULO PARA EL VALOR DE <b>K</b> .....	43
	CÁLCULO PARA VALOR DE <b>L0</b> .....	43
2.3.2	RESULTADOS DEL MODELO IPCC .....	45
2.3.3	RESULTADOS DEL MODELO ECUATORIANO .....	46
2.3.4	MODELO MATEMÁTICO ADECUADO PARA EL CASO DE ESTUDIO.....	47
	CAPÍTULO 3: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	51
3.1	ANÁLISIS RESPECTO AL BIOGÁS APROVECHABLE.....	51
3.2	ELEMENTO GENERADOR .....	52
3.3	ESTIMACION DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE MCI.....	53
	CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA .....	55
4.1	DETERMINACIÓN DEL COSTO DE INVERSIÓN, COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	55

4.1.1	DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN.....	56
4.1.2	DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	57
4.2	EL COSTO NIVELADO DE LA ENERGÍA.....	58
4.3	VALOR PRESENTE NETO (VAN).....	59
4.4	TASA INTERNA DE RETORNO (TIR).....	60
4.5	PERIODO DE RECUPERACIÓN (PBP).....	60
4.6	RESULTADOS DEL ANALISIS ECONOMICO.....	61
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		63
5.1	BIOGAS APROVECHABLE EN EL RS CEIBALES.....	63
5.2	ENERGIA DISPONIBLE .....	66
5.3	ENTORNO ECONOMICO .....	68
5.4	Entorno de mercado.....	68
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		71
RECOMENDACIONES.....		72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		75
ANEXOS .....		83
ANEXO B: DATOS RESPECTO A LA ESTIMACIÓN DE BIOGÁS.....		84
ANEXO C: ESTIMACIÓN DE ENERGÍA Y POTENCIA.....		89
ANEXO D: ANÁLISIS RESPECTO A LA VIABILIDAD ECONÓMICA. ....		91

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 2. 1 <i>Entrada principal del RS Ceibales de la ciudad de Machala. Elaboración propia</i> .....	37
Fotografía 2. 2 <i>Compactación de los RSU en el RS Ceibales de la ciudad de Machala. Elaboración propia</i> .....	39
Fotografía 2. 3 <i>Maquinaria cubriendo los RSU con una capa de tierra. Elaboración propia</i> .....	39
Fotografía 2. 4 <i>Ducto de salida de gases en una terraza sin terminar. Elaboración propia</i> .....	40
Fotografía 2. 5 <i>Ducto de salida de gases en una terraza ya terminada. Elaboración propia</i> .....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 <i>Porcentaje de generación en centrales eléctricas del Ecuador. Elaboración propia.</i> .....	6
Figura 1. 2 <i>Ilustración de un relleno sanitario. Elaboración propia.</i> .....	9
Figura 2. 1 <i>Diagrama de bloques del sistema propuesto</i> .....	13
Figura 2. 2 Paso 1 <i>Características del RS estudiado.</i> .....	16
Figura 2. 3 Paso 2 <i>Parámetros característicos para el cálculo de generación de biogás</i> .....	16
Figura 2. 4 Paso 3. <i>Ingreso de cantidad de RSU del relleno sanitario.</i> .....	22
Figura 2. 5 <i>Modelo ecuatoriano para estimación de biogás</i> .....	26
Figura 2. 6 <i>Valores de <math>K</math> y <math>L_0</math> según el modelo ecuatoriano</i> .....	26
Figura 2. 7 <i>Valor de eficiencia de captura según el modelo ecuatoriano</i> .....	27
Figura 2. 8 <i>Tratamiento de biogás según el equipo que se desee implementar [49].</i> 31	
Figura 2. 9 <i>Planta generadora de electricidad a partir de biogás. Elaboración propia.</i> .....	34
Figura 2. 10 <i>Ubicación del RS Ceibales.</i> .....	35
Figura 2. 11 <i>Terreno dedicado al depósito de los RSU de la ciudad de Machala. [Google Earth]</i> .....	36
Figura 2. 12 <i>Gráfica y ecuación de aproximación cuadrática del crecimiento de los RSU para los próximos años</i> .....	42
Figura 2. 13 <i>Comportamiento del biogás en el RS Ceibales según el modelo LandGem</i> .....	45
Figura 2. 14 <i>Comportamiento del biogás en el RS Ceibales según el modelo IPCC</i> 46	
Figura 2. 15 <i>Comportamiento del biogás en el RS Ceibales según el modelo ecuatoriano</i> .....	47
Figura 2. 16 <i>Generación de biogás por cada uno de los modelos matemáticos</i> .....	47
Figura 2. 17 <i>Estimación de biogás recuperable en el RS Ceibales</i> .....	49
Figura 3. 1 <i>Flujo de biogás estimado para presente y futuros años.</i> .....	52
Figura 3. 2 <i>Potencia disponible en el relleno sanitario Ceibales de la ciudad de Machala mediante MCI</i> .....	54



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. <i>Resumen del estado actual de las energías renovables en Ecuador en el año 2018</i> [17] [21], [18] .....	6
Tabla 1. 2 <i>Comparativa entre diferentes gases con el biogás</i> [44].....	10
Tabla 1. 3 <i>Factores que condicionan la obtención del biogás</i> .....	11
Tabla 1. 4 <i>Fases de descomposición de los RSU</i> .....	11
Tabla 2. 1 <i>Valores para el índice de generación de metano</i> [52].....	17
Tabla 2. 2 <i>Factores que intervienen en el valor de k</i> .....	17
Tabla 2. 3 <i>Valores para el índice de generación de metano</i> [59].....	19
Tabla 2. 4 <i>Valores para el índice de generación de metano</i> [52].....	19
Tabla 2. 5 <i>Estimación de valor para factor de corrección de metano</i> [48].....	20
Tabla 2. 6 <i>Tipos de tratamiento que tiene el biogás</i> .....	28
Tabla 2. 7 <i>Información típica de tecnología que aprovecha el BGRS</i> .....	30
Tabla 2. 8 <i>Poder calorífico del metano</i> .....	32
Tabla 2. 9 <i>Estimación de eficiencia según cada escenario</i> [68][58][72].....	33
Tabla 2. 10 <i>Características climatologías la ciudad de Machala</i> .....	36
Tabla 2. 11 <i>Composición estimada desechos orgánicos</i> [76].....	38
Tabla 2. 12 <i>Cantidad de RSU que ingresaron al RS Ceibales desde su inauguración hasta el presente año mayo 2019</i> [75]. .....	41
Tabla 2. 13 <i>Estimación de residuos que ingresaran al RS Ceibales en futuros años</i>	42
Tabla 2. 14 <i>Tipo de degradación en dependencia de la precipitación promedio anual de Machala</i> .....	43
Tabla 2. 15 <i>Estimación de eficiencias de recuperación de biogás en RS de Ecuador</i> .....	48
Tabla 3. 1 <i>Diferencias entre MCI y microturbinas.</i> [78], [82].....	52
Tabla 3. 2 <i>Resumen de valores</i> .....	53
Tabla 3. 3 <i>Características de motores que funcionan con biogás.</i> .....	53
Tabla 4. 1 <i>Costos de inversión planta de 1MW</i> .....	56
Tabla 4. 2 <i>Costos de inversión planta de 1.8 MW</i> .....	57
Tabla 4. 3 <i>Costos de una planta de generación eléctrica</i> [88] .....	57
Tabla 4. 4 <i>Costos de O&amp;M</i> .....	58
Tabla 4. 5 <i>Costo nivelado de energía</i> .....	59
Tabla 4. 6 <i>Análisis del VAN</i> .....	59

Tabla 4. 7 <i>Análisis del TIR</i> .....	60
Tabla 4. 8 <i>Análisis del PBP [79]</i> .....	61
Tabla 5. 1 <i>Biogás generado en RS Pichacay y Ceibales</i> .....	64
Tabla 5. 2 <i>Parámetros calculados y estimados para el caso de estudio</i> .....	65
Tabla 5. 3 <i>Parámetros de modelos usados por US. EPA y LMOP en varios RS del país.</i> .....	65
Tabla 5. 4 <i>Biogás recuperable en RS Pichacay y Ceibales</i> .....	65
Tabla 5. 5 <i>Comparativa entre diferentes estudios realizados en el país con respecto al RS Ceibales</i> .....	66
Tabla A. 1 <i>Registro de la cantidad de RSU que ingreso desde la apertura hasta el reciente año 2019.</i> .....	82
Tabla B. 1 <i>Estimación de biogás según modelo LandGem</i> .....	84
Tabla B. 2 <i>Estimación de biogás según modelo IPCC</i> .....	85
Tabla B. 3 <i>Estimación de biogás según modelo ecuatoriano</i> .....	86
Tabla B. 4 <i>Producción promedio de biogás</i> .....	87
Tabla B. 5 <i>Producción de biogás que se estima recuperable.</i> .....	88
Tabla C. 1 <i>Cantidad de energía disponible mediante motores de combustión interna</i> .....	89
Tabla C. 2 <i>Potencia disponible por año mediante MCI</i> .....	90
Tabla D. 1 <i>Análisis Económico planta de 1MW</i> .....	91
Tabla D. 2 <i>Análisis Económico planta de 1.8 MW</i> .....	91

## **GLOSARIO.**

**COP.** Conferencia de las partes de la Convención Marco de las Naciones unidas sobre el cambio climático.

**RSU.** Residuos Sólidos Urbanos

**GEI.** Gases de Efecto Invernadero

**BGRS.** Biogás en Rellenos Sanitarios.

**RS.** Rellenos Sanitarios

**COV.** Compuestos Orgánicos Volátiles.

**CH<sub>4</sub>.** Metano.

**CO<sub>2</sub>.** Dióxido de Carbono.

**MCI.** Motores de Combustión Interna

**FOD.** Método de descomposición de Primer Orden.

**LCOE.** Coste de Energía Nivelado.

**NPV.** Valor Actual Neto.

**US.EPA.** United States Environmental Protection Agency (En español Agencia de Protección del Medio Ambiente, es una agencia del gobierno federal de Estados Unidos encargada de proteger la salud humana y proteger el medio ambiente)

**LMOP.** Landfill Methane Outreach Program (En español Programa de Alcance de Metano en Rellenos Sanitarios)

**CAA.** Clean Air Act (En español Ley de Aire Limpio es una ley federal de los Estados Unidos diseñada para controlar la contaminación del aire a nivel nacional)

**Ppmv.** Parts per million by volume (En español partes por millón de volumen)

**ERG.** Eastern Research Group, Inc. (Brinda servicios de consultoría ambiental.)

**LFG.** Landfill Gas (En español Gas de Relleno Sanitario)

**SCS Engineers.** (Environmental Engineers, Consultants, Contractors)

**IPCC.** Intergovernmental panel on climate change (en español panel intergubernamental de cambio climático)

## RESUMEN

Los rellenos sanitarios constituyen una fuente importante en la generación de biogás, debido a la descomposición anaeróbica (sin oxígeno) que ocurre dentro del confinamiento de los residuos sólidos urbanos. Este proyecto valora el biogás producido en el relleno sanitario Ceibales como combustible para generar energía eléctrica.

Para ello, se investiga el proceso de producción de biogás en rellenos sanitarios, los modelos matemáticos que permiten estimar el potencial energético, y las tecnologías disponibles para su aprovechamiento en la generación de electricidad.

Se tomará datos característicos del relleno sanitario Ceibales con el fin de poder analizar y desarrollar los modelos matemáticos. El propósito de estos modelos es estimar el potencial de generación de biogás con el que cuenta el relleno sanitario Ceibales. Una vez que se tenga el potencial de generación se puede tomar una decisión respecto a la tecnología que resulta conveniente usar. Establecida la tecnología a utilizar, se podrá definir la potencia y energía eléctrica disponible en el relleno sanitario Ceibales.

El relleno sanitario en el año 2018 recibió un total de 115 702 toneladas (T) de residuos, y se espera un incremento para próximos años. Con la cantidad de residuos depositados desde la apertura del relleno en el 2010 hasta el presente año 2019, en el relleno se ha colocado 838 564.22 T. Según estos resultados se estimó que en el 2019 el relleno cuenta con un flujo de biogás recuperable de 8.18 m<sup>3</sup>/min o 4 301 384.09 m<sup>3</sup>/año. Con el análisis de los datos obtenidos se propuso que los motores de combustión interna son los más adecuados para optimizar la producción eléctrica. Se establece una potencia disponible de 1 MW para el 2019, que puede ampliarse a 1.8 MW para el año 2024.

La viabilidad económica del proyecto se determinó utilizando los métodos de costo nivelado de energía (LCOE del inglés levelized cost of energy), costo de inversión y período de recuperación. Se espera que este proyecto sea útil como fuente de información científica para la toma de decisiones respecto al relleno sanitario Ceibales y su futura implementación.

## **ABSTRAC**

Landfills constitute an important source in the generation of biogas, due to the anaerobic decomposition (without oxygen) that occurs within the confinement of urban solid waste. This project values the biogas produced in the Ceibales landfill as fuel to generate electricity.

To do this, the biogas production process in sanitary landfills, the mathematical models that allow estimating the energy potential, and the technologies available for use in electricity generation are investigated.

Characteristic data of the Ceibales landfill will be taken in order to analyze and develop mathematical models. The purpose of these models is to estimate the potential of biogas generation that Ceibales landfill has. Once the generation potential is reached, a decision can be made regarding the technology that is convenient to use. Once the technology to be used has been established, the power and electrical energy available in the Ceibales landfill may be defined.

The landfill in 2018 received a total of 115 702 tons of waste and an increase is expected for next years. From 2010 to 2019 it is estimated that 838 564.22 ton of waste has been placed. in the landfill. According to these results it was estimated that in 2019 the landfill has a recoverable biogas flow of  $8.18 \text{ m}^3 / \text{min}$  or  $430 138 4.09 \text{ m}^3 / \text{year}$ . With the analysis of the data obtained, it was proposed that internal combustion engines are the most suitable for optimizing electrical production. An available capacity of 1 MW is established for 2019, which can be expanded to 1.8 MW by 2024.

The economic viability of the project was determined using the methods of levelized cost of energy (LCOE), investment cost and recovery period. This project is expected to be useful as a source of scientific information for decision-making regarding the Ceibales landfill and its future implementation.

# **OBJETIVOS**

## **OBJETIVO GENERAL**

- Realizar la valoración para determinar el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás que se genera en el relleno sanitario Ceibales de la ciudad de Machala.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Investigar y recopilar información acerca del biogás que se produce en los rellenos sanitarios, modelos matemáticos y su aprovechamiento como combustible para la generación de energía eléctrica.
- Obtener información técnica específica del relleno sanitario Ceibales, y datos característicos sobre los residuos sólidos urbanos depositados.
- Determinar la cantidad de biogás que se puede generar con los residuos sólidos urbanos del relleno sanitario Ceibales, mediante un modelo matemático adecuado.
- Analizar qué tipo de tecnología se puede implementar en función de la cantidad de biogás que se puede generar en el relleno sanitario.
- Determinar la cantidad de energía eléctrica que se puede generar en el relleno sanitario Ceibales.
- Determinar la viabilidad del proyecto mediante un análisis técnico-económico.

# CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El inevitable agotamiento de los recursos fósiles propició a que en la década de los 70 se dé importancia a la búsqueda de nuevas fuentes de aprovisionamiento de energía. El interés y consolidación de planes nacionales que incluían el uso de ER tomo más importancia con el protocolo de Kioto. Este tratado internacional estableció controlar los gases de efecto invernadero. El protocolo instituyó metas de reducción del 5% de emisiones respecto a 1990 por parte de 37 países [1], [2].

Las metas que quería alcanzar el protocolo consistían en reducir seis gases de efecto invernadero: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ). El acuerdo además establecía que países que no llegasen a cumplir los objetivos se les asignaría una penalidad. Es decir, si se sobrepasa los límites de emisión de GEI se deberá pagar una multa de 52 USD por tonelada emitida entre 2005 y 2007, y de 130 USD si el exceso se producía entre el 2007 y 2012. Además se asignó una penalidad del 30 % en el segundo periodo de compromiso [2], [3].

El acuerdo de Kioto entró en vigor en el año 2005, y su primer periodo estuvo en vigencia desde el 2008 hasta el 2012. Posteriormente en la COP 18 (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2012) lo extendió a un segundo periodo que entró en vigor desde el 2013 y terminaría en el año 2020. Sin embargo, en este segundo periodo se notó un débil compromiso por parte de grandes países industrializados [4].

Por finalizar el segundo periodo del protocolo de Kioto, en el COP 21 (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2015) se suscribió el llamado Acuerdo de París. El acuerdo establece que los países mantendrán el aumento de la temperatura mundial por debajo de 2 °C con el fin de promover un desarrollo con bajas emisiones de  $\text{CO}_2$ . Este acuerdo entro en vigencia el año 2016 y comenzara a regir a partir del año 2020 una vez haya finalizado el segundo periodo del protocolo de Kioto [5].

Con el transcurso de los años y la suscripción de dichos acuerdos, muchos países han optado por invertir en el desarrollo tecnológico respecto a las energías renovables. Los objetivos de los países son la reducción de GEI y el abandono del uso de combustibles fósiles, todo esto con el fin de reducir el calentamiento global.

## **1.1 ENERGÍAS RENOVABLES Y SU ESTADO ACTUAL EN ECUADOR**

El crecimiento social y económico, además del desarrollo de la industria en el país, hace que se tomen medidas respecto a una planificación energética. Una planificación en la cual estén incluidas las energías renovables existentes y futuras, con el propósito de garantizar el abastecimiento energético para actuales y futuras generaciones [6].

Ecuador ha incentivado al uso de las energías renovables desde el año 2000 con la regulación CONELEC No.\_008/00. Esta regulación establecía un precio referencial por kWh generado con energía renovables. Todo esto se planteó con el fin de disminuir el uso de combustibles fósiles y así contribuir con la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), además de diversificar la matriz energética del país. Las regulaciones posteriores (003/02, 004/04, 009/06,) continuaron con las tarifas preferenciales, variando los precios de energía por año [7], [8], [9].

Ulteriormente las tarifas preferenciales no continuaron debido a la escasa administración por parte del sector público siendo cambiadas en el año 2013 por la nueva regulación No.\_001/13. En esta regulación se mantuvieron algunas de las tarifas referenciales a las ER, pero con algunas restricciones [10], [11], [12].

La vigente regulación No. 031/16 deroga los valores preferenciales expuestos en la regulación No.\_001/13, eliminando así los alicientes para las ER. Desde entonces hasta la actualidad los precios son fijados por contratos y por el mercado Spot [13].

### **1.1.1 ENERGÍAS RENOVABLES Y NO CONVENCIONALES EN ECUADOR.**

Ecuador mantiene un interés por introducir fuentes de energías renovables y generación distribuida. Pues las energías renovables representan una alternativa limpia, no contaminante e inagotable, además de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero [14]. A continuación, se exponen algunos tipos de ER que se han empleado en Ecuador:

**Energía mediante centrales hidroeléctricas:** es la que aprovecha los recursos del agua como fuente de energía. La energía cinética que produce el agua es aprovechada para accionar máquinas que generan energía mecánica [15].

Existe un predominio del componente hidráulico debido a que es un recurso disponible en el territorio ecuatoriano. La energía hidroeléctrica es una de las energías que más electricidad produce en el país, debido a que presenta un mayor factor de rendimiento en comparación con otras fuentes renovables. Para el caso de energías renovables se debe considerar centrales hidroeléctricas con potencias menores a 50 MW debido a que su impacto ambiental es menor en comparación con las centrales de gran capacidad [16].

Durante los últimos años se han venido construyendo centrales hidroeléctricas, dando como resultado que la generación de electricidad mediante estas centrales predomine sobre el resto de las energías renovables. En el año 2018 informes presentados por el ARCONEL (Agencia de Regulación, y Control de Electricidad) enunciaron que Ecuador tiene una potencia instalada 548.16 MW mediante centrales hidroeléctricas (<50 MW). Lo cual ubica a la energía hidroeléctrica con un 73.24% con respecto a las demás energías renovables presentes en el país [17][18].

**Energía eólica:** Es la energía que se obtiene a partir de la fuerza del viento, y puede aprovecharse para producir energía eléctrica [19].

Ecuador tiene sitios con alto potencial eólico, por lo que durante los cinco últimos años se han inaugurados parques eólicos, como: Villonaco en Loja, y San Cristóbal e Isla Baltra en Galápagos. No obstante, muchos de los proyectos eólicos propuestos por empresas no se han llevado a cabo debido a la situación económica que atraviesa el país.

Ecuador actualmente cuenta con una potencia instalada total de 21.15 MW equivalente a 2.83% de las energías renovables no convencionales [20], [21].

**Energía solar:** Es la energía que aprovecha la radiación del sol, el aprovechamiento de esta requiere de dispositivos que capten la radiación del sol y la transformen en otro tipo de energía. La radiación suele ser transformada en energía térmica o en energía eléctrica. Existen dos formas de transformar esta energía, i) conversión térmica, y ii) fotovoltaica [19].

Estudios muestran que Ecuador cuenta con alto potencial para generar electricidad mediante paneles fotovoltaicos, debido a que se encuentra entre el hemisferio norte y sur. Esta ubicación le da el beneficio a que los paneles aprovechen de forma óptima los rayos emitidos por el sol. En Ecuador la energía solar es una tecnología que recientemente empezó a llamar la atención de algunas generadoras, actualmente el país genera poca electricidad mediante paneles fotovoltaicos [22], [23].

En el Ecuador la mayoría de los proyectos fotovoltaicos existentes son a pequeña escala y aislados. Desde el año 2015 hasta la actualidad no se ingresó ningún megavatio más al Sistema Nacional Interconectado (SNI) por parte de energía solar fotovoltaica. Todavía hay resistencia a invertir en esta energía debido a que esta sigue siendo costosa y su tiempo de recuperación de inversión es largo. A pesar de esto recientemente el 21 de marzo del 2019 se anunció la construcción del proyecto fotovoltaico El Aromo (Manabí), el cual tendrá una capacidad teórica de 200 MW. Se espera que el proyecto cubra gran parte de la demanda energética de Manta y Manabí [24], [25].

Registros presentados por el ARCONEL en el 2018 mostraron que Ecuador tiene una potencia instalada de 27.6 MW mediante energía solar fotovoltaica, lo que da un 3.69% entre las energías renovables no convencionales [21].

***Energía a partir de la biomasa:*** Es el tipo de energía que aprovecha la materia orgánica, vegetal o animal como fuente primaria de energía. El aprovechamiento de la biomasa se puede hacer directamente o procesando los materiales orgánicos. La materia suele ser procesada con el fin de obtener combustibles, para generar energía eléctrica o energía térmica [19].

Ecuador por su diversidad de zonas climáticas cuenta con producción agrícola en distintas regiones, cuyos desechos pueden ser aprovechados como materia prima para producir energía. Los desechos en su mayor parte son despreciados y en muy pocos casos aprovechados para generar energía eléctrica. En el caso de Ecuador son pocas las empresas que aprovechan la biomasa como fuente de energía.

El país registra solo tres plantas generadoras por medio de biomasa cuya potencia instalada es de 144.3 MW que equivale al 19.28% entre las energías renovables, es notable en comparación con la energía solar y energía eólica [21].

**Energía a partir del biogás:** Este tipo de energía es la que aprovecha los gases emitidos por desechos orgánicos, residuos agrícolas, plantas acuáticas entre otros. El biogás es un combustible que puede ser transformado en algún tipo de energía, comúnmente es aprovechado para la generación de electricidad y como energía térmica, he incluso como combustible para vehículos adaptados [26].

En Ecuador la tecnología que se emplea para aprovechar el biogás como combustible es nueva, ya que recientemente en años anteriores se inauguraron las dos plantas generadoras existentes. Una es el relleno sanitario Pichacay ubicado a 21 km de la ciudad de Cuenca y la segunda es El Inga I y II ubicado en la parroquia Pifo, cantón Quito.

El RS Pichacay cuenta con una potencia instalada de 1.2 MW y empezó su operación el 20 de noviembre del año 2015. El Inga I y II en cambio tiene una potencia de 5 MW y empezó su operación en noviembre del año 2017. Ambas plantas suman una potencia total instalada de 7.26 MW que representa el 0.97% de la generación de energías renovables no convencionales [21], [27], [28].

### 1.1.2 ESTADO ACTUAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN ECUADOR

Ecuador en el año 2018 registro una potencia instalada de 8661.9 MW en la cual se encuentran energías renovables (ER) y no renovables. Las ER presentes en Ecuador son: energía hidráulica (<50 MW), energía eólica, energía fotovoltaica, energía a partir de la biomasa y la energía a partir del biogás generado en rellenos sanitarios. A continuación, en la Tabla 1.1 se presenta un resumen del estado actual de las energías renovables en Ecuador, en cuanto a potencia instalada y su porcentaje actual respecto a las otras energías renovables [29].

