

**ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS QUE
SE PRODUCE EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO” Y SU
ADAPTABILIDAD EN UN ENTORNO DE UNA MICRORED ELÉCTRICA.**

**YOHANA CAROLINA GALVIS SILVA
LEONARDO GOMEZ ARIZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

**ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS QUE
SE PRODUCE EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO” Y SU
ADAPTABILIDAD EN UN ENTORNO DE UNA MICRORED ELÉCTRICA.**

**YOHANA CAROLINA GALVIS SILVA
LEONARDO GOMEZ ARIZA**

**Trabajo de Grado para optar el título de
Ingenieros Electricistas**

**Director:
GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA
Ingeniero Electricista, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

Existe más de una persona a la que me gustaría agradecer su apoyo, amistad, compañía y ánimo en las diversas etapas de mi vida, las cuales de una u otra forma han influido para que este proyecto sea hoy una realidad:

A Dios, por darme las fuerzas, la motivación y el empeño necesarios.

A mi madre Sandra Silva Angulo y a mi padre Alirio Galvis Guarguati, por su amor, apoyo, motivación, comprensión y sobre todo por la confianza depositada en mí.

Ustedes son la base que ha permitido construir todo mi proceso de crecimiento tanto académico como humano, con su gran ayuda he culminado mis estudios, por eso quiero expresarles que este triunfo es nuestro.

A mi hermano Andrés Felipe Galvis Silva, por su incondicional cariño, amistad y compañía. Espero que la vida tenga preparado para ti algo tan grande como tu corazón.

A mis abuelos, Matilde Angulo, Isabel Guarguati y Alfredo Galvis (Q.E.P.D), por ser mis segundos padres.

A mis tíos y primos por su cariño y ayuda prestada.

A Julio Cesar por su cariño, compañía y ayuda. Gracias por ser el diseñador de los momentos más especiales.

A mi compañero de proyecto Leonardo, por el esfuerzo y el trabajo dedicado.

A mis amigos y compañeros de vida: Estefanía, Paloma, Katerin, Diana, John, Jeison, Piña, Jairo y Juan Manuel. Gracias por estos años de alegrías y tristezas.

Y por último a todas las personas allegadas que han contribuido e influenciado mi vida.

YOHANA CAROLINA GALVIS SILVA

DEDICATORIA

Este trabajo no habría sido posible sin la influencia directa o indirecta de muchas personas a las que agradezco profundamente por estar presentes en las distintas etapas de su elaboración, así como en el resto de mi vida.

A Dios por enseñarme el camino de la sabiduría, haberme ayudado durante estos años, el sacrificio fue grande pero tú siempre me diste la fuerza necesaria para continuar y lograrlo, este triunfo también es tuyo.

A mi familia y seres más queridos, en especial a mi mamá Leonor Ariza, por no perderse un sólo día de mi vida alegrándola con su particular modo de ver, de ser y hacer en su constante, difícil y poco reconocida labor de ser la mejor mamá que cualquiera pudiera siquiera imaginar...

A mis hermanas Laura Yesenia Gómez y Ada luz Gómez. Con su gran ejemplo y excelencia, supieron inspirarme para alcanzar la disciplina necesaria para lograr mis metas.

A Jenny Vanesa Bonilla (Osii) mi mejor amiga quien con su alegría y gran corazón conocí la felicidad de compartir y vivir los sueños.

A mis amigos y compañeros especialmente Yohana Carolina Galvis quien trabajo conmigo hombro a hombro poniendo lo mejor de su energía y empeño por el bien de nuestra formación profesional, a quienes compartieron su confianza, tiempo, y los mejores momentos que viví durante esta etapa como estudiante, dentro y fuera de la universidad.

Por último a todos los docentes de la Universidad Industrial de Santander que compartieron sus conocimientos, dentro y fuera de clase, haciendo posible que mi formación profesional se resuma en satisfacciones académicas e inquietudes insatisfechas en continua indagación.

A todos aquellos que ya no están, y me acompañan siempre sin importar en dónde me encuentre.

LEONARDO GOMEZ ARIZA

AGRADECIMIENTOS

Los Autores de este proyecto agradecen a:

La **Universidad Industrial de Santander** y a la **Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones** por permitir nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestro Director **Gabriel Ordóñez Plata** por brindarnos la orientación, el tiempo y la experiencia necesaria para apoyarnos durante la elaboración de este proyecto.

A nuestro co-director **Alvaro Alyamani Triana** por brindarnos su tiempo, colaboración y las observaciones necesarias para hacer exitoso este proceso.

Al **relleno sanitario “El Carrasco”**, por permitirnos hacer las visitas técnicas y en especial al Ingeniero **Oscar Soto** y al trabajador **Rubén Amaya** por su buena disposición, su valiosa ayuda y la información suministrada.

A **Capastone Turbine Corporation**, en especial al Ingeniero **Carlos Villalobos** por su tiempo y dedicación en la resolución de dudas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. FORMULACION DEL PROBLEMA	23
3. MARCO TEORICO	25
3.1 BIOGÁS	27
3.2 APLICACIONES DEL BIOGÁS	32
3.2.1 Producción de calor	34
3.2.2 Generación de energía eléctrica	35
3.2.3 Combustible para vehículos	39
3.2.4 Red local de gas	39
3.2.5 Cogeneración	39
3.2.6 Trigeneración	40
3.3 MICRORED ELÉCTRICA	40
4. EJEMPLOS MUNDIALES DE APLICACIONES DE BIOGÁS DE VERTEDERO	43
4.1 RELLENO SANITARIO “PUENTE HILL”, ESTADOS UNIDOS.	46
4.2 RELLENO SANITARIO “HUAYCOLORO”, PERÚ.	50
4.3 PLANTA DE BASURA CERO DE MALMÖ, SUECIA.	55
5. RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”, SIMULACIÓN DE POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS Y ALTERNATIVAS PARA SU APROVECHAMIENTO	60
5.1 ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL DEL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”.	60
5.2 BIOGÁS PRODUCIDO EN “EL CARRASCO”	67

5.3 SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”.	73
5.3.1. Descripción del modelo colombiano de biogás, aplicado al relleno sanitario “El Carrasco”	77
5.3.2. Índice de generación de metano (k) y generación potencial de metano (Lo)	80
5.3.3. Estimación de eficiencia, captura y recuperación de biogás	84
5.4. RESULTADOS DE CAPTURA Y EXTRACCIÓN DEL BIOGÁS.	88
5.5 ALTERNATIVAS DE USO PARA EL BIOGÁS QUE SE PRODUCE EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”.	95
5.5.1 Alternativas de solución a corto plazo	98
5.5.2 Alternativas de solución a largo plazo	110
6. FUTUROS DESARROLLOS	113
7. CONCLUSIONES	115
BIBLIOGRAFIA	119

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Equivalencias energéticas del biogás.	29
Figura 2. Vertedero controlado.	30
Figura 3. Fases de generación del biogás de vertedero.	31
Figura 4. Tecnologías y aplicaciones del biogás.	33
Figura 5. Funcionamiento de motores de combustión.	36
Figura 6. Aprovechamiento energético de la cogeneración.	40
Figura 7. Microred