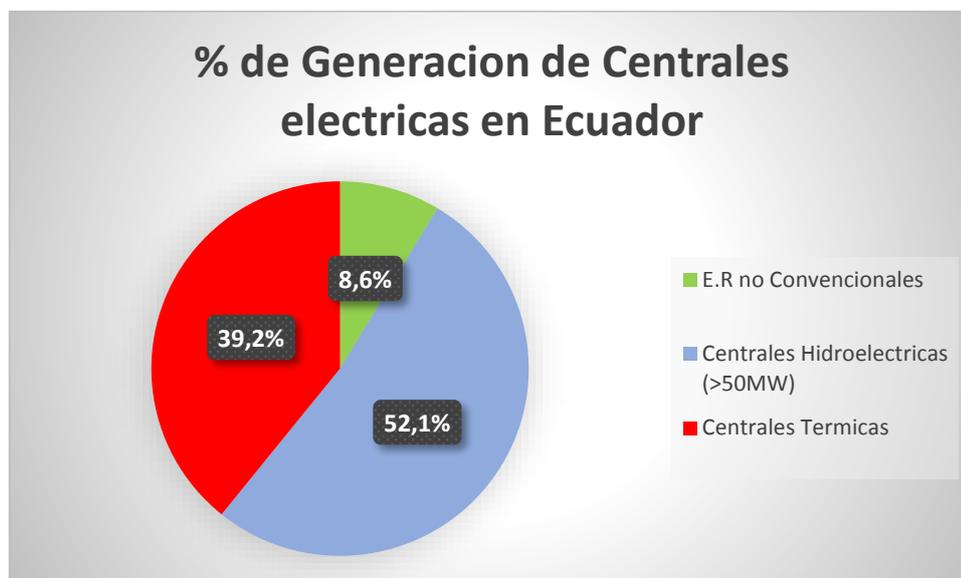
**Tabla 1. 1.** Resumen del estado actual de las energías renovables en Ecuador en el año 2018 [17] [21], [18].

	Eólica	Solar	Biomasa	Biogás	Hidroeléctricas (<50 MW)
<b>MW</b>	21.15	27.6	144.3	7.26	548.16
Porcentaje	2.83%	3.69%	19.28%	0.97%	73.24%

En el año 2018 se registró que las centrales hidroeléctricas (>50 MW) tienen una potencia instalada de 4518.24 MW, las centrales térmicas 3395.15 MW, y las centrales mediante ER cuentan con una potencia instalada de 748,47 MW. Esto ubica a la

energía renovable con el 8.64% respecto la generación de electricidad en el país, mientras que el 91.36% sigue siendo de energías no renovables [17], [21], [29], [18], [30].

En la Figura 1.1 se presenta un cuadro descriptivo del posicionamiento de las energías renovables en Ecuador respecto a las no renovables.



**Figura 1. 1** Porcentaje de generación en centrales eléctricas del Ecuador. *Elaboración propia*<sup>1</sup>.

## 1.2 BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO COMO FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los rellenos sanitarios se crearon en EE. UU alrededor del año 1910. Desde esa fecha hasta la actualidad, y gracias a la experiencia adquirida, se ha reducido la contaminación que producían los botaderos de basura. Posteriormente, este sistema sería usado por la mayoría de los países en vías de desarrollo, a tal punto que las ciudades utilizan este sistema como alternativa para la disposición de los RSU [31]. En Ecuador la implementación de RS es reciente. Se cuentan con RS, tanto en Guayaquil, Quito, Cuenca, Loja y Machala, entre otras ciudades. Se estima que

---

<sup>1</sup> Se incluye como E.R. no convencional a las centrales hidroeléctricas menores a 50 MW.

aproximadamente el 51% de las municipalidades disponen los RSU en estos espacios [32].

### 1.2.1 ¿QUÉ ES UN RELLENO SANITARIO?

Un relleno sanitario, de acuerdo con la Sociedad-Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), es una técnica para la disposición final de los RSU en un terreno, sin causar perjuicio para el medio ambiente, a más de evitar molestias y peligros para la salud, bienestar y seguridad pública [33].

“Este método, requiere la utilización de principios de ingeniería para confinar los residuos en la menor superficie posible, reduciendo su volumen al mínimo”. También se indica que: “Los residuos depositados deben ser cubiertos con una capa de suelo, a modo de cobertura intermedia, con la frecuencia adecuada según el caudal de ingreso de residuos, con el fin de evitar la proliferación de olores y el desarrollo de cualquier tipo de vectores” [33]. Es por eso por lo que un relleno sanitario para ser llamado como tal, debe cumplir los siguientes requisitos técnicos.

#### ➤ **Proveer un confinamiento para los desechos.**

Los confinamientos para los RSU se dan mediante la excavación en un área de terreno muy amplia de un determinado lugar previamente estudiado. La excavación debe seguir criterios técnicos, bajo condiciones controladas basadas en la zona geográfica del lugar, con el fin de minimizar o evitar efectos adversos en el ambiente. La profundidad del confinamiento de los RSU suele ser entre 3 a 5 metros (m) de altura, aunque en algunos casos se ha registrados 7 m, pero esto siempre va a depender de la localización de la zona freática [33], [34].

➤ **Capa base de impermeabilización o geomembrana**

El confinamiento de los RSU debe ser estanco hacia afuera (el líquido lixiviado no tiene la posibilidad de salir o emigrar al exterior). Esto se logra por métodos de impermeabilización en la capa inferior del confinamiento de los RSU, por lo general esta capa tiene que seguir criterios dispuestos por normas. La impermeabilización del relleno tiene dos funciones específicas: evitar que se contaminen las aguas freáticas y el de poder recoger los lixiviados. La recolección de lixiviados es posible debido a que en la capa de impermeabilización se encuentran un conjunto de sistemas de conducción y extracción [33], [35].

➤ **Extracción de lixiviados.**

La descomposición de los RSU genera grandes volúmenes de lixiviados, que se evacúan empleando un sistema de extracción. El sistema de extracción está dispuesto en la capa inferior del RS, se instalan ductos en la capa de impermeabilización que conducen los líquidos hacia la balsa o un lugar destinado. Este sistema se los realiza con el fin de que la cantidad acumulada no pueda emigrar al exterior y representar un peligro en el área de la instalación [36], [37].

➤ **Pozo de control.**

Estos pozos son ubicados estratégicamente en las zonas de mayor impacto del relleno sanitario y su principal función es el monitoreo de lixiviados. El monitoreo permite observar y controlar la migración del lixiviado a aguas subterráneas [38].

➤ **Cobertura de los RSU con capas de tierra.**

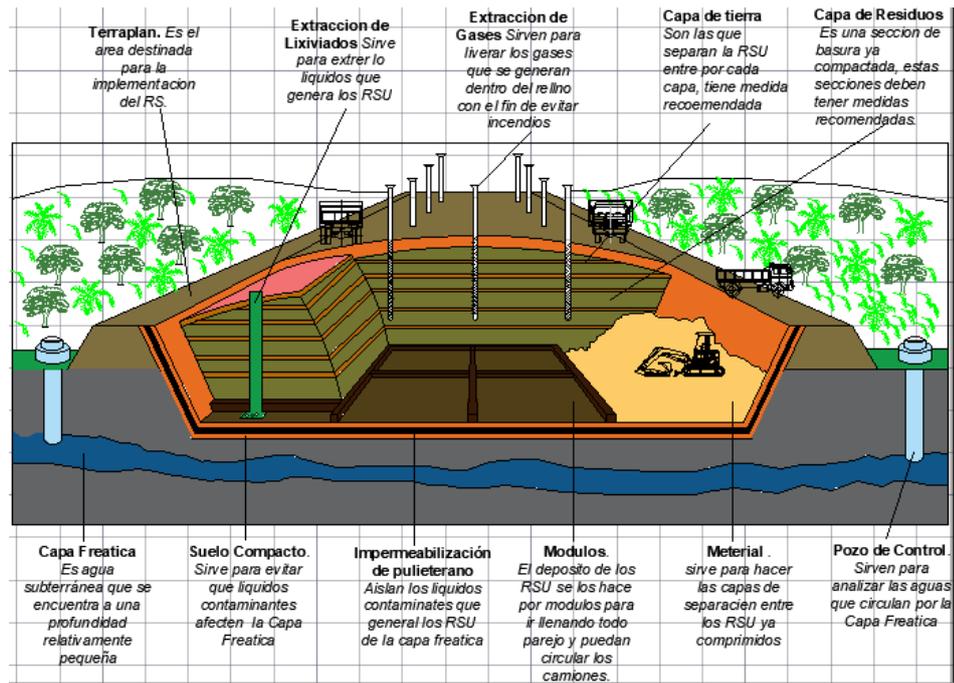
El fin de esta actividad es minimizar los olores producidos por los RSU, además de evitar la proliferación de moscas, aves y roedores. El recubrimiento diario de los RSU evita incendios dentro del confinamiento a más que permite el crecimiento de vegetación. El recubrimiento de esto se lo realiza diariamente con una capa de tierra entre 10 a 20 cm, que es la que se extrajo en la misma excavación del relleno [39], [33].

➤ **Sistema de chimenea.**

Generalmente estos sistemas se construyen de dos maneras, la primera es una jaula de malla con cuatro puntales de madera y la segunda es mediante un tubo perforado. La principal función de estos ductos es la liberación de gases que se producen dentro

del confinamiento de los RSU. Una de las funciones importantes que tiene es evitar que se produzcan incendios dentro de los RS y poner en riesgo la vida del personal. Es importante que estos gases sean quemados debido a que representan un peligro para el personal del relleno, como para el ambiente [33], [40].

En la Figura 1.2 se muestra una ilustración de un relleno sanitario en la que se puede observar la composición y elementos descritos anteriormente.



**Figura 1. 2 Ilustración de un relleno sanitario. Elaboración propia**

### 1.2.2 ¿QUÉ ES EL BIOGÁS DE UN RELLENO SANITARIO?

El biogás de un RS es una mezcla de gases que se producen como resultado de procesos químicos y físicos, que tienen lugar dentro del confinamiento de los RSU. El biogás se produce debido a la biodegradación de materia orgánica en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno). La composición del biogás va a depender principalmente del material digerido, y el funcionamiento del proceso dentro del confinamiento [41], [42], [43].

### 1.2.3 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

El componente principal del biogás es el metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El CH<sub>4</sub> se lo suele encontrar en porcentajes de 30 % a un 65 % y el CO<sub>2</sub> en un

20 % a un 40 %. En el biogás además se encuentran otros elementos químicos en menor porcentaje: nitrógeno (N), hidrógeno (H), oxígeno (O), argón (Ar), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), sulfato (S) y cloruro (CL) [43].

#### 1.2.4 VALOR CALORÍFICO DEL BIOGÁS

El valor calorífico es la cantidad de calor que se obtiene mediante la combustión completa de la unidad de volumen de un combustible. El biogás tiene la característica de ser inflamable cuando el contenido de metano es superior al 45%. El valor calorífico del biogás varía entre 18.8 y 23 Mj/m<sup>3</sup> para contenidos de metano de 50%. El poder calorífico del biogás va a aumentar o disminuir dependiendo del contenido de metano y del tratamiento que se le dé al biogás [44], [45]. A continuación, en la Tabla 1.2 se presenta una comparativa del biogás (promedio 50% de CH<sub>4</sub>) en relación con otros gases.

**Tabla 1.2** Comparativa entre diferentes gases con el biogás [44].

Tipos de Gas	Valor Calorífico	Temperatura de Ignición	Cont. de Oxígeno para la explosión
	kWh/m <sup>3</sup>	°C	Volumen-%
Biogás	6	700	6-12.2
Gas Natural	10	650	4.4-15
Propano	26	470	1.7-10.9
Metano	10	600	4.4-16.5
Hidrogeno	3	585	4-7.2

Para transformar el valor calorífico a unidades de kWh/m<sup>3</sup> se utiliza la siguiente equivalencia  $1\text{kJ} = 2.778 \cdot 10^{-4} \text{kWh}$ . Se observa en la Tabla 1.2 que el gas natural tiene mayor valor calorífico al del biogás, esto se debe a que en el gas natural el contenido de metano es superior al 70% [46].

#### 1.2.5 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

El proceso para que se produzca biogás depende de varios factores atmosféricos como las características del residuo, el origen y la edad del relleno sanitario [47]. En la Tabla 1.3 se muestran los factores que definen el potencial de producción de biogás dentro del confinamiento de los RSU.

**Tabla 1. 3 Factores que condicionan la obtención del biogás**

<p><b>Composición de residuos:</b> corresponde al tipo de desecho que llega al depósito, además define el potencial para la generación de biogás [48].</p> <p><b>Densidad de residuos:</b> afecta el transporte de nutrientes. Entre más pequeñas sean las partículas, mayor será la tasa de producción de biogás [49].</p>	<p><b>Temperatura:</b> este factor será siempre mayor a la temperatura del ambiente debido a las reacciones exotérmicas en su interior. Este factor condicionará la tasa de producción del biogás. A bajas temperaturas la tasa de producción disminuye, la temperatura óptima para la producción de biogás es de 30°C a 41°C [49].</p> <p><b>Humedad:</b> los bajos índices de humedad no permiten una buena descomposición de los RSU, y restringen la producción de biogás en el confinamiento. La humedad debe estar comprendida entre el 50% y 60% [49].</p> <p><b>ph:</b> la máxima producción de biogás se da cuando las condiciones de pH son neutras [49].</p>	<p><b>Cobertura del relleno:</b> evita el contacto de los desechos con el oxígeno. Además, reduce la entrada de agua hacia el confinamiento de los RSU [48].</p> <p><b>Condiciones atmosféricas:</b> se debe tener en cuenta las precipitaciones, debido a que son la mayor fuente de humedad de un RS. Las precipitaciones ayudan a la impermeabilización del relleno impidiendo el ingreso de aire por grietas [48].</p> <p><b>Edad de los residuos:</b> factor que se debe considerar pues el biogás es significativo durante 10 a 20 años [49].</p>
---	---	---

La producción de biogás sigue una secuencia de fases, las cuales permiten entender cómo se desarrolla cada proceso [41]. En la Tabla 1.4, se presenta las 5 fases por las que pasa la descomposición de los RSU para generar biogás.

**Tabla 1. 4 Fases de descomposición de los RSU**

<p><b>Fase I.-</b> Aeróbica (presencia de aire), inicia inmediatamente luego de la disposición de los RSU en el RS. Las sustancias fácilmente biodegradables se descomponen por la presencia de oxígeno propiciando la formación CO<sub>2</sub> y agua. Dentro del confinamiento del RS suele registrarse temperaturas de 35 a 40 °C [40], [43].</p>
<p><b>Fase II.-</b> Aeróbica, se produce la fermentación, actuando organismos para producir ácidos orgánicos y reduciendo significativamente el pH, liberando metales en el agua y generando CO<sub>2</sub>. Las fases I y II pueden tener una duración entre semanas a dos o tres años [43].</p>

**Fase III.-** Anaeróbica (sin presencia de aire), resultado de la acción de organismos formadores de metano ( $\text{CH}_4$ ), que, en condiciones adecuadas, propician la producción del gas mientras reducen la generación de  $\text{CO}_2$  [43].

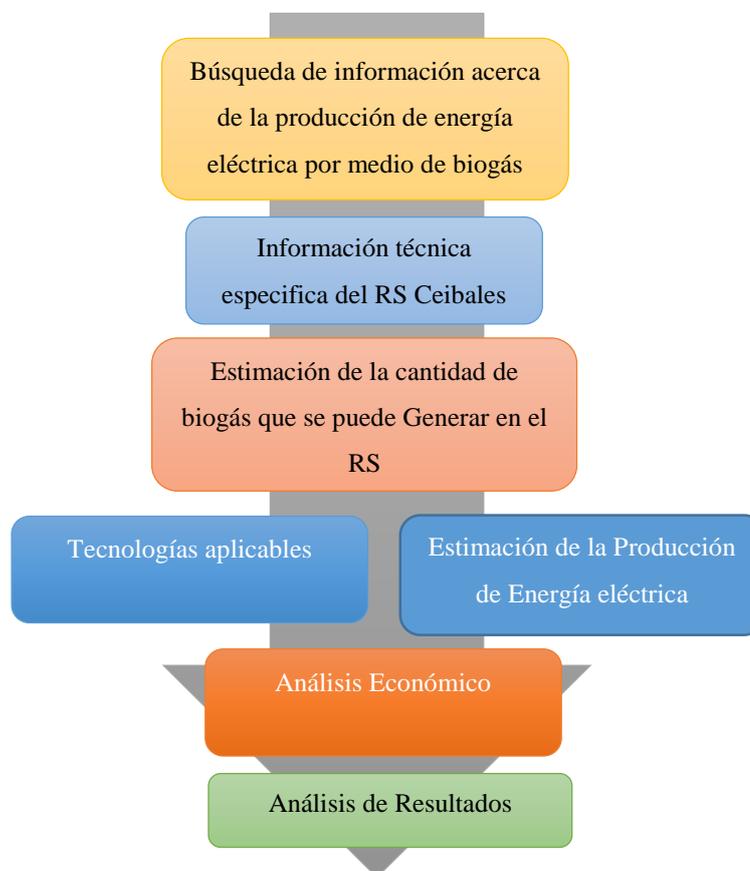
**Fase IV.-** Metano génica, estable que se registra la más alta producción de metano oscilando entre 40 – 60 %. Las Fases III y IV pueden durar hasta 5 años aproximadamente [11], [41].

**Fase V.-** Estabilización, la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) comienza a disminuir y la presencia de aire atmosférico introduce condiciones aeróbicas en el sistema. Esta fase tiene una duración que depende de las condiciones de operación del RS [41], [43].

## CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se abordará la metodología que se usó para el desarrollo del caso de estudio. Se explica cada una de las etapas desarrolladas para el cumplimiento de los objetivos planteados. En forma general estas etapas son: información acerca de la generación de electricidad a partir del biogás, obtención de datos del RS Ceibales, estimación de biogás, y cantidad de energía eléctrica que puede llegarse a producir.

En la Etapa 1 se investiga información acerca de modelos matemáticos, tecnologías y estimación de potencial energético. La Etapa 2 presenta información técnica específica del relleno sanitario ceibales, como; ubicación, datos climatológicos, cantidad de RSU que ingresan, y datos característicos del lugar. En la siguiente etapa se procede con la estimación de biogás a partir de los datos obtenidos del RS. La Etapa 4 estima la cantidad de energía eléctrica que puede llegar a producir el RS Ceibales. Por último, se presenta un análisis económico en el cual se evalúa la viabilidad del proyecto. En la Figura 2.1 se presenta un diagrama de bloques del sistema propuesto.



**Figura 2. 1** Diagrama de bloques del sistema propuesto

## 2.1 INFORMACIÓN ACERCA DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DEL BIOGÁS

Para estimar la producción de energía eléctrica a partir de biogás se requiere definir los parámetros que se involucran en el cálculo. Se analizan tres modelos matemáticos que permiten estimar el porcentaje de biogás que se genera en un RS, además de las tecnologías existentes que lo aprovechan. Para conocer el potencial que tiene un relleno para generar biogás, se han generado diversos modelos. Cada modelo matemático considera factores claves en la generación de biogás. Los modelos matemáticos predicen la curva de producción que tendrá el biogás en el RS [50], [51].

Se analizaron tres modelos que se considera pertinentes para el caso de estudio. Por una parte, el modelo LandGem fue desarrollado por la agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (US.EPA), y es comúnmente el más utilizado. Este modelo se basa en dos parámetros fundamentales,  $K$  (índice de generación de metano) y  $L_0$  (potencial de generación de metano). Estos valores son definidos por parámetros específicos del sitio como: temperatura, humedad, precipitaciones, características de los residuos, entre otros. El modelo LandGem provee mediante tablas los valores de  $K$  y  $L_0$ , además asume que ambos valores son constantes.

Junto con el modelo anterior se utilizó el “Modelo Ecuatoriano” el cual es adaptado para las condiciones climatológicas del país. Este modelo igual que el de LandGem fue desarrollado por US.EPA. El modelo ecuatoriano propone valores de  $K$  y  $L_0$  en base a estudios hechos con anterioridad en el país.

Por último, se analizó el modelo IPCC, el cual fue desarrollado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Se hace necesario el análisis de este modelo debido a que permite calcular los valores de  $K$  y  $L_0$ . Otra razón por la cual se analizó el modelo IPCC fue debido a que los valores de  $K$  y  $L_0$  que propone el modelo LandGem no coinciden con el sitio de estudio.

### 2.1.1 MODELO LANDGEM

El modelo LandGem es un interfaz de libre acceso y se lo encuentra en el website “United States Environmental Protection Agency (US.EPA)” (Fuente: <https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302.xls>). Esta herramienta está desarrollada en una hoja de Microsoft Excel y permite determinar la tasa de emisiones durante un periodo de tiempo. Puede valorar las emisiones de metano, dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y contaminantes de aire individuales de un relleno sanitario [52].

El modelo se basa en una ecuación de descomposición de primer orden y determina la masa de metano generado a partir de los RSU que se depositan en el relleno. Además, asume que la generación de biogás llega al máximo cuando se equilibran las condiciones anaeróbicas dentro del confinamiento de los RSU. Después la producción de biogás decae debido a la disminución de la fracción de residuos orgánicos [53], [54].

El modelo LandGem utiliza la Ecuación 1 para estimar la cantidad de biogás que se puede generar en el año de cálculo [52].

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 K \cdot L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) \cdot e^{-K \cdot t_{ij}} \quad (1)$$

Donde:

$Q$ : generación de biogás en el año del cálculo ( $m^3/año$ ).

$i$ : incremento de tiempo saltos de un año.

$n$ : (año del cálculo) – (año inicial de disposición de residuos)

$j$ : incremento de tiempo en 0.1 años

$K$ : índice de generación de metano ( $\frac{1}{año}$ )

$L_0$ : potencial de generación de metano ( $\frac{m^3}{Mg}$ )

$M_i$ : masa de residuos dispuestos en el año  $i^{th}$  (Mg)

$t_{ij}$ : edad de la sección  $j^{th}$  de la masa de residuos ( $M_i$ ) dispuestas en el año  $i^{th}$  (años decimales).

A continuación, se explican los parámetros que se requieren en el modelo LandGem. Esta parte se dividirá en 3 pasos, los cuales se considera importantes para el cálculo de las emisiones de biogás en los rellenos sanitarios (BGRS). La Figura 2.2 muestra los parámetros característicos de cada relleno.

Figura 2. 2 Paso 1 Características del RS estudiado.

En la Figura 2.3 se observa cuatro parámetros que definirán el potencial de generación de biogás. Para facilitar la comprensión de cada uno de estos valores, se los describe brevemente .

Figura 2. 3 Paso 2 Parámetros característicos para el cálculo de generación de biogás

➤ **K**: índice de generación de metano ( $\frac{1}{\text{año}}$ )

Describen el índice en el cual los RSU del relleno sanitario se degradan y producen metano ( $\text{CH}_4$ ). Está relacionado con el tiempo de vida de los residuos y la Ecuación 2. Esta ecuación indica que sí **K** incrementa, el valor de generación de metano también incrementa, siempre y cuando el relleno siga recibiendo residuos. Una vez que deje de recibir residuos con el tiempo se iría reduciendo la producción de metano [52], [55].

$$\text{periodo} = \frac{\ln(2)}{k}. \quad (2)$$

Para estimar los valores de  $K$ , el modelo LandGem crea una tabla de constantes. Dicha tabla relaciona el tipo de zona con el tipo de tratamiento que existe en el RS. Los cinco valores de  $K$  utilizados por LandGem Excel se muestran en la Tabla 2.1, dichos valores están definidos por protocolos de la US.EPA y CAA (Clean Air Act). Es decir, estos valores están definidos por normas y leyes que deben cumplir los rellenos sanitarios de EE. UU [53], [52].

Por ejemplo, si se quiere saber el valor de  $K$  de un relleno sanitario convencional que esté cumpliendo los protocolos de CAA, este valor estará dado por defecto de 0.05. Lo mismo sucederá si se toma un relleno de zona árida que este regido a los protocolos de la US.EPA, que por defecto será  $K = 0.02$

**Tabla 2. 1** Valores para el índice de generación de metano [52].

En base A	Tipo de RS	Valores de K
CAA	Convencional	0.05 (Por defecto)
CAA	Zona Árida	0.02
US. EPA	Convencional	0.04
US. EPA	Zona Árida	0.02
US. EPA	Húmedo	0.7

Cabe recalcar que los RS que se manejan en Ecuador no están regidos a las normas de EE. UU, por lo que es necesario calcular el valor de  $K$ . En el modelo de Excel en caso de no acercarse a ninguno de los valores propuestos, se va a pedir que ingrese un valor específico. El valor de  $K$  se calcula en base a la precipitación promedio anual y en base al tipo de degradación que tienen los residuos del RS. Sabiendo esto, se procede a encontrar los valores de  $K$ , que dependerán de los factores que se muestran en la Tabla 2.2. y 2.3.

**Tabla 2. 2** Factores que intervienen en el valor de  $k$

1. <b>Contenido de humedad en los residuos:</b> por lo general es difícil de estimar, por lo que se opta por tomar la precipitación promedio anual de la zona donde queda ubicado el RS [56].	2. <b>Disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano:</b> los nutrientes están definidos por el tipo de residuos que son depositados en el relleno [56].
3. <b>pH:</b> el pH no se toma en este modelo ya que es difícil saberlo dentro del relleno [56].	4. <b>Temperatura:</b> La temperatura en un relleno suele ser constante

	y tiende a ser independiente de la temperatura ambiente [56].
--	---

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para obtener el valor de **K**, se debe relacionar el clima y composición de los residuos. La composición de los residuos da el tipo de degradación que tienen los desechos, y se la clasifica de la siguiente manera [57][58].

- ✓ **Degradación rápida**, para residuos alimenticios, materia orgánica y un 20% de pañales.
- ✓ **Moderadamente rápida**, para residuos vegetales, poda de arbustos en casas o parques municipales y papel higiénico.
- ✓ **Moderadamente lenta**, para papel, cartón y textiles.
- ✓ **Muy lenta**, para madera, caucho, piel, hueso y paja.

Teniendo el tipo de degradación, se la relaciona con el tipo de clima que existe en la zona donde se encuentre el RS. Es decir, si se cuenta con la precipitación del lugar y las características de los desechos del RS, se puede relacionar los valores de la Tabla 2.3 para obtener un valor de degradación. Posteriormente se realiza un promedio y se obtiene el valor de **K**, tal como lo indica la Ecuación 3 [57].

$$K = \frac{\sum \text{Valores del tipo de degradacion}}{N} \quad (3)$$

Donde:

**K**= índice de generación de metano.

**N**: número de valores que se tomen.

Por ejemplo, si el RS se encuentra en un lugar con precipitaciones entre 1500 y 1999 mm/año se lo relacionara con un clima húmedo. El tipo de residuos que recibe el RS se los clasifica con una degradación tipo rápida y moderadamente rápida. Entonces

$$\text{el valor de } K = \frac{0.34+0.15}{2} = 0.245$$

**Tabla 2. 3** Valores para el índice de generación de metano [59].

Tipo de Clima	Precipitación mm/año	Tipo de Degradación			
		Rápida	Moderadamente Rápida	Moderadamente Lenta	Muy Lenta
Seco	500	0.1	0.05	0.02	0.01
Moderadamente Seco	500-999	0.18	0.09	0.036	0.018
Moderadamente Húmedo	1000-1499	0.26	0.12	0.048	0.024
Húmedo	1500-1999	0.34	0.15	0.06	0.03
Excesivamente Húmedo	>2000	0.4	0.17	0.07	0.035

➤  $L_0$ : potencial de generación de metano ( $\frac{m^3}{Mg}$ )

El potencial de generación de metano describe la cantidad total de gas que produce una tonelada de RSU. El potencial con el que se genera  $L_0$  depende del tipo y composición de los residuos depositados en el RS. Cuanto mayor sea el contenido de celulosa de los residuos, mayor será el valor de  $L_0$  [52].

Al igual que en el caso del valor de  $K$  (índice de generación de metano) en la Tabla 2.1, los valores de  $L_0$  ya están definidos por protocolos de US.EPA y CAA. Es decir estos valores también estarán definidos por normas y leyes que deben cumplir los rellenos sanitarios de EE. UU [52], [58]. Como se observó en el caso de los datos de la Tabla 2.1, los valores de la Tabla 2.4 estarán por defecto, y dependen del tipo de tratamiento y zona donde este ubicado el RS.

**Tabla 2. 4** Valores para el índice de generación de metano [52].

En base A	Tipo de RS	Valores de Lo
CAA	Convencional	170 (Por defecto)
CAA	Zona Árida	170
USEPA	Convencional	100
USEPA	Zona Árida	100

Igual como se mencionó con anterioridad, los reglamentos para rellenos sanitarios de EE. UU. no se aplican en el país. Debido a esto es necesario calcular los valores para  $L_0$  en base a las características donde se encuentra el RS. Según el IPCC,  $L_0$  se puede estimar a partir de la Ecuación 4 [58].

$$L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (4)$$

Donde:

$L_0$ : potencial de generación de metano [ $m^3/T$ ].

$MCF$ : factor de corrección de metano.

$DOC$ : carbono orgánico degradable.

$DOC_F$ : fracción de carbono orgánico biodegradable.

$F$ : fracción de metano contenido en biogás, su asume típicamente 0,5.

El factor  $\frac{16}{12}$  corresponde a una constante estequiométrica (cociente de pesos moleculares entre el  $CH_4/C$ )

A continuación, se procede con la explicación de cómo obtener cada uno de estos valores.

**$MCF$**  (*factor de corrección de metano*): depende del tipo de relleno y del tipo de manejo que se le dé, los valores a los cuales se los aproxima se observan en la Tabla 2.5.

**Tabla 2. 5** Estimación de valor para factor de corrección de metano [48].

Tipo de Relleno	Valores por defecto del factor de corrección de metano (MCF)
Gestionado Anaeróbico <sup>1</sup>	1
Gestionado – semi-aeróbico <sup>2</sup>	0.5
No gestionado– profundo <sup>3</sup> (>5 m desechos) y/o capa freática elevada.	0.8
No gestionado– poco profundo <sup>4</sup> (<5m de desechos)	0.4
Rellenos Sanitarios no categorizados <sup>5</sup>	0.6

<sup>1</sup>*Gestionado Anaeróbico*, está definido como un sitio que cuenta con la colocación controlada de los residuos, debe cumplir con requisitos técnicos de un RS

<sup>2</sup>*Gestionado Semi-Aeróbico* debe cumplir con material de la cubierta permeable; (ii) sistema de drenaje para la lixiviación; (iii) estanques de regulación y (iv) sistema de ventilación de gases

<sup>3</sup>*No gestionado Profundo(>5m)* Son aquellos que no cumplen con los criterios técnicos que debe tener un relleno sanitario. La última situación corresponde al llenado con desechos de un terreno con aguas fluviales cercanas, como un estanque o río

<sup>4</sup>*No gestionado Poco Profundo(<5m)* Son aquellos que no cumplen con los criterios técnicos que debe cumplir un relleno sanitario, con distancias menores a 5 metros

<sup>5</sup>*Rellenos Sanitarios no categorizados*. Sólo si los países no pueden categorizar sus RS dentro de las cuatro categorías anteriores pueden emplear el MCF para esta categoría

**DOC** (*carbono orgánico degradable*): depende de la composición de los residuos orgánicos. Esta dada por la Ecuación 5

$$DOC = 0.4 \cdot A + 0.17 \cdot B + 0.15 \cdot C + 0.3 \cdot D \quad (5)$$

Donde:

A: porcentaje de residuos que corresponden a papel, cartón y textiles.

B: porcentaje de residuos que corresponde a desechos de jardín u orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos).

C: porcentaje de residuos que corresponden a desechos de alimentos.

D: porcentaje de residuos que corresponden a madera y paja.

**DOC<sub>f</sub>** (*fracción de carbono orgánico biodegradable*): es el factor de proporción de carbono disponible convertida en biogás. Disponible en la Ecuación 6.

$$DOC_f = 0.014 \cdot T + 0.28 \quad (6)$$

Donde:

T: temperatura del RS (°C)

➤ **NMOC**: concentración de compuesto orgánico no metánico (ppmv)

La concentración de NMOC se mide en partes por millón de volumen (ppmv), y se utiliza en el LandGem cuando se quiere estimar las emisiones de NMOC. Igual que para los valores de **K** y **L<sub>0</sub>** estos valores vienen definidos por defecto según los reglamentos de la CAA y US.EPA. En el caso de estudio no es necesario definir este parámetro, ya que para cálculos posteriores no se necesita este valor [52].

➤ **CH<sub>4</sub>**: contenido de metano (%).

Indica la cantidad de metano que está disponible en el biogás. Como se mencionó en la sección 1.2.3 del Capítulo 1, el metano suele estar distribuido en un relleno en un porcentaje de 30 % a un 65 %. Por lo general la mayoría de veces se asume que un relleno sanitario tiene un contenido de metano de 50% [60]. En el caso del modelo LandGem se puede elegir por defecto 50% de contenido de metano, o se utiliza un valor medido.

Como tercero y último paso en la Figura 2.4 se muestra una tabla donde se ingresa datos de la cantidad de residuos recibida en el relleno por cada año. Cabe recalcar que el índice de años se irá modificando según sea el año de apertura y clausura del RS.

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units:

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

Figura 2. 4 Paso 3. Ingreso de cantidad de RSU del relleno sanitario.

Es de anotar que no todas las tablas del modelo LandGem son útiles para el propósito de este estudio, por lo que no son consideradas debido a que hay parámetros que no son necesarios para determinar la cantidad de biogás.

### 2.1.2 MODELO IPCC

En un esfuerzo por cuantificar las emisiones de metano de los rellenos sanitarios de todo el mundo, la IPCC desarrolló un modelo de residuos. El objetivo del modelo es permitir que los países realicen inventarios nacionales. El modelo es capaz de predecir la generación de biogás en RS individuales, ya que solo requiere datos de las características de los RSU y pesos anuales [48], [61].

Para estimar las emisiones de biogás el modelo IPCC se basa en la Ecuación 7 [61].

$$Q = \sum DDOCmi * [e^{-Kt}] \quad (7)$$

Donde:

$Q$ : generación de biogás en el año del cálculo ( $m^3/año$ ).

$K$ : índice de generación de metano ( $\frac{1}{año}$ ).

$t$ : tiempo en años.

$DDOCmi$ : masa de carbono orgánico degradable.

A continuación, se procede con la explicación de cómo obtener cada uno de estos valores.

$K$  (*índice de generación de metano*): se calcula de la misma manera que se calculó en el modelo LandGem.

$t$  (*tiempo en años*): Es importante considerar desde el segundo año

$DDOCmi$ : es la masa de carbono orgánico degradable del componente de los residuos, se describirá a continuación en la Ecuación 8.

$$DDOCmi = \sum (Mi * DOCi) * DOC_F * MCF * \frac{16}{12} * F \quad (8)$$

Donde:

$M_i$  : fracción de los residuos depositados (La cantidad de residuos que existe en el RS por año).

$DOC_i$ : carbono orgánico degradable durante el año de deposición. (Este valor se lo obtiene a partir de la Ecuación 5).

$DOC_F$ : fracción de carbono orgánico biodegradable, que esta fácilmente disponible para la degradación de carbono. (Por general la IPCC recomienda colocar un porcentaje de 77%, pero también se lo puede obtener en base a la Ecuación 6)

$MSF$ : factor de Corrección de metano. (Este valor se lo estima en dependencia del tipo de relleno con el que se cuente, los valores estimados se los puede tomar de la Tabla 2.5)

$\frac{16}{12}$ : Constante estequiométrica (cociente del peso molecular entre el  $CH_4/C_{11}$ .)

$F$ : fracción de metano en el relleno sanitario (igual que el modelo LandGem se recomienda un 50% de contenido de metano)

Cabe recalcar que el valor que se obtiene es en toneladas de  $CH_4$ . Para convertir de  $T CH_4$  a  $m^3 CH_4$  por año, se usa una conversión de unidad con densidad de metano estándar, como se muestra en la Ecuación 9 [61].

$$Q = 1T_{CH_4} * \frac{1000Kg}{1T} * \frac{m^3CH_4}{0.714Kg} \quad (9)$$

### 2.1.3 MODELO ECUATORIANO

El modelo (Ecuador LFG model) es una extensión del modelo mexicano, fue desarrollado por SCS Engineers bajo contratación de la US.EPA en el año 2003. A la extensión del modelo mexicano se lo recalibró en base a la experiencia de dos estudios de generación de biogás que fueron realizados en el país. Los estudios se hicieron en los rellenos: Iguanas (Guayaquil) y Pichacay (Cuenca) en marzo y abril 2007. Además, ayudó informes de evaluación que se hicieron en tres RS, Chabay (Azogues), El Valle (Cuenca) y Loja [62].

Para estimar la cantidad de biogás generado el modelo ecuatoriano usa la Ecuación 10.

$$Q = \sum_0^n \frac{1}{\%Vol} K \cdot M \cdot L_0 * e^{-K(t-t_{lag})} \quad (10)$$

Donde:

$Q$ : cantidad total de biogás generado ( $m^3/año$ ).

$n$ : número total de años modelado

$\%Vol$ : porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno

$K$ : índice de generación de metano ( $\frac{1}{año}$ )

$M$ : masa de residuos dispuestos en el año (Mg)

$L_0$ : potencial de generación de metano ( $\frac{m^3}{Mg}$ )

$t$ : tiempo en años, desde el inicio de la disposición de desechos.

$t_{lag}$ : tiempo estimado entre el depósito del desecho y la generación de metano.

El modelo ecuatoriano al igual que el modelo LandGem utiliza una herramienta de estimación automatizada con una interfaz de Microsoft Excel. Es un programa de libre acceso y se lo puede encontrar en la web, con el nombre de “Modelo de Biogás V1.1 Ecuador” (Fuente: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiApIrZr\\_zjAhXyqFkKHYZ6AykQFjAAegQIARAC&url=https://staging.globalmethane.org/documents/models/xls/ModelodeBiogasdeEcuador\\_V1.xls&usg=AOvVaw39cyB2AIgOvfVsQIfgpdQB](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiApIrZr_zjAhXyqFkKHYZ6AykQFjAAegQIARAC&url=https://staging.globalmethane.org/documents/models/xls/ModelodeBiogasdeEcuador_V1.xls&usg=AOvVaw39cyB2AIgOvfVsQIfgpdQB)). En la Figura 2.5 se presenta una ilustración de cómo está distribuido el Excel del modelo ecuatoriano.

MODELO DE BIOGÁS DE ECUADOR (V1.1)		INSTRUCCIONES:																																																	
<b>PARÁMETROS:</b>		Las celdas con el texto verde son las celdas de entrada. Las instrucciones en azul describen los requerimientos mínimos de entrada.																																																	
<b>PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN</b>																																																			
<b>NOMBRE DEL RELLENO SANITARIO, CIUDAD Y ESTADO</b>																																																			
<b>FECHA DE INICIO</b>																																																			
Año de Inicio de Operaciones	*	Ingresar el año en que el relleno sanitario empezó y dejó de recibir residuos.																																																	
Año de Término de Operaciones	*	Ingresar las toneladas disponibles por año en la Columna D.																																																	
Precipitación Promedio Anual	* mm/año	Seleccione la precipitación promedio anual de la estación meteorológica más cercana al relleno sanitario. Consultar el Site Web <a href="http://www.worldclimate.com">www.worldclimate.com</a> .																																																	
<b>Contenido de Metano en el Biogás:</b>		Deje el valor del contenido de metano en 50%, a menos que se requiera cambiar el valor. El Modelo usará una concentración de metano de 50%. Si el valor introducido es menor a 50%, el flujo de biogás proyectado disminuirá, si el valor es mayor a 50%, el flujo de biogás proyectado disminuirá.																																																	
Índice de Generación de Metano (IG)	* m <sup>3</sup> /kg	El valor se calcula automáticamente en base a la precipitación promedio anual.																																																	
Generación Potencial de Metano (G <sub>p</sub> )	* m <sup>3</sup> /tonelada métrica	El valor L <sub>0</sub> será calculado y redondeado al valor entero más cercano (m <sup>3</sup> /tonelada métrica) basado en la precipitación promedio anual.																																																	
Leveamente en unidades Inglesas	0 / 100%																																																		
<b>Eficiencia del Sistema de Recolección:</b> Ingresar los valores conocidos y/o los valores proyectados para cada año en la Columna D.																																																			
La eficiencia deberá basarse en una evaluación independiente del sistema de recuperación.																																																			
<b>Datos de Recuperación de Biogás:</b> Ingresar en la Columna F el flujo de biogás promedio anual con metano a 50%. <b>DEJAR EN BLANCO SI EL VALOR ES CERO.</b>																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">TABLA 1 - TABLA DE CALCULO DE VALORES K Y L<sub>0</sub></th> </tr> <tr> <th>Precipitación (mm/año)</th> <th>k</th> <th>k</th> <th>L<sub>0</sub></th> <th>L<sub>0</sub></th> <th></th> </tr> <tr> <td></td> <td>Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =&lt;50%</td> <td>Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios =&gt;60%</td> <td>(m<sup>3</sup>/ tonelada métrica) Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =&lt;50%</td> <td>(m<sup>3</sup>/ tonelada métrica) Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios =&gt;60%</td> <td></td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-249</td> <td>0,04</td> <td>0,043</td> <td>60</td> <td>62</td> <td></td> </tr> <tr> <td>250-499</td> <td>0,05</td> <td>0,053</td> <td>80</td> <td>83</td> <td></td> </tr> <tr> <td>500-999</td> <td>0,065</td> <td>0,69</td> <td>84</td> <td>87</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1000 - 1999 o Saturado</td> <td>0,08</td> <td>0,085</td> <td>84</td> <td>87</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2000+ o Saturado</td> <td>0,08</td> <td>0,085</td> <td>84</td> <td>87</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				TABLA 1 - TABLA DE CALCULO DE VALORES K Y L <sub>0</sub>						Precipitación (mm/año)	k	k	L <sub>0</sub>	L <sub>0</sub>			Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =<50%	Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios =>60%	(m <sup>3</sup> / tonelada métrica) Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =<50%	(m <sup>3</sup> / tonelada métrica) Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios =>60%		0-249	0,04	0,043	60	62		250-499	0,05	0,053	80	83		500-999	0,065	0,69	84	87		1000 - 1999 o Saturado	0,08	0,085	84	87		2000+ o Saturado	0,08	0,085	84	87	
TABLA 1 - TABLA DE CALCULO DE VALORES K Y L <sub>0</sub>																																																			
Precipitación (mm/año)	k	k	L <sub>0</sub>	L <sub>0</sub>																																															
	Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =<50%	Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios =>60%	(m <sup>3</sup> / tonelada métrica) Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =<50%	(m <sup>3</sup> / tonelada métrica) Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios =>60%																																															
0-249	0,04	0,043	60	62																																															
250-499	0,05	0,053	80	83																																															
500-999	0,065	0,69	84	87																																															
1000 - 1999 o Saturado	0,08	0,085	84	87																																															
2000+ o Saturado	0,08	0,085	84	87																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">TABLA 1 - TABLA DE ENTRADA DEL MODELO Eficiencia del Sistema de Recolección</th> </tr> <tr> <th>Sistema de Recolección</th> <th>Arcilla Saturada / Geomembrana</th> <th>Arcilla No-Saturada</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				TABLA 1 - TABLA DE ENTRADA DEL MODELO Eficiencia del Sistema de Recolección			Sistema de Recolección	Arcilla Saturada / Geomembrana	Arcilla No-Saturada																																										
TABLA 1 - TABLA DE ENTRADA DEL MODELO Eficiencia del Sistema de Recolección																																																			
Sistema de Recolección	Arcilla Saturada / Geomembrana	Arcilla No-Saturada																																																	

Figura 2. 5 Modelo ecuatoriano para estimación de biogás

A diferencia del modelo LandGem en el que era necesario calcular valores de  $K$  y  $L_0$  en base a la región perteneciente, en el modelo ecuatoriano ya vienen dados por defecto. Los valores  $K$  y  $L_0$  utilizados por el modelo ecuatoriano se relacionan en base a la precipitación promedio y al tipo de residuos que recibe el RS. En la Figura 2.6 se muestra los valores que asume el modelo ecuatoriano para  $K$  y  $L_0$  en base a la precipitación promedio anual.

TABLA 1 - TABLA DE CALCULO DE VALORES K Y L <sub>0</sub>				
Precipitación (mm/año)	k	k	L <sub>0</sub>	L <sub>0</sub>
	Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =<50%	Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios =>60%	(m <sup>3</sup> / tonelada métrica) Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =<50%	(m <sup>3</sup> / tonelada métrica) Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios =>60%
0-249	0,04	0,043	60	62
250-499	0,05	0,053	80	83
500-999	0,065	0,69	84	87
1000 - 1999 o Saturado	0,08	0,085	84	87
2000+ o Saturado	0,08	0,085	84	87

Figura 2. 6 Valores de  $K$  y  $L_0$  según el modelo ecuatoriano

En la Figura 2.7 se muestra los valores que usa el modelo para estimar la eficiencia del sistema de recolección de biogás según el tipo de recubrimiento que se le dé. Estos valores sirven para determinar la cantidad de biogás que va a estar disponible en el relleno sanitario, debido a que no se puede aprovechar el 100% del biogás que se genera.

TABLA 1 - TABLA DE ENTRADA DEL MODELO <i>Eficiencia del Sistema de Recolección</i>		
Sistema de Recolección	Arcilla Saturada / Geomembrana	Arcilla No-Saturada
Pozos Verticales de Gas Perforados o Colectores Horizontales	80%	70%
Pozos de Venteo Pasivos Convertidos/Modificados (existentes)	60%	40%

**Figura 2. 7** Valor de eficiencia de captura según el modelo ecuatoriano

#### **2.1.4 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS.**

Dado el potencial energético del BGRS, este puede ser utilizado en aplicaciones de cocción, calentamiento o generación eléctrica. La generación de electricidad a partir del BGRS depende de aspectos técnicos, como económicos. El aspecto económico incluye el costo de implementación, y el retorno de la inversión. En los aspectos técnicos se analiza la demanda a ser suplida, los tipos de elementos generadores que se pueden usar, y el tratamiento que se le da al BGRS [8], [63].

#### **PROCESO PARA EXTRACCIÓN Y TRATAMIENTO DEL BIOGÁS ANTES DE INGRESAR AL ELEMENTO GENERADOR.**

Para que el biogás ingrese al elemento generador es preciso que antes pase por procesos, como extracción y tratamiento. Se debe implementar un tratamiento al biogás debido a que el BGRS contiene impurezas que pueden dañar al elemento generador. En consecuencia, se trata el biogás dependiendo de la maquinaria que se vaya a usar para su aprovechamiento. A continuación, se presentan los procesos por los que pasa el biogás antes de ingresar al elemento generador [64].

##### *Extracción de biogás*

Los sistemas de extracción pueden ser activos o pasivos.

*Los sistemas pasivos* se emplean con mayor frecuencia debido al bajo costo de implementación. Se encargan de drenar el biogás del interior del relleno sanitario mediante la implementación de chimeneas que otorgan un paso por lo general de pobre

extracción. Estos sistemas no suelen ser muy efectivos en el aprovechamiento energético [65].

*Los sistemas activos.* emplean equipos de extracción para controlar el movimiento del biogás, estos generan una diferencia de presión para evacuar el biogás del interior del relleno sanitario. Para efectos de aprovechamiento energético, se deben considerar sistemas activos [65].

*Captura y tratamiento del biogás.*

La captura del biogás se hace con el fin de limpiar las impurezas del confinamiento de los RSU en el RS. El tratamiento está compuesto por la sección de filtración, reducción de gases no combustibles (como dióxido de carbono) y la sección de compresión en el caso de ser almacenado. El tratamiento se lo realiza principalmente para aumentar el poder calorífico y cumplir requisitos de algunas aplicaciones (motores, calderas, combustibles, entre otros.) [47], [64]. A continuación, en la Tabla 2.6 se detallan los tipos de tratamientos del biogás.

**Tabla 2. 6** *Tipos de tratamiento que tiene el biogás*

<i>Tratamiento para obtener bajo nivel de energía.</i>	<i>Tratamiento para obtener medio grado de energía</i>	<i>Tratamiento para obtener alto nivel de energía</i>
Son tratamientos primarios y permiten la remoción de condensado, disminución de la humedad y filtración de partículas [49].	Son tratamientos secundarios que incluyen la compresión, refrigeración para deshidratar el biogás; y tratamientos químicos para remoción de componentes como sulfuros, siloxanos además de compuestos orgánicos volátiles [49].	Son los más costosos y consisten en la separación del dióxido de carbono y otros gases del gas metano. Este tipo de tratamientos son requeridos en maquinaria especial, y se necesita altos grados de purificación [49].

## **ELEMENTOS GENERADORES DE ENERGÍA A PARTIR DE BGRS**

Una vez el biogás ha recibido el correcto tratamiento, puede ser usado como combustible para el elemento generador de energía. Es importante conocer cuál será la cantidad de biogás que puede producir de forma confiable el RS, debido a que este nos advierte del tipo de elemento generador que se puede utilizar. Esta cantidad de biogás sirve con el fin de garantizar el funcionamiento correcto de la planta en todo momento, incluso si se tiene bajo flujo de biogás [64].

El caso de estudio analiza que elemento generador conviene usar. Actualmente se manejan 4 tecnologías para generar energía a partir de biogás: i) turbinas, ii) microturbinas, iii) motores a combustión interna y iv) celdas de hidrógeno, pero comúnmente las más utilizadas en proyectos son las 3 primeras. La elección de estos elementos también dependerá del flujo de BGRS que se tendrá en el RS [66]. A continuación, se presenta las características de las tecnologías que frecuentemente se usan para la generación de energía eléctrica a partir del biogás.

### *Motor a combustión interna (MCI)*

Los MCI que operan con BGRS son los que se usan con mayor frecuencia en la generación de energía eléctrica. Esto se da debido al bajo costo por kW en comparación con las turbinas de gas y microturbinas. Además, están disponibles en varios tamaños para diferentes flujos que se genera en RS. La eficiencia de estos motores está comprendida entre el 32 y 45% [67].

Para usar MCI con biogás se debe tener flujos de entre 8 y 30 m<sup>3</sup>/min de BGRS y se puede lograr capacidades de 800 kW a 3 MW. Una de las desventajas que tiene este tipo de elementos son los costos de mantenimiento que son relativamente altos y emisiones a la atmósfera elevadas [68].

### *Turbinas de biogás*

Las turbinas de biogás se utilizan para proyectos grandes, donde suele existir un flujo de biogás elevado capaz de generar como mínimo 3 MW y como típico más de 5 MW. La cantidad de biogás que se genera debe tener flujos superiores a 40 m<sup>3</sup>/min. La eficiencia de estos equipos ronda entre 26 y 32% y a escala completa se puede alcanzar el 40%.

Las ventajas de usar turbinas de biogás es que estas presentan mayor resistencia a la corrosión y su impacto ambiental es menor. El impacto se ve disminuido debido a que las emisiones de óxido de nitrógeno son menores en comparación con los MCI, además sus costos de mantenimiento no son elevados [68], [69].

Una de las desventajas de las turbinas de biogás son sus costes iniciales elevados, pero este coste se reduce cuando se aplica en proyectos de gran escala. Con proyectos grandes la tasa de retorno se vuelve más corta incentivando a invertir en esta tecnología. Otra de las desventajas de las turbinas de biogás es que requieren un alto grado de eliminación de impurezas del BGRS [69].

#### *Microturbinas de biogás*

Cuando el contenido de metano es menor a 40% ya no se puede usar MCI y se hace necesario buscar alternativas tecnológicas que hagan viable el proceso de aprovechamiento energético del biogás. Las microturbinas son una posible solución debido a que necesitan flujos menores a 8 m<sup>3</sup>/min y contenidos de metano bajos hasta de 35%. Las microturbinas son equipos similares a las turbinas y su potencia comprendida está entre los 30 y 200 kW con una eficiencia entre el 25 y 30% [68], [70].

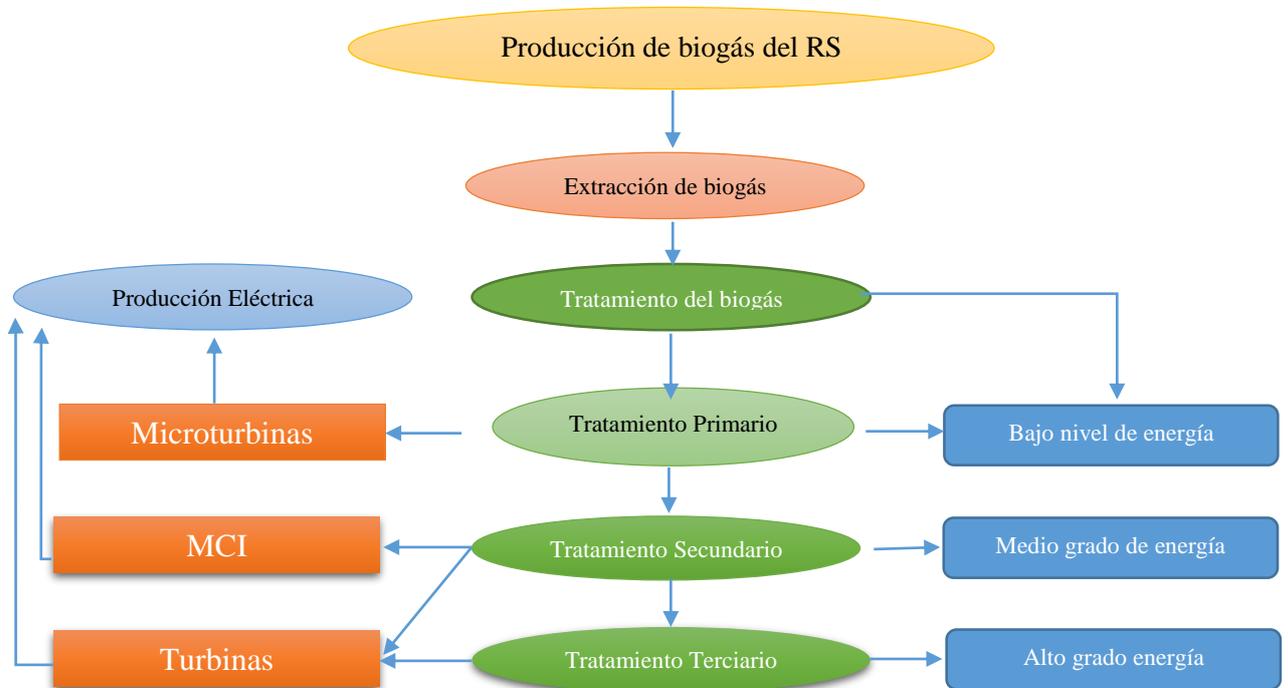
Una de las ventajas es el bajo costo de mantenimiento, así como sus instalaciones, además de una eficiencia que aumenta con el tamaño. Las microturbinas tienen las características que pueden ser conectadas en serie, tantos equipos como sean requeridos. Las microturbinas no requieren un tratamiento alto de biogás, debido a que estas presentan una tolerancia muy elevada a la presencia de ácido sulfhídrico presente en el biogás [68], [70].

En la Tabla 2.7 se muestra las diferencias entre las tecnologías que aprovechan el biogás como fuente de energía para la generación de electricidad.

**Tabla 2. 7** Información típica de tecnología que aprovecha el BGRS

Tecnología	Rangos de flujo Necesarios	Potencia de elemento generador	Eficiencia eléctrica neta	Costes	Referencias
				USD/kW	
MCI	8-30 m <sup>3</sup> /min	800KW-3MW	32-45%	1150-1700	[68], [66], [71]
Turbinas	>40m <sup>3</sup> /min	>3MW	25-40%	1400	[68], [66], [71]
Microturbinas	<8m <sup>3</sup> /min	30KW-200KW	26-32%	5500	[68], [66], [71]

Resumiendo lo anterior mencionado, en la Figura 2.8 se muestra un mapa conceptual donde se expone el proceso que pasa el biogás antes de ser transformado en energía eléctrica. Además, se muestra la tecnología que se usa en dependencia del tratamiento que recibe el biogás.



**Figura 2. 8** Tratamiento de biogás según el equipo que se desee implementar [49].

#### ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

A continuación, se presenta las ecuaciones que se usan para determinar el potencial en generación de energía de sistemas que operan con biogás.

##### *Energía disponible por generar mediante biogás*

Para determinar la energía eléctrica que podría estar disponible por medio del biogás se presenta la Ecuación 10. Esta ecuación está relacionada con la conversión del biogás a energía útil en forma de electricidad y calor [71].

$$E. disp = \frac{PCI_{biogas} \cdot Q_{b,r} \cdot \delta}{\gamma_1} [kW h/año] \quad (10)$$

Donde:

$E_{disp}$ : energía eléctrica disponible

$PCI_{biogas}$ : poder calorífico inferior del biogás.

$Q_{b,r}$ : caudal del biogás recuperable ( $m^3/año$ )

$\delta$ : eficiencia eléctrica del elemento generador, para transformar la energía térmica a energía eléctrica (MCI, turbina o microturbina).

$\gamma_1$ : factor de conversión de MJ a kW h (1 MJ/0.28 kW h)

Brevemente se explica cómo obtener cada uno de los parámetros mencionados en la Ecuación 10.

El poder calorífico inferior del biogás estará definido por la Ecuación 11.

$$PCI_{biogas} = \%C_{H4} \cdot PCI_{metano} \quad (11)$$

Donde:

$\%C_{H4}$ : concentración de metano [suponiendo generación de 40, 50, 60%]

$PCI_{metano}$ : poder calorífico inferior del metano (se encuentra en Tabla 2.9)

**Tabla 2. 8 Poder calorífico del metano**

Substancia	Poder Calorífico Inferior [MJ/m <sup>3</sup> ]	Poder Calorífico superior [MJ/m <sup>3</sup> ]
Metano	35.8	39.8

Una de las estimaciones que se suele hacerse en el caso de BGRS, es asumir que el  $PCI_{biogas}$  va a depender del tratamiento que se le dé al biogás, el poder calorífico en el peor de los casos da un valor de  $5 kWh/m^3$  y en el mejor de los casos entre 8 y  $10 kWh/m^3$  [68].

Por último, el caudal de biogás recuperado se verá implicado por la Ecuación 12.

$$Q_{b,r} = \gamma \cdot Q_{biogas} [m^3/año] \quad (12)$$

Donde:

$\gamma$ : eficiencia de recuperación de biogás

$Q_{biogas}$ : caudal de biogás generado en el RS. (estimación mediante modelos matemáticos o mediante mediciones)

*Eficiencia de recuperación de biogás.* Es la capacidad que tiene un sistema para capturar el biogás que se produce. La captura del biogás depende principalmente de factores como: condiciones del RS, diseño del sistema de captura además de su operación y mantenimiento. A pesar de que se puede cuantificar la producción de biogás es complicado saber cuál será la eficiencia de captura real que puede existir. Para rellenos sanitarios que cumplen valores técnicos establecidos se reportan valores de eficiencias de recuperación entre 50% y el 95%. Otro análisis que suele hacerse para estimar la eficiencia de recuperación de biogás, es asumir 3 posibles casos: bajo, medio, y alto [68][58][72]. En la Tabla 2.9 se presenta las estimaciones que suele hacerse en base a los tres posibles casos.

**Tabla 2. 9** Estimación de eficiencia según cada escenario [68][58][72].

Eficiencia de Recuperación	Estimación del % de eficiencia
<b>Baja</b>	30-50
<b>Media</b>	60-80
<b>Alta</b>	80-95

### ***Potencia del elemento generador.***

La potencia del elemento generador puede ser determinada a partir de la Ecuación 13.

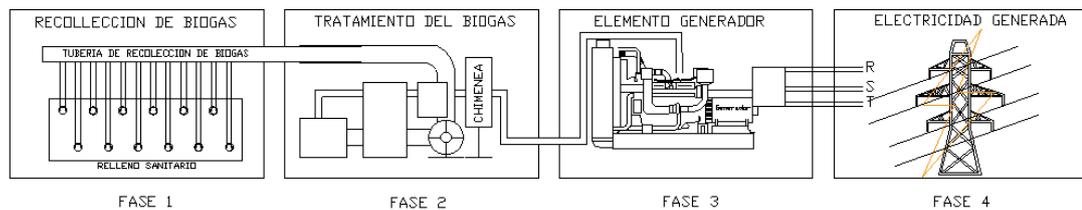
$$P_{E.G} = \frac{E_{disp}}{8760h \cdot f.d.p} [kWh/año] \quad (13)$$

Donde:

$P_{E.G}$ : potencia del elemento generador.

$f.d.p$  : se asume comúnmente un factor de disponibilidad de planta entre el 80% y 90% debido a mantenimientos y paro de maquinaria que se pueda hacer durante el año [68].

En la Figura 2.9 se presentan las fases por las que pasa el biogás antes de ser transformado en energía eléctrica.



**Figura 2. 9** Planta generadora de electricidad a partir de biogás. Elaboración propia.

## 2.2 INFORMACIÓN ESPECÍFICA DEL RELLENO SANITARIO CEIBALES

Es importante conocer los parámetros característicos de cada relleno, pues esto definirá el potencial que tiene para generar biogás. Los parámetros presentados a continuación son necesarios para cada uno de los modelos matemáticos mencionados anteriormente. En esta sección también se presentará los procesos por los que pasan los RSU en el RS Ceibales, desde el ingreso, hasta la cobertura final. Una vez se conozca los parámetros característicos del RS Ceibales se procederá con la estimación de biogás según cada modelo matemático.

### 2.2.1 UBICACIÓN DEL RELLENO SANITARIO CEIBALES

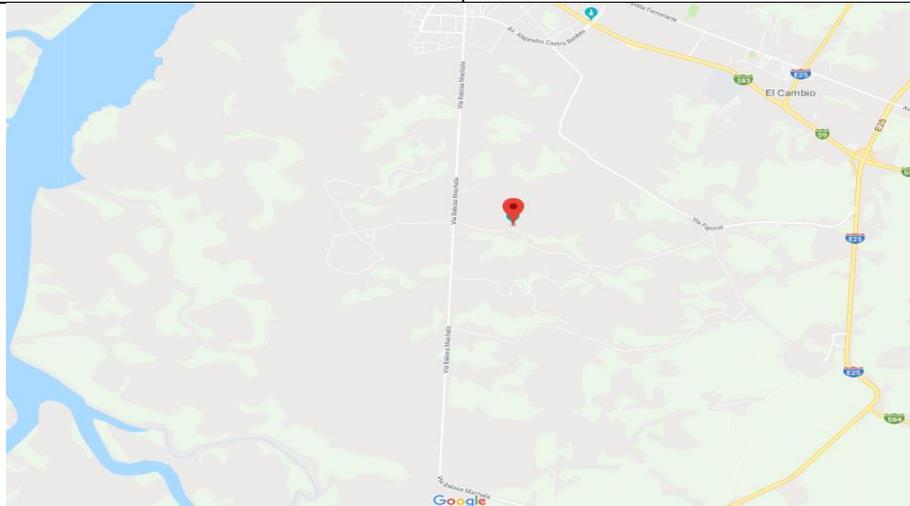
El RS Ceibales está ubicado en la provincia El Oro, a 18 km de la ciudad de Machala, y a 23 km del cantón Santa Rosa, para ambos casos el ingreso es por vía a la Costa/E25 y Vía Balosa Machala. Su ubicación exacta en coordenadas geográficas es: Latitud -3.32, y Longitud -79.9491. En la Figura 2.10 se muestra su ubicación y poblaciones aledañas.



**Figura 2.10.A.** Mapa de Ecuador y provincia donde se encuentra ubicado el RS Ceibales.



**Figura 2.10. B.** Ubicación del RS Ceibales en la ciudad de Machala.

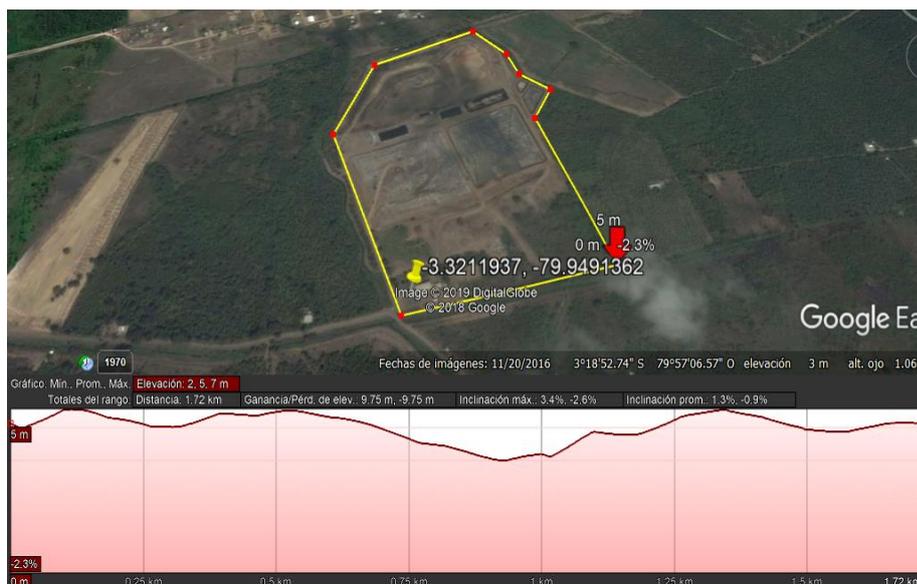


**Figura 2.10.C.** Avenida para el ingreso al RS Ceibales.

**Figura 2. 10** Ubicación del RS Ceibales.

## 2.2.2 SUPERFICIE DEL RELLENO SANITARIO CEIBALES

El área del terreno tiene un total de 20.27 hectáreas, en la cual el 75% está dedicado a el tratamiento de los RSU, y el 25% la administración del RS y áreas verdes como también para futuras ampliaciones. En la Figura 2.11 se muestra una imagen vista de Google Earth en la cual indica las coordenadas del RS además del terreno total que ocupa el relleno.



**Figura 2. 11** Terreno dedicado al depósito de los RSU de la ciudad de Machala. [ Google Earth]

### 2.2.3 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS

Las características climatológicas de Machala se tomaron en base a datos de páginas web como: weatherspark y worldclimate (fuente: <https://es.weatherspark.com/> y [www.worldclimate.com](http://www.worldclimate.com)), debido a que las páginas de estaciones meteorológicas del INAMHI presentaban datos desactualizados. Es importante mencionar que esta información ya ha sido referenciada anteriormente por proyectos de prefactibilidad en Cuenca y Guayaquil. Se debe conocer estos datos debido a que son requeridos en los modelos para el cálculo de los parámetros de  $K$  y  $L_0$ . A continuación, en la Tabla 2.10 se presenta las características climatológicas de la ciudad de Machala.

**Tabla 2. 10** Características climatológicas la ciudad de Machala

Temperatura	La temperatura media anual de la ciudad de Machala varía entre 25 y 32 °C por lo general esta temperatura se mantiene constante la mayoría del tiempo, En promedio Machala tiene una temperatura de 28 °C [73].
Precipitaciones	El promedio de lluvia para la Ciudad es de 426.4 mm/año. Debe tomarse en cuenta que las condiciones climáticas en esta área son variables [74].

Humedad	La humedad en la ciudad de Machala suele variar relativamente poco durante el año, en promedio la humedad es de un 72 y 88% [73].
---------	---

#### 2.2.4 DATOS CARACTERÍSTICOS DEL RS CEIBALES

El RS empezó su funcionamiento el 18 de septiembre del 2010. En promedio recibe una cantidad diaria de basura de 322.32 T/día y mensualmente 9933.32 T/mes. En el año 2018 se depositó un total de 115 702 T/año. El relleno sanitario Ceibales tiene prevista su clausura en el año 2030 [75]. En la Fotografía 2.1 se muestra la entrada al RS Ceibales



**Fotografía 2. 1** *Entrada principal del RS Ceibales de la ciudad de Machala. Elaboración propia*

En la Tabla A.1 del Anexo A se indica información referente a la cantidad de desechos que se depositaron desde el año 2010 hasta el año 2019 [75].

En la ciudad de Machala no se registra actividades de reciclaje en los hogares o áreas donde los desechos son generados, así como no hay políticas de separación de desechos en el relleno.

### 2.2.5 COMPOSICIÓN DE LOS DESECHOS

No se dispone de información referente a la composición de los desechos que ingresan al RS. Por lo que, como información aproximada, se recurrió al porcentaje de composición de desechos de la provincia de El Oro. En la Tabla 2.11 se muestra la composición de los desechos que llegan a los sitios de disposición final.

**Tabla 2. 11** *Composición estimada desechos orgánicos* [76].

Categoría del Desecho	Composición (%)
Comida	62
Papel y Cartón	9
Plásticos	3
Metal	2
Vidrio	3
desechos de jardín	12
Recorte de grama, abono	
Desechos construcción incluyendo caucho	
Madera	

### 2.2.6 OBSERVACIONES GENERALES

A continuación, se explica cada uno de los procedimientos que se realizan en el RS desde que llegan los RSU, hasta la cubierta total diaria. El desecho es depositado en el sitio directamente desde los vehículos de recolección. A la entrada del RS, los vehículos de recolección son pesados en una báscula previo a la descarga del desecho. El peso del vehículo se obtiene a la llegada y salida, estos datos están simultáneamente registrados en las oficinas del RS Ceibales.

*Compactación de una capa de Residuos:* Una vez depositados los RSU se procede con la compactación. Este procedimiento se lo hace con el fin de ocupar menos espacio en el confinamiento, además de distribuir uniformemente los residuos para su posterior cobertura. Este procedimiento lo hacen con tractores tipo oruga. En la Fotografía 2.2 se muestra cómo se lleva a cabo este procedimiento y las maquinarias que se emplean [75].



**Fotografía 2. 2** *Compactación de los RSU en el RS Ceibales de la ciudad de Machala. Elaboración propia*

*Capa de Tierra*, una vez compactados los residuos se procede con la cobertura de los RSU, esto se lo hace con el fin de limitar la migración de malos olores producidos por los desechos al exterior. Además, la cobertura también sirve para dividir los RSU entre capas. Como se mencionó con anterioridad el material que se usa para las capas proviene de las excavaciones realizadas en el mismo terreno. En la Fotografía 2.3 se muestra como la maquinaria va cubriendo los RSU del RS Ceibales con el mismo material extraído de la excavación [75].



**Fotografía 2. 3** *Maquinaria cubriendo los RSU con una capa de tierra. Elaboración propia*

*Extracción de Gases*, La extracción de gases se lo realiza mediante tubos de tipo PVC de 4" de diámetro. Este tubo es perforado alrededor de su estructura y están instalados desde la base del confinamiento del RS. El tubo va protegido por material pétreo y con malla de acero, esto con el fin de que sea visible para la maquinaria que

trabaja ahí, y evite dañarlo. La longitud del tubo se va incrementando conforme se van formando las capas de RSU [75].

Los tubos de PVC son instalados en los RS con el fin de que los gases generados por los lixiviados y por residuos puedan salir por este tubo. También sirven para evitar incendios dentro del depositario del RS[75]. En la Fotografía 2.4 y 2.5 se muestran los tubos PVC que son instalados en el RS Ceibales, la Fotografía 2.4 muestra una terraza sin terminar aún y en la Fotografía 2.5 se muestra una terraza ya terminada.



**Fotografía 2. 4** *Ducto de salida de gases en una terraza sin terminar. Elaboración propia*



**Fotografía 2. 5** *Ducto de salida de gases en una terraza ya terminada. Elaboración propia*

## 2.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Como ya se mencionó la producción de biogás en un RS se estimará en base a los modelos mencionados en el ítem 2.1, y a los datos obtenidos en el ítem 2.2. En el caso de estudio, tanto para el modelo LandGem y ecuatoriano no consideran el crecimiento de los RSU para futuros años. Debido a esto se estima la cantidad de basura que habrá en un futuro en Machala.

En la Tabla 2.12 se presenta los datos de la cantidad de basura ingresada al RS desde el año 2010 hasta mayo del 2019. Con la ayuda de estos datos se estima la cantidad de basura que ingresará al relleno posiblemente en futuros años. Cabe recalcar que para la aproximación se omitirá tomar los datos del año 2010 y 2019 debido a que estos datos no representan el valor total de un año completo.

**Tabla 2. 12** Cantidad de RSU que ingresaron al RS Ceibales desde su inauguración hasta el presente año mayo 2019 [75].

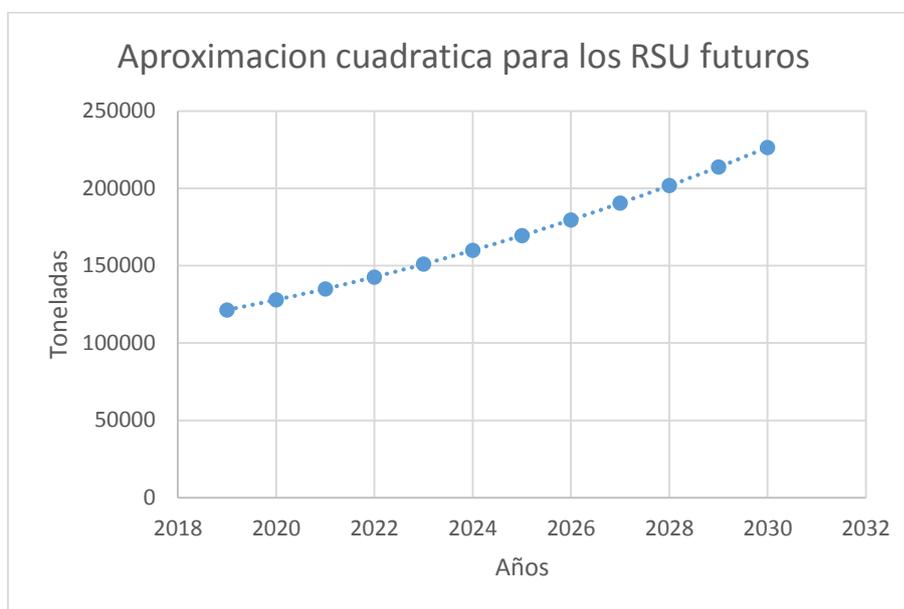
Años Actuales	RSU Toneladas
2010	26475.1
2011	91628.7
2012	93356.3
2013	95575.0
2014	98322.3
2015	101645.1
2016	105600.7
2017	110258.6
2018	115702.3
2019	51784.65

Con datos mencionados se obtuvo la Ecuación 14, la misma que muestra el comportamiento de la generación de residuos del RS Ceibales. Donde  $y$  representa la cantidad de RSU, y  $x$  representa los valores de años.

$$y = 306,95x^2 + 647,25x + 90771 \quad (14)$$

Otro punto por recalcar es que para que los valores de la ecuación no fueran muy extensos se usó los valores de los años en números de años, es decir el año 1 es el año 2011 y el 8 es el año 2018. Ósea, que si deseamos saber cuál será el valor en el año 2019 tendríamos que remplazar en la ecuación el valor de 9. Asimismo, si deseamos saber el valor de RSU para el año 2030 se debería remplazar el valor 20 en la ecuación.

La Figura 2.12, muestra la gráfica obtenida a partir de los datos obtenidos por la Ecuación 13, esta grafica permite observar la curva de tendencia que toma los residuos a partir del año 2019. Muestra el crecimiento de los RSU en Machala para años posteriores, hasta la clausura del RS en el año 2030.



**Figura 2. 12** Gráfica y ecuación de aproximación cuadrática del crecimiento de los RSU para los próximos años

Con ayuda de la Ecuación 14 se obtiene los datos de RSU que ingresaran al RS ceibales en futuros años. Los datos se presentan en la Tabla 2.12, la cual muestra los valores en toneladas por cada año a partir del 2019, hasta su clausura. Tanto los valores de la Tabla 2.12 y 2.13 serán requeridos posteriormente por cada modelo.

**Tabla 2. 13** Estimación de residuos que ingresaran al RS Ceibales en futuros años

Años Futuros	RSU Toneladas
2019	121459.2
2020	127938.5
2021	135031.7
2022	142738.8
2023	151059.8
2024	159994.7
2025	169543.5
2026	179706.2
2027	190482.8
2028	201873.3
2029	213877.7
2030	226496.0

### 2.3.1 RESULTADOS DEL MODELO LANDGEM

Como se mencionó en el ítem 2.1.1 se tiene que definir  $K$  y  $L_0$ .

#### CÁLCULO PARA EL VALOR DE $K$

Para el cálculo del valor de  $K$  se usan los datos de la Tabla 2.3 y la Tabla 2.10. Con ayuda de la Tabla 2.10 se puede obtener el valor de la precipitación promedio anual de Machala, la cual es de 426.4 mm/año. A partir de los datos de la Tabla 2.3 y la precipitación mencionada se desprende que la ciudad de Machala cuenta con un clima seco. Los valores de los tipos de degradación a los cuales se relaciona con el clima de Machala se presentan en la Tabla 2.14.

**Tabla 2. 14** Tipo de degradación en dependencia de la precipitación promedio anual de Machala

Tipo de Clima		Tipo de Degradación			
		Rápida	Moderadamente Rápida	Moderadamente Lenta	Muy Lenta
Seco	500	0.1	0.05	0.02	0.01

Debido a que el relleno sanitario Ceibales no recicla e ingresan todos los tipos de residuos, se procede a escoger las cuatro constantes de degradación, y se reemplaza los valores en la Ecuación 3. El valor promedio obtenido de  $K$  se presenta a continuación.

$$K_{500} = \frac{0.1 + 0.05 + 0.02 + 0.01}{4} = 0.045$$

#### CÁLCULO PARA VALOR DE $L_0$

Para el cálculo de  $L_0$  se procede a usar la Ecuación 4. A continuación, se da la explicación de cómo obtener los parámetros necesarios para definir este factor.

Para obtener el valor  $MCF$  se recurre a la Tabla 2.5, y se establece que el RS Ceibales cumple la condición “Gestionado Anaeróbico”, por tanto, el  $MCF$  es 1.

El valor  $DOC$  está definido por el tipo de composición y porcentaje de los RSU del RS Ceibales. Utilizando la Ecuación 5 y la información de la Tabla 2.11, se tiene:

$$DOC = 0.4 * (9\%) + 0.17 * (12\%) + 0.15 * (62\%) + 0.3 * (12\%) = 0.1854$$

El valor  $DOC_f$  depende de la temperatura donde se encuentra ubicado el relleno sanitario (\*ver Tabla 2.10). Como se mencionó en las características de la Tabla 1.3, la temperatura del RS es más elevada que la del ambiente, por lo que se tomó un valor mayor al promedio que existe en Machala. El valor de  $DOC_f$  se obtuvo mediante la Ecuación 6.

$$DOC_f = 0.014(30) + 0.28 = 0.7$$

Por último, para estimaciones de metano disponible en el biogás, es recomendable utilizar el 50%, tal como lo mencionan los siguientes autores [43], [60], [61].

$$F = 50\% \text{ metano}$$

Entonces el valor del potencial de generación de metano según la Ecuación 4 es:

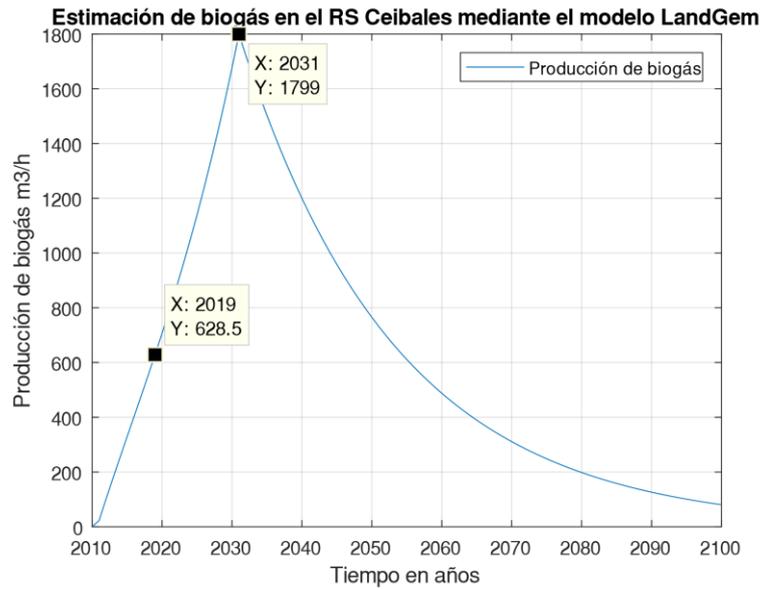
$$L_0 = 1 * 0.1854 * 0.7 * 0.5 * \frac{16}{12} = 86.52 \text{ m}^3/T$$

Los valores de  $k$  y  $L_0$  fueron muy parecidos a los valores que obtuvo el estudio de biogás del RS Las Iguanas de la ciudad de Guayaquil [77].

### Valores de biogás obtenidos del modelo LandGem

Los resultados  $K$  y  $L_0$  y la información presentada en las Tablas 2.12 y 2.13 es ingresada en el modelo Excel LandGem. Los resultados son presentados en la Tabla B.1 del Anexo B.

En la Figura 2.13 se indica el comportamiento que tiene el biogás en el RS ceibales según el modelo LandGem. Se aprecia como varía la producción de biogás en el tiempo. Se advierte que para el año 2031 se llega a un máximo de producción.



**Figura 2. 13** Comportamiento del biogás en el RS Ceibales según el modelo LandGem

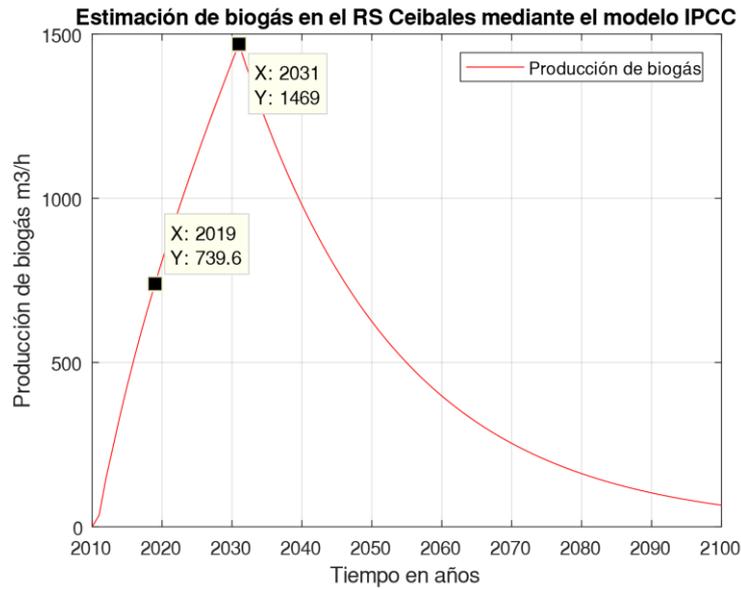
### 2.3.2 RESULTADOS DEL MODELO IPCC

Debido a que el modelo de Excel no permitía el ingreso de datos para rellenos individuales, se procedió a estimar la producción de biogás mediante la Ecuación 7 y 8 descritas en el ítem 2.1.2. Para el cálculo de las variables de la Ecuación 8 como: el  $M_i$ ,  $DOC_i$ ,  $DOC_F$ ,  $MCF$ , y  $F$ , se toma los valores ya calculados en el modelo LandGem (valores recomendados por la IPCC).

#### Valores de biogás obtenidos del modelo IPCC

Los valores presentados en el Anexo B, Tabla B.2 muestran la cantidad de biogás producido por año mediante el modelo IPCC.

La Figura 2.14 indica el comportamiento que tiene el biogás en el RS ceibales según el modelo IPCC. Se indica como varía la producción de biogás conforme pasa el tiempo. Se advierte que la máxima producción se tendría en el año 2031.



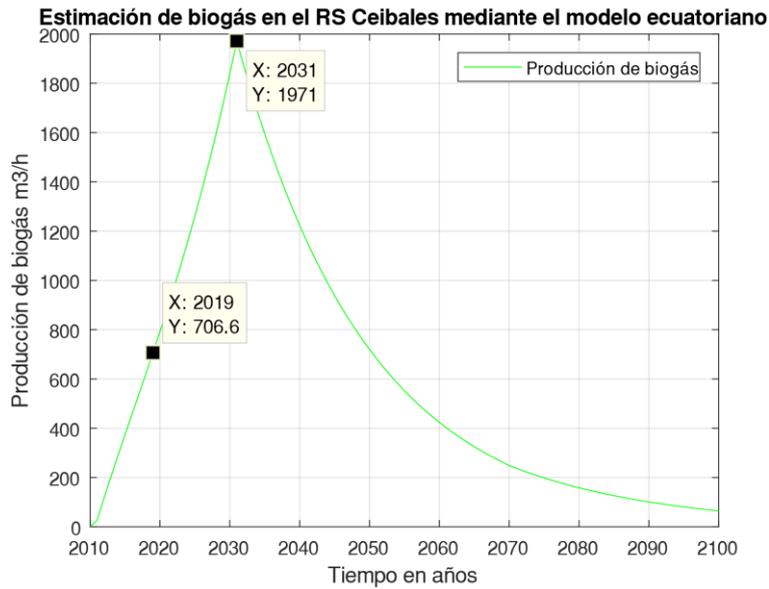
**Figura 2. 14** Comportamiento del biogás en el RS Ceibales según el modelo IPCC

### 2.3.3 RESULTADOS DEL MODELO ECUATORIANO

En el modelo ecuatoriano no se requiere calcular los valores de  $K$  y  $L_0$ , por tanto, se procede a ingresar los datos de población de la Tabla 2.12 y 2.13.

#### Valores de biogás obtenidos del modelo ecuatoriano

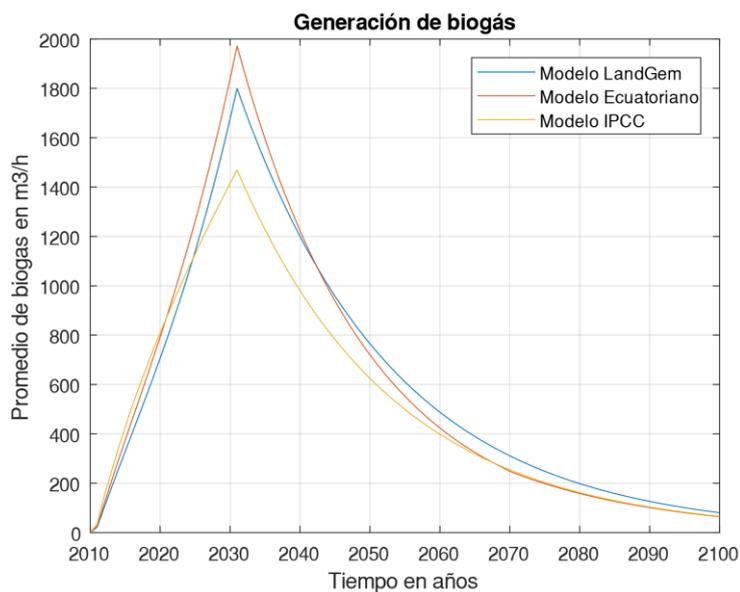
En la Tabla B.3. del Anexo B, se exponen los datos obtenidos de generación de biogás mediante el modelo ecuatoriano. En la Figura 2.15 se muestra el comportamiento que tiene el biogás en el RS ceibales según el modelo ecuatoriano. Al igual que en los casos previos se indica que el máximo de producción se tendría en el año 2031.



**Figura 2. 15** Comportamiento del biogás en el RS Ceibales según el modelo ecuatoriano

### 2.3.4 MODELO MATEMÁTICO ADECUADO PARA EL CASO DE ESTUDIO

Como se observó en las Figuras 2.13, 2.14 y 2.15 cada modelo aporta con una cantidad de generación de biogás diferente. La Figura 2.16 muestra el comportamiento que tienen el biogás respecto a cada modelo matemático. La variación entre graficas se debe a que cada modelo utiliza diferente información. Por ello tal como se recomienda en estudios hechos en [42], [77], [78], se hace un promedio de los valores obtenidos en los tres modelos (\*ver Tabla B.4 del Anexo B).



**Figura 2. 16** Generación de biogás por cada uno de los modelos matemáticos

Debido a la eficiencia de la recuperación, no toda la cantidad del biogás se puede aprovechar. En caso de no contar con un sistema implantado se puede asumir las eficiencias de recuperación tal como se plantea en la Tabla 2.9. Además, en la Tabla 2.15 se presentan las eficiencias impuestas por estudios que se hicieron en rellenos sanitarios del país y en varios RS de Nigeria.

**Tabla 2. 15** Estimación de eficiencias de recuperación de biogás en RS de Ecuador

Rellenos Sanitarios	Estimación de Eficiencias de Recuperación	Referencias
Loja	60%	[78]
El Inga	90%	[79]
El Valle	63%	[80]
Chabay Azogues	60%	[81]
Minas de Huascachaca	70%	[62]
Pichacay	78.90%	[42]
Las Iguanas	92%	[77]
Varios RS de Nigeria	75%	[54]

Cabe recalcar que las estimaciones en eficiencias de recuperación tanto del RS Pichacay como Las Iguanas fueron estimadas en base a mediciones realizadas en el sitio. Basándose en la Tabla 2.9 y 2.15, para el presente caso de estudio se asume un sistema en eficiencia de recuperación medio de 71%.

Teniendo claro el valor de eficiencia y el biogás producido por cada uno de los modelos, se puede estimar el biogás que es recuperable mediante la Ecuación 15.

$$\text{Biogas recuperable} = \frac{Q_{LandGem} + Q_{ecuatoriano} + Q_{IPCC}}{3} \cdot \gamma \quad (15)$$

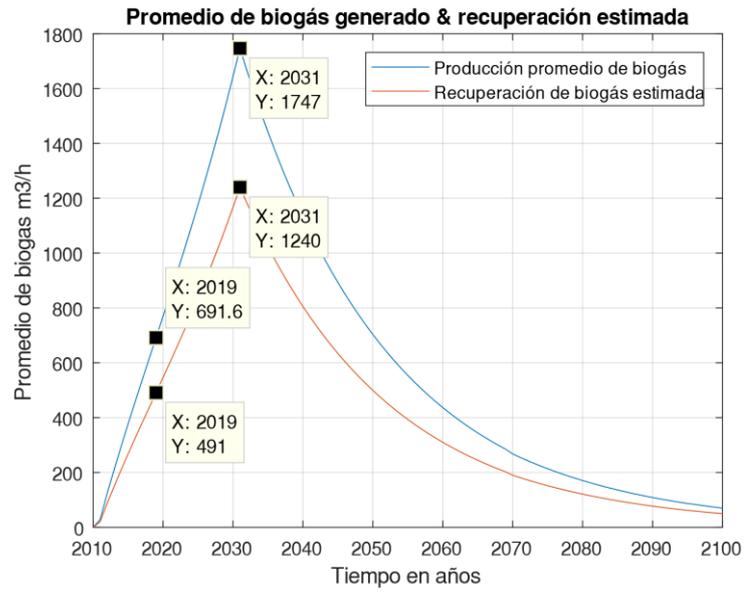
Donde

$\gamma$ : eficiencia de recuperación

$Q_{landGem,ecuatoriano,IPCC}$ : flujo producido por cada uno de los modelos. (ver Tabla B.1, B.2, B.3 del Anexo B)

En la Tabla B.4 y B.5 del Anexo B, se presentan los datos obtenidos de: el promedio de biogás y el biogás se estima recuperable. En la Figura 2.17 se indica tanto

la cantidad de biogás producida y la cantidad recuperada para el aprovechamiento energético.



**Figura 2. 17** Estimación de biogás recuperable en el RS Ceibales



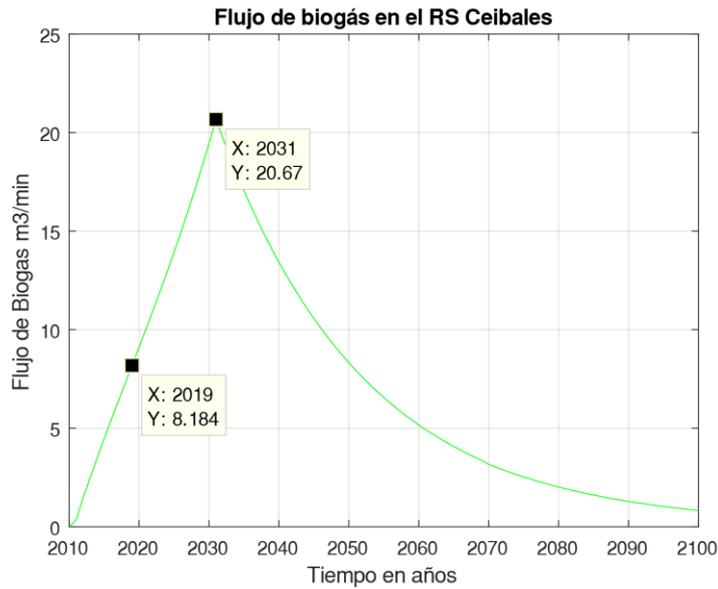
# **CAPÍTULO 3: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

El análisis respecto a la generación de energía eléctrica se dividirá en tres partes. La primera analiza el biogás que se puede aprovechar en el relleno sanitario Ceibales. La segunda analiza el elemento generador que puede llegarse a usar en dependencia a la cantidad de biogás obtenido. Por último, se analizará la cantidad de energía y potencia eléctrica que se encuentra disponible.

## **3.1 ANÁLISIS RESPECTO AL BIOGÁS APROVECHABLE**

En el numeral 2.3.4 se observó la cantidad de biogás que está disponible en el relleno sanitario, a más de la que podría aprovecharse. En la Figura 2.17, se indica el comportamiento que va a tener el biogás para próximos años. La gráfica además muestra que el relleno alcanza su máximo potencial en el año 2031 con una generación de 1240 m<sup>3</sup>/h, y a partir de ello empieza a decaer.

Por otra parte, la Figura 3.1 la indica el flujo de biogás en m<sup>3</sup>/ min que va a tener el relleno sanitario por cada año. Se observa que el flujo máximo que alcanza el relleno sanitario es el año 2031 y es de 20.67 m<sup>3</sup>/min, que es 1 año después de la clausura del RS. Esta gráfica ayuda a definir cuál es el tipo de generador que se puede utilizar para el caso de estudio.



**Figura 3. 1** Flujo de biogás estimado para presente y futuros años.

Con ayuda de la Figura 3.1 y la Tabla 2.7 se puede determinar la tecnología que se puede usar en dependencia de los flujos presentados por el RS Ceibales. Según la Tabla 2.7 lo conveniente es utilizar microturbinas o MCI, debido al flujo presente en el relleno.

### 3.2 ELEMENTO GENERADOR

En vista de que las turbinas necesitan grandes flujos de biogás se descartó el uso de estas, quedando como única alternativa el uso de MCI y microturbinas. El siguiente análisis evalúa que elemento generador es conveniente utilizar en dependencia de la Tabla 3.1.

**Tabla 3. 1** Diferencias entre MCI y microturbinas. [78], [82]

	Típica capacidad eléctrica	Capacidad eléctrica mínima	Eficiencias	Costos por kW/USD	Contenido de CH <sub>4</sub>	Emisiones NO <sub>x</sub>
MCI	1000 kW	100 kW	32-45%	1150-1700	>40%	<500 ppmv
Turbinas	100 kW	30 kW	26-32%	5500	<40%	<15 ppmv

Se parte analizando los costos por kW/USD, donde se observa que el costo de las microturbinas es más elevado en comparación con los MCI. Otro de los puntos analizar es las eficiencias de cada uno, donde se observa que los MCI también presentan una eficiencia más elevada en frente de las microturbinas. Por último, se analizó las potencias que típicamente manejan cada tecnología, para el flujo que existe

actualmente en RS ceibales lo recomendable es usar un MCI. Con el flujo existente en el año 2019 ya se podría instalar generadores mayores a los 800 kW.

La instalación de microturbinas para el caso de estudio no resulta conveniente tanto económicamente como cuestión de potencias. Por lo que se optó por usar los MCI como elemento generador para el caso de estudio.

### 3.3 ESTIMACION DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE MCI

Para estimar la cantidad de energía disponible en el RS Ceibales se usa la Ecuación 10, la cual indica la cantidad de energía que se puede obtener a partir del biogás. Con los flujos expuestos en la Tabla B.5 del anexo B y los valores de la Tabla 3.2 se procede a encontrar la energía disponible por año.

**Tabla 3. 2** Resumen de valores

Eficiencias de Recuperación ( $\gamma$ )	71%
PCI <sub>(biogás)</sub>	18
Factor de disponibilidad de planta (f.d.p)	85%
Eficiencia del MCI ( $\delta$ )	40%
Factor de conversión de MJ a kW h ( $\gamma_1$ )	3.571428571

Cabe recalcar que la eficiencia del elemento generador se obtiene en base a catálogos expuestos por fabricantes. El flujo presente en el RS en el año 2019 estima que se puede implementar un motor de bujía de aproximadamente 1 MW. En la Tabla 3.3 se presenta características de motores de 1 MW que funcionan con biogás.

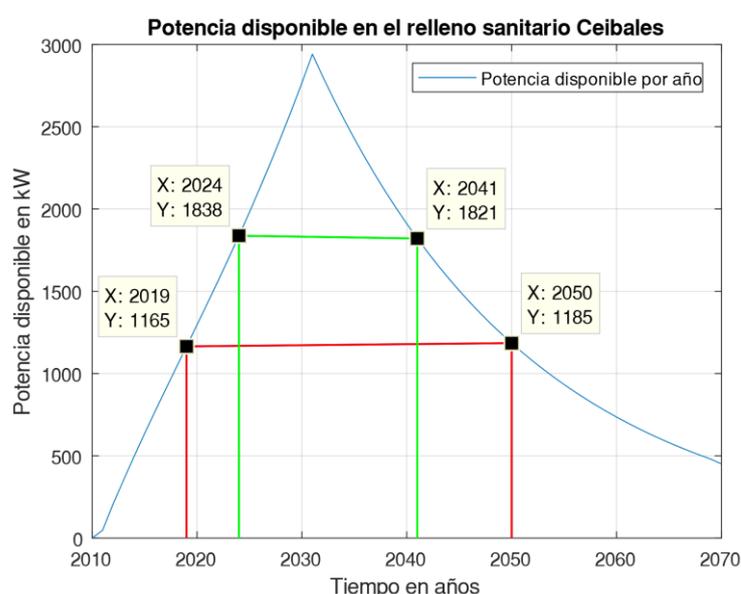
**Tabla 3. 3** Características de motores que funcionan con biogás.

Marca	Modelo	Procedencia	Frecuencia [Hz]	Potencia Generada [ekW]	Eficiencia %	% de CH <sub>4</sub>	Referencias
Caterpillar	CG170-12	USA	50-60	1200	43.4	50	[83]
AB Energy	Ecomax 10	Brasil	60	1067	40.9	50	[84]
Guascor	SFGM 560	España	60	1065	38.4	62.5	[85]

De acuerdo con la Tabla 2.7 y la Tabla 3.3, para el caso de estudio se estimó una eficiencia de generación eléctrica del 40%.

Conocidas las variables de la Ecuación 10 se procede con el cálculo de la energía disponible por año utilizando MCI. La energía disponible por año en el relleno se presenta en la Tabla B.4 de Anexo B. De acuerdo con el análisis del numeral 3.2, la energía va a variar en disponibilidad del biogás.

Una vez se tenga la energía lo siguiente es estimar la potencia del elemento generador con ayuda de la Ecuación 13. En la Tabla B.5 del Anexo se B presenta los resultados obtenidos, la cuales predicen la potencia del elemento generador que estará disponible por cada año en dependencia de la energía disponible. Además, se presenta la Figura 3.2 la cual muestra el comportamiento de la potencia del elemento generador para el año 2019, a más de las que estarán disponible para próximos años.



**Figura 3. 2** Potencia disponible en el relleno sanitario Ceibales de la ciudad de Machala mediante MCI

La Figura 3.2 indica que para el año 2019 se podría instalar un generador de 1 MW, y esta cantidad de potencia estará disponible hasta el año 2050. La línea roja representa el generador de 1 MW y los años que estaría disponible esta potencia. Cuando se llegue al año 2024 se podría instalar un segundo generador de 800 kW, esta cantidad de potencia estaría disponible hasta el año 2041. De igual manera la línea verde representa el generador 2 de 800 kW, además del tiempo que va a estar disponible esta potencia.

# **CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA**

Una vez determinada la tecnología se analiza si se invierte el capital de forma responsable, y si existiese una compensación económica en la inversión. Con el análisis se podrá diagnosticar el impacto y rentabilidad económica que tendrá el proyecto en el mercado, además de permitirnos comparar nuestros resultados con otros proyectos. Al definir el precio de la energía se establecerá si la producción de electricidad con esta tecnología es competitiva frente a los sistemas de generación que operan en el Ecuador.

El objetivo del Capítulo es establecer si el proyecto es rentable desde el punto de vista económico, bajo las condiciones de producción de energía eléctrica y de otros parámetros que son típicos para la operación de este tipo de plantas. Para alcanzar este objetivo se analiza la inversión inicial, retribución por la venta de energía eléctrica, y costos de operación y mantenimiento. También, se analiza el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), el costo nivelado de energía (LCOE del inglés Levelized Cost of Energy) y el periodo de tiempo requerido para recuperar la inversión (PBP del inglés Payback Period), esto con el fin predecir la viabilidad económica de la tecnología aplicada.

## **4.1 DETERMINACIÓN DEL COSTO DE INVERSIÓN, COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Para determinar el flujo de efectivo ( $F_n$ ), es necesario e indispensable calcular el costo de inversión ( $Inv$ ) así como el costo de operación y mantenimiento ( $O\&M$ ). Estos costos dependen directamente de la tecnología destinada a generar electricidad, como también de factores externos como el transporte, tasas arancelarias, impuestos y ofertas del fabricante. Los autores [86], [87] consideran estos valores como cuantitativos, pudiéndose extraer de reportes de instituciones internacionales, así como de investigaciones, aproximándose de esta manera a un valor real.

#### 4.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN

Los costos de inversión son aquellos rubros generados por la implantación de la planta, incluyen costos de ingeniería, permisos, construcción, topografía, adquisición de equipos, puesta en marcha e imprevistos [54]. Para determinar la inversión requerida se utiliza la Ecuación 16, que permite extrapolar los costos de una planta de potencia específica a los costos de la planta estudiada.

$$\frac{C_1}{C_2} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^p \quad (16)$$

Donde C son los costos y S son las potencias nominales de las plantas, mientras los subíndices 1 representa la planta nueva y 2 es la planta ya construida. Para generación eléctrica, comúnmente se asigna el factor  $p$  de 0.75 [86], [87].

En el caso de estudio se evidencio que se puede obtener dos tipos de plantas con diferentes valores de potencias. Debido a esto la Tabla 4.1 y 4.2 muestran la inversión para plantas de biogás de 1 MW y 1.8 MW respectivamente, referenciadas a cuatro plantas ya construidas, entre las cuales destacan las centrales locales como Inga I II y Pichacay, y dos centrales que se mencionan en [87]. El costo promedio se obtiene luego de haber calculado un promedio de los resultados obtenidos.

**Tabla 4. 1** *Costos de inversión planta de 1MW*

Planta Referencial MW	Inv. Referencial MUS\$	Central	Planta Ceibales MW	Costo Ceibales MUS	Costo Promedio USD/KW
5.00	8.96	-	1.00	2.68	<b>2505.53</b>
4.50	6.30	-	1.00	2.04	
1.00	3.5	Pichacay	1.00	3.50	
5.00	6.03	Inga I y II	1.00	1.80	

**Tabla 4. 2** *Costos de inversión planta de 1.8 MW*

Planta Referencial MW	Inv. Referencial MUS\$	Central	Planta Ceibales MW	Costo Ceibales MUS	Costo Promedio USD/kW
5.00	8.96	-	1.80	2.68	
4.50	6.30	-	1.80	2.04	
1.00	3.5	Pichacay	1.80	3.50	<b>3893.62</b>
5.00	6.03	Inga I y II	1.80	1.80	

#### 4.1.2 DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Estos costos son aquellos valores que se consideran para la operación del sistema como: personal técnico, insumos, materia prima y servicios básicos. También se debe tomar en cuenta los gastos por mantenimiento, necesarios para que la planta no sufra averías en el sistema de control o de potencia.

La Tabla 4.3 clasifica los costes de una planta por generación de energía eléctrica en dos partidas, la primera son los costos fijos los cuales no varían, pues son independientes a la producción de energía, la segunda son los costos variables que cambian de acuerdo con la magnitud de producción [88].

**Tabla 4. 3** *Costos de una planta de generación eléctrica [88]*

COSTOS FIJOS	Intereses
	Retorno de inversiones
	Impuestos
	Seguros
	Costes fijos de O&M
COSTOS VARIABLES	Costes de combustibles
	Costes variables de O&M

Estos costos son anuales y según [86], [87] pueden valorarse cuantitativamente mediante los costos de inversión empleados, en el caso de una planta de biogás será el 7.4% de la inversión. En la Tabla 4.4 se indican los costos de operación y mano de obra para la planta de 1 MW y una de 1.8 MW.

**Tabla 4. 4 Costos de O&M**

Costo O&M USD/kWh	
1 MW	<b>185.409</b>
1.8 MW	<b>288.128</b>

## 4.2 EL COSTO NIVELADO DE LA ENERGÍA

El dinero que recibe la planta es directamente por la venta de la electricidad. Para predecir la viabilidad económica del proyecto, es necesario conocer los ingresos o retribuciones por la venta de este insumo.

En Ecuador existía la Regulación No. CONELEC 001/13, que fijaba un precio al USD/kWh para plantas de biogás. Sin embargo, la nueva Regulación No. ARCONEL 031/16 deroga estos valores, eliminando así un precio de referencia [11], [13].

Para calcular los ingresos se utiliza el costo nivelado de la energía. Este, es el costo mínimo en USD/kWh de la energía generada. Puede servir como una base por la cual se pueden comparar diferentes tecnologías en términos de viabilidad económica. La Ecuación 17 sirve para el cálculo de LCOE [54].

$$LCOE(i) = \frac{\sum_t [Inv_t + O\&M_t] (1+d_n)^{-t}}{\sum_t [Elec_t (1+d_n)^{-t]} } \quad (17)$$

Donde:

$Inv_t$ : es el costo del ciclo de vida del proyecto.

$O\&M_t$ : es el costo de operación y mano de obra.

$Elec_t$ : es la energía eléctrica generada en un año.

$d_n$ : es la tasa de descuento.

En la Tabla 4.5 se muestra el costo por unidad de energía expresada en dólares por kWh, este valor es constante durante la vida útil del proyecto. Un precio de la electricidad por encima de este produciría una mayor ganancia, mientras que un precio por debajo generaría una pérdida. Los datos se considera en función de las horas de

funcionamiento de la planta. Además, se considera una tasa de descuento del 10% [54], [89], [90].

**Tabla 4. 5 Costo nivelado de energía**

Tecnología	Factor de Planta	Tasa de descuento	Costo USD/kWh para 1MW	Costo USD/kWh para 1.8 MW
Biogás	85%	10%	0.068	0.073

### 4.3 VALOR PRESENTE NETO (VAN)

Hace referencia al valor presente de todos los costos, menos, el valor presente de todos los ingresos, dichos valores, son aquellos que incurren durante toda la vida útil del proyecto. El método tiene como objetivo analizar entradas y salidas de efectivo, tras medir estos flujos y descontando la inversión inicial, determinar si queda o no alguna ganancia. La Ecuación 18 es la típica fórmula del VAN [54], [79].

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1+dr)^n} \quad (18)$$

Donde:

$F_n$ : Es la tasa de flujo de efectivo neto.

$dr$ : Es la tasa de interés efectiva.

$n$ : Es el número total de años en estudio.

Los criterios de evaluación del VAN ya sea para rechazar o aceptar un proyecto se muestran en la Tabla. 4.6.

**Tabla 4. 6 Análisis del VAN**

$Si VAN > 0$	La tasa de descuento elegida generará beneficios, se acepta el proyecto.
$Si VAN = 0$	El proyecto no genera beneficios ni pérdidas, por tal motivo se es indiferente al proyecto.
$Si VAN < 0$	Es proyecto está destinado a tener pérdidas por ende se rechaza el proyecto.

#### 4.4 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

La TIR es un valor cuantitativo y representa la tasa de interés más elevada que un inversionista puede pagar sin poner en riesgo su inversión. Es de vital importancia cuando los proyectos son financiados por una entidad bancaria, ante esta situación, el proyecto deberá pagarse conforme genere ganancias netas. Otra definición aceptada es la rentabilidad de un proyecto expresada en tanto por ciento (%). La TIR está muy relacionada con el VAN pues hace que esta se igual a cero, la Ecuación 19 es la típica fórmula para calcular la TIR [79], [91].

$$\sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1-r)^n} = 0 \quad (19)$$

Donde:

$F_n$ : Es la tasa de flujo de efectivo neto.

$r$ : Es la tasa interna de retorno.

$n$ : Es el número total de años en estudio.

Los criterios de evaluación del TIR se muestran en la Tabla. 4.7, pues luego de tener el VAN estos criterios deberán ser tomados muy en cuenta.

**Tabla 4. 7** *Análisis del TIR*

$Si r > dr$	La tasa de rentabilidad del proyecto expresada, supera la tasa de corte ( $VAN = 0$ ) por este motivo se acepta el proyecto.
$Si r = dr$	La tasa de rentabilidad está libre de riesgo, en general, los intereses para cuentas de ahorro utilizan este interés.
$Si r < dr$	Es el caso contrario, existiendo así, un alto riesgo de pérdida, por ese motivo se rechaza el proyecto.

#### 4.5 PERIODO DE RECUPERACIÓN (PBP)

El PBP es una de las directrices que se deben considerar antes de tomar la decisión sobre cualquier proyecto. Es el número de años en que el costo del proyecto se iguala (es decir, el momento en que el costo de la inversión es igual al costo de operación). La Ecuación 20 es la fórmula más sencilla de cálculo [54], [79].

$$PBP(i) = \frac{C_{inv(i)}(USD) - Descuento(USD)}{AnnualEnergySavings(i)(USD/year)} \quad (20)$$

Donde:

$C_{inv(i)}$ : Es el costo de inversión por la implantación de la planta.

$AnnualEnergySavings_{(i)}$ : Son las ganancias brutas, por la venta de energía. Se puede determinar usando la Ecuación 21.

$$AnnualEnergySavings_{(i)} = Rev_{(i)} - C_{0\&M(i)} \quad (21)$$

Donde:

$Rev_{(i)}$ : Son los ingresos por la venta de energía eléctrica.

$C_{0\&M(i)}$ : Son los costos de operación y mano de obra.

Los criterios de evaluación del PBP se muestran en la Tabla. 4.8, estos criterios deberán ser tomados en cuenta para tomar una decisión en el proyecto.

**Tabla 4. 8** *Análisis del PBP* [79]

<i>Tiempo (Años)</i>	<i>Criterio</i>
Si $PBP \leq 1$	Rentabilidad muy alta.
Si $1 < PBP < 5$	Rentabilidad aceptable o Promedio
Si $PBP \geq 6$	Rentabilidad pequeña.

#### **4.6 RESULTADOS DEL ANALISIS ECONOMICO**

La Tabla D.1 y D.2 del Anexo D se presenta el balance económico para los próximos 15 años, usando como ingresos el despacho de energía eléctrica hacia una empresa de distribución. Como ya se citó en la Tabla 4.5, el costo por kW/h es de 6.8 USD ¢/kWh para el caso del generador de 1 MW y 7.3 USD ¢/kWh para el generador de 1.8 MW. Sin embargo, para el segundo caso la potencia de 1800 W estará disponible desde el quinto año, no obstante, se asume que la adquisición de ambos generadores (1 MW y 0.8 MW) se hará desde el inicio.

Para los egresos que tiene el proyecto, se mantiene tasas de operación y mantenimiento iguales para los quince años. El flujo de caja se obtiene de la diferencia entre el ingreso menos el egreso.

Después de analizar el flujo de caja, se considera una tasa de interés activa para proyectos públicos de 8.60%, dato brindado por el Banco Central del Ecuador. Este dato se utiliza para determinar el VAN y la TIR.

La Tabla 4.10 permite comparar los valores conseguidos en el VAN, la TIR y PBP; para ambos proyectos (1 MW y 1.8 MW).

**Tabla 4.10** *Análisis económico*

	<b>1 MW</b>	<b>1.8 MW</b>
<b>VAN</b>	\$199 767.52	\$383 865.48
<b>TIR</b>	10%	10%
<b>PBP</b>	8 años, 7 meses	9 años, 2 meses

De acuerdo con los valores obtenidos, se anota que ambos proyectos son factibles, pues el VAN y la TIR cumplen con los criterios de rentabilidad. Sin embargo, la planta de 1.8 MW es más rentable económicamente, pues tendrá el doble de ganancia que una planta de 1 MW, no obstante, el periodo de retorno se establece en 9 años y 2 meses. Este tiempo de recuperación del capital es demasiado largo para un proyecto, sin embargo, como factor favorable está que puede reducir las emisiones de GEI.

# CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La finalidad del capítulo es encontrar factores que influyan en la generación de energía eléctrica de una planta e ingresos económicos por el despacho de energía eléctrica. Estos factores pueden partir desde la eficiencia o tecnología aplicada en los generadores, hasta el costo que pagan las empresas distribuidoras por el kWh. Se parte analizando el biogás aprovechable en el RS, posteriormente, se evalúa la energía eléctrica disponible mediante MCI, por último, se analizará la viabilidad económica que tiene el proyecto.

## 5.1 BIOGAS APROVECHABLE EN EL RS CEIBALES

Para el cálculo del biogás se utilizaron tres modelos que estiman su producción: el modelo LandGem, modelo IPCC y modelo ecuatoriano. Tanto el modelo LandGem como IPCC han sido mencionados en varios estudios realizados en diversos países. En estudios realizados en Ecuador por US.EPA y Landfill Methane Outreach Program (LMOP) en rellenos como: Loja, Pichacay, Las Iguanas, Chabay, El valle, se usó el modelo IPCC.

Cabe recalcar que los estudios mencionados anteriormente sirvieron para modelar el modelo ecuatoriano. El modelo ecuatoriano ha sido usado en estudios realizados recientemente en el país como, El Inga I y II y Minas de Huascachaca, entre otros. El análisis de los 3 modelos se hizo con el fin de poder comparar predicciones.

Tanto el Modelo LandGem como Modelo Ecuatoriano tienen un comportamiento similar tal como se observó en la Figura 2.16, esto es debido a que ambos modelos presentan cierta similitud en su ecuación de modelamiento. Una de las diferencias notables que existe entre ambos modelos son los valores de las constantes  $k$  y  $L_0$  (ver ítem 2.3.1 y Figura 2.6). Esta diferencia se da debido a que en el modelo LandGem es necesario calcularlas y en el modelo ecuatoriano ya vienen dadas por defecto. El modelo ecuatoriano debido a sus valores de  $k$  y  $L_0$  presentó valores más altos respecto a la generación de biogás, obteniendo una generación máxima en el año 2031 con un valor de 1971 m<sup>3</sup>/h. El modelo LandGem por otra parte presentó valores más bajos, obteniendo como máximo en el año 2031 un valor de 1799 m<sup>3</sup>/h.

El modelo IPCC a diferencia del modelo ecuatoriano y el modelo LandGem, presento un comportamiento atípico, además, de los tres modelos analizados fue el que menor porcentaje de biogás estimó. Este modelo estimó una generación de biogás máxima en el año 2031 con un valor de 1469 m<sup>3</sup>/h.

La diferencia entre los tres modelos se puede apreciar mejor la Figura 2.16, donde se muestra el comportamiento que presenta el biogás frente a cada modelo. Se aprecia que el modelo LandGem presenta menor producción de biogás, pero tarda un poco más en decaer dicha producción. En cambio, el modelo IPCC muestra una producción más baja en comparación con los otros 2 modelos.

Tal como se observó en estudios realizados por US. EPA y LMOP en rellenos del país, se procedió a promediar los valores obtenidos por cada modelo. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla B.4 del Anexo B. La tabla reveló que la tasa de generación de biogás es cero en 2010 (año inicial de deposición de residuos), posteriormente comienza a aumentar exponencialmente hasta el año 2031 luego de su clausura. A partir de este evento la tasa de generación de biogás comienza a descender. Según la Figura 2.17 la tasa de generación de metano alcanza el pico en 2031 con un valor de 1747 m<sup>3</sup>/h.

A continuación, se presenta la Tabla 5.1, la cual hace la comparación respecto al biogás generado por el relleno sanitario Pichacay y el relleno Ceibales con cantidades similares de RSU.

**Tabla 5. 1** *Biogás generado en RS Pichacay y Ceibales*

RS Pichacay			RS Ceibales		
Año	RSU Anuales	Biogás Generado	Año	RSU Anuales	Biogás Generado
	T	m <sup>3</sup> /h		T	m <sup>3</sup> /h
2007	117600	638	2019	121459.2	691.58
2008	121039	737	2020	127938.5	769.44
2009	123975	832	2021	135031.7	847.95
2010	126963	923	2022	142738.8	927.52
2011	129942	1010	2023	151059.8	1008.55
2012	132960	1095	2024	159994.7	1091.39
2013	136658	1177	2025	169543.5	1176.37
2014	139785	1257	2026	179706.2	1263.80

Las estimaciones de biogás para el caso del relleno Pichacay y Ceibales van a variar debido los valores de  $k$  y  $L_0$  impuestos por cada modelo. En la Tabla 5.2 se aprecia los valores impuestos y calculados para el caso de estudio, mientras que en la Tabla 5.3 se muestra los valores usados por US.EPA y LMOP.

**Tabla 5. 2** Parámetros calculados y estimados para el caso de estudio.

Modelo Landgem		Modelo IPCC		Modelo Ecuatoriano	
$k$	$L_0$	$k$	$L_0$	$k$	$L_0$
0.045	86.52	0.045	-	0.053	80

**Tabla 5. 3** Parámetros de modelos usados por US. EPA y LMOP en varios RS del país.

Carbon Trade		U.S. EPA México		Guía IPCC	
$k$	$L_0$	$k$	$L_0$	$k$	$L_0$
0.062	90	0.08	84	0.05	70.8

Otro de los factores que puede hacer variar el resultado final es la eficiencia de recuperación. Para el caso de Pichacay se estima una eficiencia de recuperación de 79% mientras que para el caso de estudio se estimó una de 71%. A pesar de esto no se ven valores muy alejados.

**Tabla 5. 4** Biogás recuperable en RS Pichacay y Ceibales

RS Pichacay			RS Ceibales		
Año	RSU Anuales	Biogás Recuperable	Año	RSU Anuales	Biogás Recuperable
	T	m <sup>3</sup> /h		T	m <sup>3</sup> /h
2007	117600	504	2019	121459.2	491.0
2008	121039	562	2020	127938.5	546.3
2009	123975	618	2021	135031.7	602.0
2010	126963	671	2022	142738.8	658.5
2011	129942	721	2023	151059.8	716.1
2012	132960	770	2024	159994.7	774.9
2013	136658	907	2025	169543.5	835.2
2014	139785	992	2026	179706.2	897.3

Actualmente en el año 2019 se estima que el RS Ceibales está emitiendo una cantidad de biogás de 491 m<sup>3</sup>/h y una cantidad de CH<sub>4</sub> 245.5 m<sup>3</sup>/h a la atmósfera, y se espera que esta cantidad aumente hasta su posterior clausura en el año 2030.

## 5.2 ENERGIA DISPONIBLE

El potencial en generación de energía eléctrica a partir del biogás generado por RSU, se evaluó utilizando MCI, debido que es la tecnología que mejor prestación ofrece. Los rendimientos que estos presentan en comparación con las turbinas y microturbinas son mucho mejor. Se desistió de usar turbinas debido a que el flujo contenido actualmente en el RS Ceibales no cumple con los requerimientos que estas exigen.

Para el cálculo de energía y potencia se consideraron dos factores importantes como: la eficiencia y las horas que trabajaría el elemento generador. Las horas de utilización o factor de disponibilidad de la planta (*fd.p*) se planteó de la misma manera como lo sugieren los autores de [42], [78], [80].

A continuación, en la Tabla 5.5 se hace una comparación respecto a la potencia eléctrica disponible por medio de biogás entre el relleno Pichacay, Las iguanas, El Inga I y II y el relleno Ceibales. Se observa que tanto el relleno Las Iguanas y El Inga I y II registran grandes cantidades de potencias disponibles, estos se deben a que en la cantidad de RSU que estos reciben es mucho mayor a la que existen en el relleno Ceibales y Pichacay. Para estos casos se debería considerar la instalación de turbinas o un ciclo combinado, ya que la instalación de estos representaría menos emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, en comparación con los MCI.

**Tabla 5. 5** Comparativa entre diferentes estudios realizados en el país con respecto al RS Ceibales

<b>RS Pichacay</b>			<b>RS Las Iguanas</b>		
Año	Biogás	Pot. Disp	Año	Biogás	Pot. Disp
	m <sup>3</sup> /h	kW		m <sup>3</sup> /h	kW
2007	504	896	2007	123	230
2008	582	1035	2008	424	794
2009	565	1167	2009	710	1330
2010	728	1294	2010	983	1841
2011	797	1418	2011	2492	4669
2012	864	1537	2012	2997	5651
2013	929	1653	2013	3486	6531
2014	992	1765	2014	3962	7423

<b>RS El Inga I y II</b>			<b>RS Ceibales</b>		
Año		Pot. Disp	Año	Biogás	Pot. Disp
	m <sup>3</sup> /h	kW		m <sup>3</sup> /h	kW
2004	144	307	2019	491.0	1164.60

2005	426	907	2020	546.3	1295.71
2006	705	1502	2021	602.0	1427.91
2007	976	2078	2022	658.5	1561.91
2008	1234	2625	2023	716.1	1698.36
2009	1521	3237	2024	774.9	1837.86
2010	1804	3840	2025	835.2	1980.96
2011	2084	4436	2026	897.3	2128.18

En la Tabla 5.5 también se observa que la potencia disponible en el RS Ceibales con cantidades similares de biogás es mayor a la del RS Pichacay. Esto se debe a que la eficiencia del elemento generador que se impone en Pichacay es de 33%, mientras que para el caso de estudio se estimó una cantidad de 40%. Se debe recordar que los estudios del RS Pichacay se hicieron en el año 2007 por ende se escogieron estas eficiencias. Actualmente los MCI han mejorado sus eficiencias respecto a la transformación de energía, tal como se indicó en la Tabla 3.3.

Otro de los aspectos a señalar es que la eficiencia de los motores dependerá de la altura sobre el nivel del mar donde sean instalados. Los motores por lo general funcionan con una mezcla estequiométrica entre combustible y oxígeno. A mayor altura existe una menor presión atmosférica, por ende, menor concentración de oxígeno. Es por ello por lo que los motores bajan su rendimiento a mayor altura que se encuentren. Comúnmente se considera un devaluó de 1 a 1.5 % por cada 100 m sobre el nivel del mar (a.s.n.m). Por ejemplo, si se instala un MCI de 1 MW en un lugar con una a.s.n.m de 2500 m, en este motor solo estará disponible una potencia de 750 kW.

Se menciona esto debido que la altura en Machala se considera buena para la instalación de un MCI. Machala como tal se encuentra entre 0 y 12 m de a.s.n.m, es por ello por lo que se aprovecharía de una manera más óptima la potencia disponible.

Dicho esto, la energía disponible en el RS Ceibales por año se presenta en la Tabla C.1 del Anexo C. La producción de energía eléctrica para el año 2019 con un generador de 1 MW será de 722 632.52 kW h/mes y 23 757.78 kW h/día. Con un consumo promedio de energía eléctrica de 120 kW h/mes por hogar en Machala, se estima que esta planta podría dotar de energía eléctrica a 6022 hogares.

La energía disponible por año ira incrementando con forme incrementa la cantidad de biogás en el RS, a tal punto que en el año 2024 ya se podría ingresar un segundo generador de 800 kW, que dotaría de energía a un total de 9503 hogares.

### 5.3 ENTORNO ECONOMICO

El análisis económico se deberá realizar con el VAN, la TIR y el PBP. Así pues, la Tabla 5.6 muestra el resultado de este análisis económico realizado por los autores [28], [77], para las generadoras Inga I y II e Iguanas respectivamente. Cabe señalar que la central Iguanas es solo una referencia ya que en la actualidad no está implementada.

**Tabla 5.6** *Análisis económico*

	<b>Inga I y II</b>	<b>Iguanas</b>	<b>Ceibales</b>
<b>VAN</b>	\$ 11 301 391.77	\$ 449 294.84	\$383 865.48
<b>TIR</b>	21%	45.64%	10%
<b>PBP</b>	3 años, 5 meses	3 años	9 años, 2 meses

Los valores de la Tabla 5.6 representan la rentabilidad de los proyectos de análisis, por otra parte, se puede observar que el VAN como la TIR cumplen con las condiciones para que un proyecto sea aceptado. Sin embargo, la planta Ceibales tiene la rentabilidad más baja con respecto a las otras dos plantas, el principal motivo son los ingresos por el despacho de energía eléctrica, pues las plantas Inga I y II y Pichacay tenían precios preferenciales, al momento que se realizaban los estudios, esto posibilitaban aún más su construcción. A pesar de esto, el proyecto ceibales es todavía un buen proyecto de inversión.

En lo referente al PBP, la central Ceibales tiene un periodo de recuperación mayor a seis años. Mientras las plantas Inga I y II e Iguanas, poseen un periodo de recuperación de tres años, un tiempo aceptable para cualquier proyecto. En todo caso, dependerá en gran medida de las políticas de gestión de la empresa o accionistas, encargados de poner en marcha el proyecto Ceibales.

### 5.4 ENTORNO DE MERCADO

El mercado usado para las transacciones de potencia eléctrica a nivel nacional, se dividen en: contratos regulados, transacciones de corto plazo y contratos que no son

liquidados por el CENACE. La Tabla 5.7 muestra un resumen por concepto de la venta de energía eléctrica en el 2018.

**Tabla 5.7** *Energía vendida por tipo de transacción* [18]

<b>Tipo de Transacción</b>	<b>Energía Vendida (GWh)</b>	<b>Valor (MUSD)</b>	<b>Precio medio (USD ¢/kWh)</b>
Contratos	23 180.81	693.46	2.99
T. de corto plazo	659.73	55.91	8.47
Otros	41.86	1.07	2.57
<b>Total</b>	<b>23 882.39</b>	<b>750.44</b>	<b>3.14</b>

La energía vendida por las empresas de generación a nivel nacional fue de 23 882.39 GWh, por un precio medio de 3.14 USD ¢/kWh, de las cuales el 62.58% son centrales hidroeléctricas. Al parecer, un escenario desfavorable para la planta Ceibales, pues el precio es de 7.3 USD ¢/kWh que está por encima del precio referencial.

En otro contexto, el nivel de tensión de la planta ceibales en media tensión es de 13.8 KV, pues el presunto comprador a donde se despachará la energía será la Empresa Eléctrica CNEL-El Oro y esta empresa tiene este nivel de tensión. Esta empresa, compro energía en el 2018 a un precio medio de 3.94 USD ¢/kWh, este valor incluye cargos por transmisión y otros rubros del mercado eléctrico [18].

La participación de la energía vendida por empresas que utilizan el biogás como materia prima es de 7.26 MW, proveniente de dos centrales, Inga I y II (Pichincha) y Pichacay (Azuay). En el 2018 genero 45.52 GWh, que representa el 0.08% de la energía bruta total producida a nivel nacional. Por tal motivo es considerada como una tecnología moderna y novedosa en el ámbito nacional. La Tabla 5.8 muestra los valores totales de la venta de energía de estas dos empresas de generación.

**Tabla 5.8** *Energía vendida por centrales de biogás* [18]

<b>Empresa</b>	<b>Energía Vendida (GWh)</b>	<b>Valor (MUSD)</b>	<b>Tipo de Transacción</b>	<b>Precio medio (USD ¢/kWh)</b>
Gasgreen	28.09	4.41	T. de corto plazo	15.04
EMAC-BGP	4.16	0.52	Contratos	11.08

El precio de la energía de las centrales de biogás es de 11.08 USD ¢/kWh para el caso de Pichacay; y 15.04 USD ¢/kWh para Inga I y II. Es necesario indicar que estos precios son debido a que dichas empresas de generación se acogieron a la Regulación

No. CONELEC 004/11, incentivando de esta manera su construcción. Cabe señalar el tipo de transacción de estas dos empresas, así pues, Pichacay está en el mercado de contratos, donde el valor de la energía ya se determina anticipadamente. Mientras el caso de la central Inga I y II funciona en transacciones de corto plazo, donde el costo de la energía depende del mercado SPOT.

También es importante detallar los factores de planta, para esto se considera un periodo de 8760 horas para las que operaron todo el año. La central Inga tiene un factor de 89,83%, mientras Pichacay 67.79%. El caso de la central Ceibales se impuso un factor de planta igual de 85% [18].

Ante este contexto, la central Ceibales será de 1.8 MW y competirá a un precio menor por despacho de energía, en comparación a las plantas de Pichacay e Inga I y II. Sin embargo, el precio por kWh estará por encima al que adquiere la Empresa Eléctrica CNEL-El Oro, además que es una tecnología renovable, teniendo, además, impactos políticos y medioambientales, facilitando de esta manera su implementación.

# CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se llevó a cabo la valoración de la producción de energía eléctrica a partir del biogás que se genera en el relleno sanitario Ceibales de la ciudad de Machala. Analizando diferentes modelos matemáticos, tecnologías convenientes a usar, como también el análisis técnico-económico, concluyendo lo siguiente.

i. La introducción de nuevas fuentes de energías renovables ha tenido un interés especial en el país. Con esto se busca disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir como tal el impacto ambiental que estos generan. El beneficio ambiental respecto al aprovechamiento del biogás se nota en la reducción de gases de efecto invernadero que se producen debido a la descomposición de los RSU en rellenos sanitarios.

ii. En el relleno sanitario Ceibales se está produciendo cantidades moderadas de  $\text{CH}_4$  que no se ha quemado, lo cual representa un daño ambiental y local. Las cantidades emitidas de  $\text{CH}_4$  pueden proveer una buena oportunidad para un proyecto de energía eléctrica a base de biogás. El aprovechamiento del biogás representaría un doble aporte i) recibir remuneraciones por la venta de energía y ii) representa un proyecto en la reducción de emisiones.

iii. En el relleno sanitario Ceibales se puede implementar un sistema de recolección de biogás para transformarlo en energía por medio de MCI. Una de las ventajas para la instalación de MCI en el relleno Ceibales es la altitud a la que se encuentra, debido a esto se puede aprovechar la mayoría de la potencia disponible. Cabe recalcar que los MCI al quemar el  $\text{CH}_4$  emiten cierta cantidad de  $\text{CO}_2$  a la atmosfera. Pero es recomendable incinerar el  $\text{CH}_4$ , debido a que si es liberado directamente a la atmósfera representa una contaminación 21 veces superior a la del  $\text{CO}_2$ .

iv. La potencia que se encuentra disponible en el año 2019 por medio de MCI es de 1 MW, con la cual se podría dotar de energía a 6022 hogares. Se estima que en el año 2024 se podrá implementar un segundo generador de 800 kW dando una potencia total para ese año de 1.8 MW, con la cual se espera brindar energía a 9503 hogares.

Los 1.8 MW estarán disponibles hasta el año 2040, posterior a ese año se verá necesario dejar en funcionamiento un solo generador, y a partir de dicho año solo estará disponible 1 MW. Una vez llegue el año 2050 se podría implementar generadores más pequeños o microturbinas debido a que el flujo a partir de esa fecha no será suficiente para los generadores de 1 MW.

v. El análisis económico realizado demostró la viabilidad económica del proyecto Ceibales. Esto indica que el uso de residuos como materia prima ofrece oportunidades rentables, gracias a su bajo costo con respecto a otras plantas. Un problema es el periodo de recuperación del capital, este periodo de recuperación se considera que es largo para un proyecto de generación.

vi. Si bien el costo por kWh es menor con respecto a otras centrales que utilizan biogás, la futura planta Ceibales ya no tendrá un precio referencial y tendrá que implementar modelos o convenios económicos con El CENACE, para establecer el despacho de energía eléctrica en 7.3 USD  $\phi$ /kWh y facilitar la construcción de la central, esto para una transacción por contrato.

vii. La ciudad de Machala al generar su propia energía por medio de biogás podrá disminuir costos por pago de esta, además, que la energía podrá estar disponible a varias localidades cercanas. El acceso a la energía eléctrica está directamente vinculado a la mejora en la calidad de vida de los habitantes, pudiendo ser una fuente de energía importante. Cuando se aprovecha el biogás emitido de los RS mejora la calidad del aire y disminuye los riesgos para la salud, tanto del personal, como de las localidades cercanas.

## **RECOMENDACIONES**

i. Si se llegase a optar por construir esta planta será necesario hacer un análisis más detallado, con mediciones reales de flujo de biogás que nos permita estimar la potencia real que está disponible.

ii. El relleno sanitario Ceibales debería considerar la implementación de un sistema en el cual se permitan obtener información más detallada de los tipos de residuos que ingresan al lugar. Esto con la finalidad de que en un futuro se pueda evaluar de una manera más precisa las cantidades de emisiones que se generan.

iii. El futuro inversionista debe conocer que el proyecto tiene un periodo de recuperación muy elevada, pues el PBP es mayor a 6 años, y es necesario una política que haga frente a este problema.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Upme Xabier y M. D. Marin, *Energías renovables y eficiencia energética*, 1ra Edició. 2008.
- [2] ONU, “Protocolo de Kioto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático”, 1998.
- [3] S. Cabro, “Las empresas que incumplan Kioto recibirán multas de hasta dos millones”, *El Pais*, Madrid, p. 2, 14-jul-2004.
- [4] F. M. León, “Enmienda internacional que prorroga el Protocolo de Kioto”, *El Tiempo.com*, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.tiempo.com/ram/192712/enmienda-internacional-que-prorroga-el-protocolo-de-kioto/>.
- [5] H. Carlino, “El Acuerdo de París y sus Implicaciones para América Latina y el Caribe”, 2016.
- [6] E. Rosero y B. Chilibingua, “Observatorio de Energías Renovables en América Latina y el Caribe”, Quito, 2011.
- [7] CONELEC, “Regulación sustitutiva a la Regulación 003/02”. pp. 1–5, 2002.
- [8] CONELEC, “Codificación Regulación No. CONELEC 004/04”. pp. 1–7, 2004.
- [9] CONELEC, “Codificación Regulación No. CONELEC – 009/06”. pp. 1–7, 2006.
- [10] CONELEC, “Codificación Regulación No. CONELEC 004/11”. 2011.
- [11] CONELEC, “Codificación Regulación No. CONELEC – 001/13”, pp. 1–23, 2010.
- [12] M. Orozco, “La energía renovable, sin reglas claras.”, *Lideres*, Quito, p. 5, 20-mar-2017.
- [13] ARCONEL, “Resolución No. ARCONEL-031/16”, 2016.
- [14] J. Molina y X. Serrano, “Diseño y Análisis Técnico Económico para Proyectos de Centrales Minihidráulicas”.
- [15] V. F. Sawin J, Seyboth K, “Energías Renovables 2016”, *Ren21*, p. 31, 2016.
- [16] R. D. Nasution, “Impacto socio-económico del proyecto hidroeléctrico coccodo sinclair, construido por la empresa china sinohydro, para la economía ecuatoriana”, vol. 3, núm. 2, pp. 54–67, 2015.
- [17] ARCONEL, “Centrales de generación hidráulica”, 2018.

- [18] ARCONEL, “Estadísticas anual y multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano”. 2018.
- [19] L. Merino, “Las energías Renovables”, *Haya Comun.*, p. 12, 2003.
- [20] D. Andagoya, C. Gallardo, G. Salazar, y H. Arcos, “Máxima Capacidad de Generación Eólica a ser Instalada en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano”, vol. 33, núm. 3, 2014.
- [21] ARCONEL, “Centrales de generación eólica, biomasa, biogás y fotovoltaica (MW)”, 2018.
- [22] Consejo Nacional de Electricidad, “Atlas Solar Del Ecuador Con Fines De Generación Eléctrica”, 2016.
- [23] M. Rodríguez Gámez, A. Vázquez Pérez, W. M. A. Saltos Arauz, y J. Ramos Guardarrama, “El Potencial Solar y la Generación Distribuida en la Provincia de Manabí en el Ecuador”, *Rev. Investig. en Energía, Medio Ambient. y Tecnol. RIEMAT ISSN 2588-0721*, vol. 2, núm. 2, p. 41, 2019.
- [24] Solar Plataform America Latina, “Solar Fotovoltaica Ecuador”, 2016.
- [25] M. Pacheco, “Terreno de El Aromo se usará para energía fotovoltaica, agricultura y reactivación económica”, *El Comercio*, Quito, p. 2, 21-mar-2019.
- [26] C. Juan y P. Silva, “Tecnologías del Biogas”, 2002.
- [27] EMAC-EP, “La Planta de Biogás en Pichacay iniciará su funcionamiento”, en *La Planta de Biogás en Pichacay iniciará su funcionamiento*, 2015, p. 1.
- [28] ARCONEL, “Proyecto de biogás Relleno Sanitario El Inga I y II”, Cuenca, 2018.
- [29] L. Castellanos, “Atlas del Sector Electrico Ecuatoriano 2018”, 2018.
- [30] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, “Centrales de generación térmica del SNI (MW)”, 2018.
- [31] Greenpeace Argentina, “Resumen de los impactos ambientales y sobre la salud de los rellenos sanitarios”, 2008.
- [32] I. Alarcon, “El 49% de municipios aun tienen botaderos”, 2018.
- [33] J. R. Brion, *Disposición final de residuos sólidos urbanos*, Tercera Ed. Buenos Aires/ Argentina: ANI - Academia Nacional de Ingeniería, 2004.
- [34] Y. Armas y G. Yeselga, “Estudio de la evaluación de impactos ambientales que generará la construcción del relleno sanitario de san miguel de Ibarra, en el sector las tolas de Socapamba”, Universidad Técnica del Norte, 2005.
- [35] CMIC, “Manual de especificaciones técnicas para la construcción de rellenos

- sanitarios para residuos sólidos urbanos (RSU) y residuos de manejo especial.”, Mexico, 2009.
- [36] E. Giraldo, “Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes”, *Rev. Ing.*, vol. 0, núm. 14, p. 44, 2014.
- [37] C. A. Zafra Mejía y V. H. Gutiérrez Gil, “Análisis de la producción de lixiviado y biogás bajo condiciones de extracción activa”, *Ingenium Rev. la Fac. Ing.*, vol. 16, núm. 31, p. 9, 2016.
- [38] J. M. Ramos Sánchez, “Manual de Monitoreo del Relleno sanitario Mallasa”, Bolivia, 2013.
- [39] J. Jaramillo y F. Cepeda, “Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales”, 1991.
- [40] H. George y S. A. Vigil, “Tecnologías empleadas en los rellenos sanitarios para la obtencion de metano”, España, 2006.
- [41] C. M. Wagner y S. B. Karin, “Generación y manejo de gases en sitios de disposición final”, *IngenieriaQuimica.org*, pp. 1–33, 2008.
- [42] U.S Environmental Protection Agency, “Estudio de prefactibilidad del potencial del biogás: Pichacay, Cuenca, Ecuador”, pp. 1–98, 2007.
- [43] A. Vélez y Y. Camargo, “Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios”, *II Simp. Iberoam. Ing. Residuos*, núm. September 2009, pp. 1–12, 2009.
- [44] G. M. Romero, “¿Que es el Biogas y poder calorifico?”, Alemania, 2017.
- [45] P. Martina, R. Aeberhard, J. Corace, E. García Solá, y Bucki Wasserman B, “Diseño y construcción de un calorímetro de junkers para determinación del poder calorífico del biogás”, *ASADES*, vol. 15, pp. 9–14, 2011.
- [46] F. Mitchell, “Gas Natural”, 2012.
- [47] M. T. Varnero Moreno, “Manual del Biogas”, Santiago de Chile, 2011.
- [48] S. A. Joao, Riitta Pipatti Per Svardal Joao Wagner, Qingxian Gao, y L. C. Carlos, “Eliminación de desechos solidos.”, vol. 5, Directrices del IPCC, Ed. Mexico, 2006, p. 56.
- [49] D. Á. López Arriaza, “Modelo para el diseño de sistemas de captacion y aprovechamiento de biogas producido en rellenos sanitarios.”, Universidad de Chile, 2016.
- [50] I. M. Idehai y C. N. Akujieze, “Estimation of landfill gas and its renewable energy potential in Lagos, Nigeria”, *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 6, núm.

- 3, pp. 329–343, 2015.
- [51] S. M. Gonzáles, “Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de RSU: Análisis de variables y modelización.”, Universidad de Oviedo, 2008.
- [52] A. Alexander, C. Burklin, y A. Singleton, “Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User’s Guide”, núm. May, p. 56, 2005.
- [53] M. E. Clavero Rodrigo, “BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU”, Universidad Politecnica de Valencia, 2016.
- [54] A. S. O. Ogunjuyigbe, T. R. Ayodele, y M. A. Alao, “Electricity generation from municipal solid waste in some selected cities of Nigeria: An assessment of feasibility, potential and technologies”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, núm. May 2016, pp. 149–162, 2017.
- [55] P. Aguilar, Q. Taboada y S. Ojeda, “Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás”, *Ingenieria*, vol. 15, núm. 1, pp. 37–45, 2011.
- [56] E. Urrego Martínez y J. P. Rodríguez Miranda, “Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás”, pp. 338–344, 2016.
- [57] A. V. Quetzalli, S. Ojeda Benítez, P. Taboada González, y M. Quintero Núñez, “Estimación de las constantes k y L0 de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en Baja California, México”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 28, núm. SUPPL 1, pp. 43–49, 2012.
- [58] J. L. Dávila, “Manual del Usuario Modelo Colombiano de Biogás”, 2009.
- [59] P. E. Escamilla García, “Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios”, *La Granja, Rev. Ciencias la Vida*, vol. 29, núm. 1, pp. 32–44, 2019.
- [60] O. N. Ortega, “Utilización de biogás como fuente de energía.”, *Tecnol. Cd. Juarez*, 2009.
- [61] M. J. Krause, G. W. Chickering, y T. G. Townsend, “Translating landfill methane generation parameters among first-order decay models”, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 66, núm. 11, pp. 1084–1097, 2016.
- [62] E. J. Lalvay Guamán y J. P. Vidal Jaramillo, ““Estudio Técnico – Económico De Una Planta De Generación Eléctrica a Base De Biogás.””, pp. 67–68, 2013.
- [63] C. A. Severiche Sierra y R. L. Acevedo Barrios, “Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación”, *Ingenium*

*Rev. la Fac. Ing.*, vol. 14, núm. 28, p. 6, 2017.

- [64] J. E. López Hernández, B. L. Ramírez Higareda, C. B. Gomes Cabral, y J. M. Morga Sagastume, *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*, 1ra Edicio. Mexico: GIZ México, 2017.
- [65] I. S.A, “Generacion y Control de Biogas”, Mexico, 2012, p. 21.
- [66] C. Leatherwood, “Tecnologias para aprovechamiento de biogas”, Guadalajara, 2009.
- [67] J. E. Arango Gómez, F. E. Sierra Vargas, y V. Silva Leal, “Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás”, vol. 18, núm. 39, pp. 152–164, 2014.
- [68] G. Blanco, E. Santalla, C. Córdoba, y A. Levy, “Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico”, *Banco Interam. Desarro.*, p. 52, 2017.
- [69] Q. Aguilar-Virgen, P. Taboada-González, y S. Ojeda-Benítez, “Analysis of the feasibility of the recovery of landfill gas: a case study of Mexico”, *J. Clean. Prod.*, vol. 79, pp. 53–60, sep. 2014.
- [70] E. Jiménez Coloma y E. Gonzalez Prieto, “Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás”, *PSE PROBIOGAS*, p. 29, 2010.
- [71] C. A. Romo Millares, C. Medrano Vaca, H. Romero Tehuitzil, J. L. Arvizu Fernández, J. Huacuz Villamar, y J. Beltrán Adán, “Generacion de electricidad mediante residuos solidos urbanos”, Mexico, 2012.
- [72] A. F. Panesso, J. A. Cadena, J. J. Mora Flórez, y M. del C. Ordoñez, “Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica”, *Sci. Tech.*, 2011.
- [73] W. Spark, “El clima promedio en Machala”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/19338/Clima-promedio-en-Machala-Ecuador-durante-todo-el-año>.
- [74] WorldClimate, “Precipitación promedio Machala”, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.worldclimate.com/cgi-bin/data.pl?ref=S03W079+2100+84248W>.
- [75] I. O. Vaca, “Datos Caracteristicos del RS Ceibales”, 2019.
- [76] E. V. Alcivar Cordova, “Manejo de los desechos solidos en la provincia del oro y su impacto ambiental en los ecosistemas”, Universidad Tecnica de Machala,

2013.

- [77] U.S Environmental Protection Agency, “Estudio de Prefactibilidad del Potencial del Biogás : Relleno Las Iguanas Guayaqui, Ecuador”, 2007.
- [78] U.S Environmental Protection Agency, “Evaluación del potencial de Biogás del Relleno Loja”, Loja, 2007.
- [79] L. Crisanto, “Estudio de factibilidad para implementar una central eléctrica aprovechando el biogás generado por el relleno sanitario del Inga”, Universidad Politecnica Salesiana, 2013.
- [80] U.S Environmental Protection Agency, “Evaluación del Potencial de Biogás del Relleno El Valle, Cuenca, Ecuador”, Cuenca, 2007.
- [81] L. M. O. Program, U.S. Environmental Protection Agency, “Evaluación del Potencial de Biogás del Relleno Chabay Azogues, Ecuador”, Cuenca, 2007.
- [82] J. Cadena, J. Mora L, y S. Pérez, “Análisis de viabilidad financiera de una central de generación de energía eléctrica a partir del biogás de vertedero”, *Sci. Tech.*, vol. XVII, núm. 51, pp. 1–7, 2012.
- [83] Caterpillar, “Series Gas Generator Sets CAT ® CG170”. p. 6, 2018.
- [84] Greenhouse, “Cogeneration World”, 2017.
- [85] Guascor, “Especificaciones Tecnicas de motores Guascor”, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.guasmex.com/descargas/motores/potencias-y-especificaciones-de-motores-guascor-a-gas.pdf>.
- [86] A. Barragán, J. Terrados, E. Zalamea, y P. Arias, “Electricity production using renewable resources in urban centres”, vol. 171, pp. 17–18, 2018.
- [87] A. Barragán Escandon, “El autoabastecimiento energético en los países en vías de desarrollo en el marco del metabolismo urbano: caso Cuenca, Ecuador”, Universidad de Jaén, 2018.
- [88] C. D. González, “Despacho económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia: modelado, simulación y análisis”, pp. 4–5, 2017.
- [89] S. Alzate, Á. Jaramillo, F. Villada, y B. Restrepo, “Assessment of Government Incentives for Energy from Waste in Colombia”, pp. 1–16, 2018.
- [90] IRENA, “Renewable energy technologies: cost analysis series”, núm. June, 2012.
- [91] F. González, F. Alberto, M. Ramón, y T. Humberto, “Modelo de toma de decisiones para la implementación de proyectos de generación eléctrica mediante energía geotérmica: caso Ecuador”, Universidad Politecnica

Salesiana, 2016.



# ANEXOS

## ANEXO A: DATOS CARACTERÍSTICOS DE LA CANTIDAD DE BASURA QUE INGRESA AL RS CEIBALES.

**Tabla A. 1** Registro de la cantidad de RSU que ingreso desde la apertura hasta el reciente año 2019.

Cantidad de RSU que recibió el RS Ceibales desde el año 2010 al 2019										
Meses	Año 2019	Año 2018	Año 2017	Año 2016	Año 2015	Año 2014	Año 2013	Año 2012	Año 2011	Año 2010
	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Enero	9123.52	8815.84	8543.42	8313.60	8123.21	7969.67	7850.92	7765.34	7711.75	
Febrero	9230.90	8492.19	7787.45	7172.34	6634.51	6163.55	5750.67	5388.45	5070.60	
Marzo	11625.57	10655.78	9728.61	8921.03	8216.18	7599.88	7060.20	6587.09	6172.04	
Abril	9261.34	8929.08	8632.54	8380.37	8169.09	7995.82	7858.20	7754.39	7682.96	
Mayo	12543.32	12251.13	12007.94	11817.62	11677.58	11585.91	11541.30	11543.03	11590.94	
Junio		8945.73	8669.30	8436.09	8242.90	8087.10	7966.59	7879.75	7825.37	
Julio		11143.48	10218.72	9411.57	8705.83	8087.83	7546.05	7070.74	6653.66	
Agosto		9004.28	8220.81	7538.40	6942.78	6422.00	5965.97	5566.18	5215.46	
Septiembre		8495.81	8213.66	7973.73	7772.70	7607.83	7476.90	7378.12	7310.16	
Octubre		8481.63	8313.27	8181.50	8084.55	8021.09	7990.21	7991.40	8024.57	8089.97
Noviembre		8673.05	8500.89	8366.15	8267.01	8202.11	8170.54	8171.76	8205.67	8272.55
Diciembre		11814.34	11421.97	11088.33	10808.78	10579.51	10397.43	10260.07	10165.56	10112.59
<b>Total</b>	<b>51784.65</b>	<b>115702.34</b>	<b>110258.58</b>	<b>105600.73</b>	<b>101645.11</b>	<b>98322.30</b>	<b>95574.97</b>	<b>93356.34</b>	<b>91628.75</b>	<b>26475.11</b>

## ANEXO B: DATOS RESPECTO A LA ESTIMACIÓN DE BIOGÁS

**Tabla B. 1** Estimación de biogás según modelo LandGem

Modelo LandGem							
Año	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año	Año	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año
2010	0	0	0	2056	9.74	584.16	5117243.95
2011	0.38	23.06	202040.57	2057	9.31	558.46	4892072.33
2012	1.70	101.87	892400.45	2058	8.90	533.88	4676808.83
2013	2.98	178.72	1565566.59	2059	8.51	510.39	4471017.46
2014	4.24	254.11	2226042.89	2060	8.13	487.93	4274281.43
2015	5.48	328.59	2878422.33	2061	7.77	466.46	4086202.29
2016	6.71	402.68	3527452.98	2062	7.43	445.94	3906399.10
2017	7.95	476.95	4178111.26	2063	7.11	426.31	3734507.70
2018	9.20	552.02	4835684.63	2064	6.79	407.55	3570179.96
2019	10.48	628.52	5505866.29	2065	6.49	389.62	3413083.05
2020	11.78	706.68	6190490.82	2066	6.21	372.48	3262898.80
2021	13.12	787.04	6894435.90	2067	5.93	356.09	3119323.04
2022	14.50	870.04	7621536.24	2068	5.67	340.42	2982064.97
2023	15.94	956.10	8375457.84	2069	5.42	325.44	2850846.60
2024	17.43	1045.63	9159705.38	2070	5.19	311.12	2725402.17
2025	18.98	1139.00	9977629.32	2071	4.96	297.43	2605477.61
2026	20.61	1236.58	10832432.69	2072	4.74	284.34	2490830.04
2027	22.31	1338.72	11727177.58	2073	4.53	271.83	2381227.24
2028	24.10	1445.75	12664791.35	2074	4.33	259.87	2276447.25
2029	25.97	1558.00	13648072.53	2075	4.14	248.43	2176277.84
2030	27.93	1675.76	14679696.54	2076	3.96	237.50	2080516.13
2031	29.99	1799.34	15762221.03	2077	3.78	227.05	1988968.18
2032	28.67	1720.16	15068643.61	2078	3.62	217.06	1901448.57
2033	27.41	1644.47	14405585.35	2079	3.46	207.51	1817780.05
2034	26.20	1572.11	13771703.31	2080	3.31	198.38	1737793.15
2035	25.05	1502.94	13165713.69	2081	3.16	189.65	1661325.87
2036	23.95	1436.80	12586389.13	2082	3.02	181.30	1588223.35
2037	22.89	1373.58	12032556.32	2083	2.89	173.33	1518337.52
2038	21.89	1313.14	11503093.54	2084	2.76	165.70	1451526.85
2039	20.92	1255.36	10996928.46	2085	2.64	158.41	1387656.01
2040	20.00	1200.12	10513035.91	2086	2.52	151.44	1326595.65
2041	19.12	1147.31	10050435.86	2087	2.41	144.77	1268222.11
2042	18.28	1096.83	9608191.37	2088	2.31	138.40	1212417.14
2043	17.48	1048.56	9185406.76	2089	2.21	132.31	1159067.73
2044	16.71	1002.42	8781225.73	2090	2.11	126.49	1108065.83
2045	15.97	958.31	8394829.68	2091	2.02	120.93	1059308.15
2046	15.27	916.15	8025436.04	2092	1.93	115.60	1012695.92
2047	14.60	875.83	7672296.64	2093	1.84	110.52	968134.75
2048	13.95	837.29	7334696.27	2094	1.76	105.65	925534.38
2049	13.34	800.45	7011951.17	2095	1.68	101.01	884808.54
2050	12.75	765.23	6703407.66	2096	1.61	96.56	845874.74
2051	12.19	731.56	6408440.84	2097	1.54	92.31	808654.12
2052	11.66	699.37	6126453.31	2098	1.47	88.25	773071.30
2053	11.14	668.59	5856873.93	2099	1.41	84.37	739054.22
2054	10.65	639.17	5599156.73	2100	1.34	80.65	706533.97
2055	10.18	611.05	5352779.73	2101	1.29	77.11	675444.70

**Tabla B. 2** Estimación de biogás según modelo IPCC

Año	Modelo IPCC						
	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año	Año	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año
2010	0.00	0.00	0.00	2056	7.95	477.05	4178920.82
2011	0.58	35.01	306699.32	2057	7.60	456.05	3995037.79
2012	2.49	149.31	1307964.24	2058	7.27	435.99	3819246.06
2013	4.07	244.33	2140296.39	2059	6.95	416.80	3651189.62
2014	5.65	339.15	2970914.57	2060	6.64	398.46	3490528.08
2015	7.13	428.05	3749703.82	2061	6.35	380.93	3336936.06
2016	8.53	511.83	4483588.09	2062	6.07	364.17	3190102.47
2017	9.85	591.22	5179068.10	2063	5.80	348.14	3049729.92
2018	11.12	666.93	5842306.82	2064	5.55	332.82	2915534.13
2019	12.33	739.64	6479210.86	2065	5.30	318.18	2787243.28
2020	13.49	809.51	7091275.55	2066	5.07	304.18	2664597.56
2021	14.62	877.02	7682684.11	2067	4.85	290.79	2547348.56
2022	15.71	942.49	8256200.31	2068	4.63	278.00	2435258.81
2023	16.77	1006.18	8814108.59	2069	4.43	265.76	2328101.29
2024	17.80	1068.30	9358271.01	2070	4.23	254.07	2225658.97
2025	18.82	1129.02	9890178.99	2071	4.05	242.89	2127724.37
2026	19.81	1188.47	10411000.02	2072	3.87	232.20	2034099.14
2027	20.78	1246.76	10921619.98	2073	3.70	221.99	1944593.65
2028	21.73	1303.96	11422681.28	2074	3.54	212.22	1859026.64
2029	22.67	1360.12	11914617.19	2075	3.38	202.88	1777224.78
2030	23.59	1415.26	12397682.73	2076	3.23	193.95	1699022.42
2031	24.49	1469.40	12871982.33	2077	3.09	185.42	1624261.15
2032	23.41	1404.75	12305582.70	2078	2.95	177.26	1552789.57
2033	22.38	1342.93	11764106.07	2079	2.82	169.46	1484462.92
2034	21.40	1283.84	11246455.78	2080	2.70	162.00	1419142.81
2035	20.46	1227.35	10751583.41	2081	2.58	154.87	1356696.96
2036	19.56	1173.34	10278486.66	2082	2.47	148.06	1296998.87
2037	18.70	1121.71	9826207.37	2083	2.36	141.54	1239927.66
2038	17.87	1072.35	9393829.50	2084	2.26	135.32	1185367.72
2039	17.09	1025.17	8980477.34	2085	2.16	129.36	1133208.55
2040	16.33	980.06	8585313.73	2086	2.06	123.67	1083344.52
2041	15.62	936.93	8207538.30	2087	1.97	118.23	1035674.64
2042	14.93	895.71	7846385.95	2088	1.88	113.03	990102.34
2043	14.27	856.29	7501125.21	2089	1.80	108.05	946535.35
2044	13.64	818.61	7171056.81	2090	1.72	103.30	904885.41
2045	13.04	782.59	6855512.25	2091	1.65	98.75	865068.17
2046	12.47	748.16	6553852.45	2092	1.57	94.41	827002.99
2047	11.92	715.24	6265466.44	2093	1.50	90.25	790612.78
2048	11.40	683.76	5989770.14	2094	1.44	86.28	755823.83
2049	10.89	653.68	5726205.17	2095	1.37	82.48	722565.68
2050	10.42	624.91	5474237.72	2096	1.31	78.86	690770.97
2051	9.96	597.42	5233357.48	2097	1.26	75.39	660375.30
2052	9.52	571.13	5003076.57	2098	1.20	72.07	631317.13
2053	9.10	546.00	4782928.60	2099	1.15	68.90	603537.58
2054	8.70	521.97	4572467.70	2100	1.10	65.87	576980.41
2055	8.32	499.00	4371267.61	2101	1.05	62.97	551591.82

**Tabla B. 3** Estimación de biogás según modelo ecuatoriano

Año	Modelo ecuatoriano						
	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año	Año	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año
2010	0	0	0	2056	8.73	523.99	1923467.82
2011	0.44	26.60	141167.13	2057	8.28	496.94	1838830.40
2012	1.95	117.28	602027.95	2058	7.85	471.29	1757917.23
2013	3.42	205.02	985132.63	2059	7.45	446.96	1680564.44
2014	4.84	290.46	1367448.40	2060	7.06	423.89	1606615.38
2015	6.24	374.25	1725908.42	2061	6.70	402.01	1535920.25
2016	7.62	457.06	2063699.64	2062	6.35	381.26	1468335.89
2017	8.99	539.56	2383814.21	2063	6.03	361.58	1403725.42
2018	10.37	622.48	2689088.80	2064	5.72	342.91	1341957.96
2019	11.78	706.60	2982242.10	2065	5.42	325.21	1282908.43
2020	13.20	792.15	3263962.38	2066	5.14	308.42	1226457.23
2021	14.66	879.80	3536175.08	2067	4.88	292.50	1172490.03
2022	16.17	970.05	3800152.31	2068	4.62	277.40	1120897.51
2023	17.72	1063.38	4056945.55	2069	4.38	263.08	1059308.15
2024	19.34	1160.26	4307411.87	2070	3.96	237.50	2080516.13
2025	21.02	1261.11	4552237.73	2071	3.78	227.05	1988968.18
2026	22.77	1366.35	4791960.50	2072	3.62	217.06	1901448.57
2027	24.61	1476.37	5026987.94	2073	3.46	207.51	1817780.05
2028	26.53	1591.54	5257615.74	2074	3.31	198.38	1737793.15
2029	28.54	1712.20	5484043.31	2075	3.16	189.65	1661325.87
2030	30.64	1838.70	5706388.04	2076	3.02	181.30	1588223.35
2031	32.86	1971.34	5924698.00	2077	2.89	173.33	1518337.52
2032	31.16	1869.58	5663996.37	2078	2.76	165.70	1451526.85
2033	29.55	1773.08	5414766.26	2079	2.64	158.41	1387656.01
2034	28.03	1681.55	5176502.91	2080	2.52	151.44	1326595.65
2035	26.58	1594.75	4948723.75	2081	2.41	144.77	1268222.11
2036	25.21	1512.43	4730967.44	2082	2.31	138.40	1212417.14
2037	23.91	1434.36	4522792.96	2083	2.21	132.31	1159067.73
2038	22.67	1360.31	4323778.68	2084	2.11	126.49	1108065.83
2039	21.50	1290.09	4133521.53	2085	2.02	120.93	1059308.15
2040	20.39	1223.50	3951636.17	2086	1.93	115.60	1012695.92
2041	19.34	1160.34	3777754.23	2087	1.84	110.52	968134.75
2042	18.34	1100.45	3611523.53	2088	1.76	105.65	925534.38
2043	17.39	1043.64	3452607.40	2089	1.68	101.01	884808.54
2044	16.50	989.77	3300683.98	2090	1.61	96.56	845874.74
2045	15.64	938.68	3155445.58	2091	1.54	92.31	808654.12
2046	14.84	890.22	3016598.02	2092	1.47	88.25	773071.30
2047	14.07	844.27	2883860.12	2093	1.41	84.37	739054.22
2048	13.34	800.69	2756963.01	2094	1.34	80.65	706533.97
2049	12.66	759.36	2635649.69	2095	1.29	77.11	675444.70
2050	12.00	720.16	2519674.47	2096	1.26	75.39	660375.30
2051	11.38	682.98	2408802.45	2097	1.20	72.07	631317.13
2052	10.80	647.73	2302809.07	2098	1.15	68.90	603537.58
2053	10.24	614.29	2201479.68	2099	1.10	65.87	576980.41
2054	9.71	582.58	2104609.03	2100	1.05	62.97	551591.82
2055	9.21	552.51	2012000.93	2101	1.03	61.57	539353.54

**Tabla B. 4 Producción promedio de biogás**

Producción Promedio de biogás							
Año	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año	Año	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año
2010	0.00	0.00	0.00	2056	8.81	528.40	4628769.80
2011	0.47	28.22	247249.94	2057	8.40	503.82	4413437.17
2012	2.05	122.82	1075926.61	2058	8.01	480.39	4208181.36
2013	3.49	209.36	1833960.28	2059	7.63	458.05	4012527.91
2014	4.91	294.57	2580476.40	2060	7.28	436.76	3826024.82
2015	6.28	376.96	3302198.68	2061	6.94	416.47	3648241.53
2016	7.62	457.19	4004954.86	2062	6.62	397.12	3478767.86
2017	8.93	535.91	4694575.81	2063	6.31	378.68	3317213.04
2018	10.23	613.81	5376983.76	2064	6.02	361.10	3163204.78
2019	11.53	691.59	6058287.46	2065	5.74	344.34	3016388.43
2020	12.82	769.44	6740336.26	2066	5.47	328.36	2876426.10
2021	14.13	847.95	7428052.51	2067	5.22	313.13	2742995.86
2022	15.46	927.53	8125121.18	2068	4.98	298.61	2615791.01
2023	16.81	1008.55	8834934.53	2069	4.75	284.76	2494519.35
2024	18.19	1091.39	9560617.53	2070	4.46	267.56	2343859.09
2025	19.61	1176.38	10305051.23	2071	4.26	255.79	2240723.39
2026	21.06	1263.80	11070894.16	2072	4.08	244.53	2142125.92
2027	22.57	1353.95	11860601.97	2073	3.90	233.77	2047866.98
2028	24.12	1447.08	12676445.41	2074	3.72	223.49	1957755.68
2029	25.72	1543.44	13520526.78	2075	3.56	213.65	1871609.50
2030	27.39	1643.24	14394795.01	2076	3.40	204.25	1789253.97
2031	29.11	1746.70	15301059.40	2077	3.25	195.27	1710522.29
2032	27.75	1664.83	14583925.63	2078	3.11	186.67	1635255.00
2033	26.45	1586.83	13900611.01	2079	2.97	178.46	1563299.66
2034	25.21	1512.50	13249510.59	2080	2.84	170.61	1494510.54
2035	24.03	1441.68	12629096.04	2081	2.72	163.10	1428748.31
2036	22.90	1374.19	12037912.02	2082	2.60	155.92	1365879.79
2037	21.83	1309.88	11474572.64	2083	2.48	149.06	1305777.64
2038	20.81	1248.60	10937758.17	2084	2.38	142.50	1248320.13
2039	19.84	1190.21	10426211.79	2085	2.27	136.23	1193390.90
2040	18.91	1134.56	9938736.62	2086	2.17	130.24	1140878.70
2041	18.03	1081.53	9474192.86	2087	2.08	124.51	1090677.16
2042	17.18	1030.99	9031495.00	2088	1.98	119.03	1042684.62
2043	16.38	982.83	8609609.24	2089	1.90	113.79	996803.87
2044	15.62	936.94	8207551.03	2090	1.81	108.78	952941.99
2045	14.89	893.19	7824382.69	2091	1.73	104.00	911010.15
2046	14.19	851.51	7459211.16	2092	1.66	99.42	870923.40
2047	13.53	811.78	7111185.87	2093	1.58	95.05	832600.58
2048	12.90	773.92	6779496.70	2094	1.51	90.86	795964.06
2049	12.30	737.83	6463372.07	2095	1.45	86.87	760939.64
2050	11.72	703.43	6162077.06	2096	1.39	83.60	732340.34
2051	11.18	670.65	5874911.66	2097	1.33	79.92	700115.52
2052	10.66	639.41	5601209.14	2098	1.27	76.41	669308.67
2053	10.16	609.63	5340334.42	2099	1.22	73.04	639857.40
2054	9.69	581.24	5091682.54	2100	1.16	69.83	611702.07
2055	9.24	554.19	4854677.30	2101	1.12	67.21	588796.69

**Tabla B. 5** Producción de biogás que se estima recuperable.

Biogás Recuperable							
Año	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año	Año	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /año
2010	0.00	0.00	0.00	2056	6.25	375.16	3286426.55
2011	0.33	20.04	175547.46	2057	5.96	357.71	3133540.39
2012	1.45	87.20	763907.89	2058	5.68	341.07	2987808.77
2013	2.48	148.64	1302111.80	2059	5.42	325.22	2848894.81
2014	3.49	209.15	1832138.25	2060	5.17	310.10	2716477.62
2015	4.46	267.64	2344561.06	2061	4.93	295.69	2590251.49
2016	5.41	324.60	2843517.95	2062	4.70	281.95	2469925.18
2017	6.34	380.50	3333148.82	2063	4.48	268.86	2355221.26
2018	7.26	435.81	3817658.47	2064	4.27	256.38	2245875.39
2019	8.18	491.03	4301384.10	2065	4.07	244.48	2141635.79
2020	9.11	546.31	4785638.75	2066	3.89	233.13	2042262.53
2021	10.03	602.05	5273917.28	2067	3.71	222.32	1947527.06
2022	10.98	658.54	5768836.04	2068	3.53	212.01	1857211.62
2023	11.93	716.07	6272803.52	2069	3.37	202.18	1771108.74
2024	12.91	774.89	6788038.45	2070	3.17	189.97	1664139.95
2025	13.92	835.23	7316586.37	2071	3.03	181.61	1590913.61
2026	14.95	897.30	7860334.86	2072	2.89	173.62	1520909.40
2027	16.02	961.30	8421027.40	2073	2.77	165.98	1453985.56
2028	17.12	1027.43	9000276.24	2074	2.64	158.68	1390006.53
2029	18.26	1095.84	9599574.02	2075	2.53	151.69	1328842.74
2030	19.45	1166.70	10220304.46	2076	2.42	145.02	1270370.32
2031	20.67	1240.15	10863752.18	2077	2.31	138.64	1214470.82
2032	19.70	1182.03	10354587.20	2078	2.21	132.54	1161031.05
2033	18.78	1126.65	9869433.82	2079	2.11	126.71	1109942.76
2034	17.90	1073.88	9407152.52	2080	2.02	121.13	1061102.48
2035	17.06	1023.59	8966658.19	2081	1.93	115.80	1014411.30
2036	16.26	975.68	8546917.53	2082	1.85	110.70	969774.65
2037	15.50	930.02	8146946.58	2083	1.76	105.83	927102.12
2038	14.78	886.51	7765808.30	2084	1.69	101.18	886307.30
2039	14.08	845.05	7402610.37	2085	1.61	96.72	847307.54
2040	13.43	805.54	7056503.00	2086	1.54	92.47	810023.88
2041	12.80	767.89	6726676.93	2087	1.47	88.40	774380.79
2042	12.20	732.00	6412361.45	2088	1.41	84.51	740306.08
2043	11.63	697.81	6112822.56	2089	1.35	80.79	707730.75
2044	11.09	665.22	5827361.23	2090	1.29	77.24	676588.81
2045	10.57	634.17	5555311.71	2091	1.23	73.84	646817.20
2046	10.08	604.57	5296039.92	2092	1.18	70.59	618355.62
2047	9.61	576.36	5048941.97	2093	1.12	67.48	591146.41
2048	9.16	549.48	4813442.66	2094	1.08	64.51	565134.48
2049	8.73	523.86	4588994.17	2095	1.03	61.67	540267.14
2050	8.32	499.44	4375074.71	2096	0.99	59.36	519961.64
2051	7.94	476.16	4171187.28	2097	0.95	56.74	497082.02
2052	7.57	453.98	3976858.49	2098	0.90	54.25	475209.16
2053	7.21	432.84	3791637.44	2099	0.86	51.86	454298.76
2054	6.88	412.68	3615094.61	2100	0.83	49.58	434308.47
2055	6.56	393.47	3446820.88	2101	0.80	47.72	418045.65

## ANEXO C: ESTIMACIÓN DE ENERGÍA Y POTENCIA

Tabla C. 1 Cantidad de energía disponible mediante motores de combustión interna

Año	Energía disponible en el relleno sanitario Ceibales						
	kW h/ año	kW h/ mes	kW h/ día	Año	kW h/ año	kW h/ mes	kW h/ día
2010	0.00	0.00	0.00	2056	6625435.93	552119.66	18151.88
2011	353903.67	29491.97	969.60	2057	6317217.43	526434.79	17307.45
2012	1540038.31	128336.53	4219.28	2058	6023422.48	501951.87	16502.53
2013	2625057.39	218754.78	7191.94	2059	5743371.95	478614.33	15735.27
2014	3693590.70	307799.23	10119.43	2060	5476418.89	456368.24	15003.89
2015	4726635.11	393886.26	12949.69	2061	5221947.00	435162.25	14306.70
2016	5732532.18	477711.02	15705.57	2062	4979369.17	414947.43	13642.11
2017	6719628.03	559969.00	18409.94	2063	4748126.05	395677.17	13008.56
2018	7696399.47	641366.62	21086.03	2064	4527684.79	377307.07	12404.62
2019	8671590.34	722632.53	23757.78	2065	4317537.75	359794.81	11828.87
2020	9647847.71	803987.31	26432.46	2066	4117201.26	343100.10	11280.00
2021	10632217.24	886018.10	29129.36	2067	3926214.55	327184.55	10756.75
2022	11629973.46	969164.45	31862.94	2068	3744138.62	312011.55	10257.91
2023	12645971.89	1053830.99	34646.50	2069	3570555.21	297546.27	9782.34
2024	13684685.51	1140390.46	37492.29	2070	3354906.15	279575.51	9191.52
2025	14750238.13	1229186.51	40411.61	2071	3207281.83	267273.49	8787.07
2026	15846435.07	1320536.26	43414.89	2072	3066153.35	255512.78	8400.42
2027	16976791.24	1414732.60	46511.76	2073	2931234.88	244269.57	8030.78
2028	18144556.91	1512046.41	49711.11	2074	2802253.17	233521.10	7677.41
2029	19352741.22	1612728.43	53021.21	2075	2678946.97	223245.58	7339.58
2030	20604133.78	1717011.15	56449.68	2076	2561066.56	213422.21	7016.62
2031	21901324.39	1825110.37	60003.63	2077	2448373.18	204031.10	6707.87
2032	20874847.79	1739570.65	57191.36	2078	2340638.59	195053.22	6412.71
2033	19896778.58	1658064.88	54511.72	2079	2237644.60	186470.38	6130.53
2034	18964819.47	1580401.62	51958.41	2080	2139182.61	178265.22	5860.77
2035	18076782.90	1506398.58	49525.43	2081	2045053.18	170421.10	5602.89
2036	17230585.74	1435882.15	47207.08	2082	1955065.69	162922.14	5356.34
2037	16424244.30	1368687.03	44997.93	2083	1869037.88	155753.16	5120.65
2038	15655869.53	1304655.79	42892.79	2084	1786795.51	148899.63	4895.33
2039	14923662.50	1243638.54	40886.75	2085	1708172.01	142347.67	4679.92
2040	14225910.05	1185492.50	38975.10	2086	1633008.14	136084.01	4473.99
2041	13560980.69	1130081.72	37153.37	2087	1561151.67	130095.97	4277.13
2042	12927320.68	1077276.72	35417.32	2088	1492457.06	124371.42	4088.92
2043	12323450.28	1026954.19	33762.88	2089	1426785.19	118898.77	3909.00
2044	11747960.25	978996.69	32186.19	2090	1364003.05	113666.92	3736.99
2045	11199508.41	933292.37	30683.58	2091	1303983.48	108665.29	3572.56
2046	10676816.48	889734.71	29251.55	2092	1246604.92	103883.74	3415.36
2047	10178667.00	848222.25	27886.76	2093	1191751.17	99312.60	3265.07
2048	9703900.40	808658.37	26586.03	2094	1139311.12	94942.59	3121.40
2049	9251412.25	770951.02	25346.33	2095	1089178.56	90764.88	2984.05
2050	8820150.62	735012.55	24164.80	2096	1048242.66	87353.56	2871.90
2051	8409113.56	700759.46	23038.67	2097	1002117.35	83509.78	2745.53
2052	8017346.72	668112.23	21965.33	2098	958021.66	79835.14	2624.72
2053	7643941.07	636995.09	20942.30	2099	915866.29	76322.19	2509.22
2054	7288030.72	607335.89	19967.21	2100	875565.87	72963.82	2398.81
2055	6948790.90	579065.91	19037.78	2101	842780.03	70231.67	2308.99

**Tabla C. 2** *Potencia disponible por año mediante MCI.*

Potencia disponible del elemento generador			
Año	kW	Año	kW
2010	0.00	2056	889.80
2011	47.53	2057	848.40
2012	206.83	2058	808.95
2013	352.55	2059	771.34
2014	496.05	2060	735.48
2015	634.79	2061	701.31
2016	769.88	2062	668.73
2017	902.45	2063	637.67
2018	1033.63	2064	608.07
2019	1164.60	2065	579.85
2020	1295.71	2066	552.94
2021	1427.91	2067	527.29
2022	1561.91	2068	502.84
2023	1698.36	2069	479.53
2024	1837.86	2070	450.56
2025	1980.96	2071	430.74
2026	2128.18	2072	411.79
2027	2279.99	2073	393.67
2028	2436.82	2074	376.34
2029	2599.08	2075	359.78
2030	2767.14	2076	343.95
2031	2941.35	2077	328.82
2032	2803.50	2078	314.35
2033	2672.14	2079	300.52
2034	2546.98	2080	287.29
2035	2427.72	2081	274.65
2036	2314.07	2082	262.57
2037	2205.78	2083	251.01
2038	2102.59	2084	239.97
2039	2004.25	2085	229.41
2040	1910.54	2086	219.31
2041	1821.24	2087	209.66
2042	1736.14	2088	200.44
2043	1655.04	2089	191.62
2044	1577.75	2090	183.19
2045	1504.10	2091	175.13
2046	1433.90	2092	167.42
2047	1367.00	2093	160.05
2048	1303.24	2094	153.01
2049	1242.47	2095	146.28
2050	1184.55	2096	140.78
2051	1129.35	2097	134.58
2052	1076.73	2098	128.66
2053	1026.58	2099	123.00
2054	978.78	2100	117.59
2055	933.22	2101	113.19

## ANEXO D: ANÁLISIS RESPECTO A LA VIABILIDAD ECONÓMICA.

**Tabla D. 1** *Análisis Económico planta de 1MW*

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Inversión</b>	-2 505 530.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Tasa de inversión</b>	0.086	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ingresos</b>	-	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87	513 140.87
<b>Egresos</b>	-	-185 409.24	-185 409.24	-185 409.24	-185 409.24	-185 409.24	-185 409.24	-185 409.2	-185 409.24	-185 409.2	-185 409.2	-185 409.24	-185 409.2	-185 409.2	-185 409.24	-185 409.24
<b>Flujo de caja</b>	-2 505 530.27	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63	327 731.63
<b>VAN</b>	-	\$-2 203 751.6	\$-1 925 870.7	\$-1 669 995.1	\$-1 434 382.2	\$-1 217 427.4	\$-1 017 653.2	\$-833 699.0	\$-664 312.2	\$-508 339.0	\$-364 717.3	\$-232 468.97	\$-110 693.32	<b>\$1438.95</b>	<b>\$104 691.50</b>	<b>\$199 767.52</b>
<b>TIR</b>	-	<b>-87%</b>	<b>-57%</b>	<b>-35%</b>	<b>-22%</b>	<b>-13%</b>	<b>-7%</b>	<b>-2%</b>	<b>1%</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>	<b>7%</b>	<b>8%</b>	<b>9%</b>	<b>9%</b>	<b>10%</b>

**Tabla D. 2** *Análisis Económico planta de 1.8 MW*

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Inversión</b>	-3 893 624.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Tasa de inversión</b>	0.086	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ingresos</b>	-	543 620.51	543 620.51	543 620.51	543 620.51	978 516.91	978 516.91	978 516.91	978 516.91	978 516.91	978 516.91	978 516.91	978 516.91	978 516.91	978 516.91	978 516.91
<b>Egresos</b>	-	-288 128.19	-288 128.19	-288 128.19	-288 128.19	-288 128.19	-288 128.19	-288 128.19	-288 128.19	-288 128.19	-288 128.1	-288 128.1	-288 128.1	-288 128.1	-288 128.1	-288 128.1
<b>Flujo de caja</b>	-3 893 624.2	255 492.32	255 492.32	255 492.32	255 492.32	690 388.72	690 388.72	690 388.72	690 388.72	690 388.72	690 388.72	690 388.72	690 388.72	690 388.72	690 388.72	690 388.72
<b>VAN</b>	-	\$-3 658 364.2	\$-3 441 734.4	\$-3 242 259.5	\$-3 058 580.9	\$-2 601 551.0	\$-2 180 713.2	\$-1 793 201.4	\$-1 436 376.6	\$-1 107 808.6	\$-805 259.8	\$-526 669.7	\$-270 141.1	\$-33 927.0	<b>\$183 581.4</b>	<b>\$383 865.4</b>
<b>TIR</b>	-	<b>-93%</b>	<b>-71%</b>	<b>-52%</b>	<b>-38%</b>	<b>-20%</b>	<b>-10%</b>	<b>-5%</b>	<b>-1%</b>	<b>2%</b>	<b>5%</b>	<b>6%</b>	<b>7%</b>	<b>8%</b>	<b>9%</b>	<b>10%</b>

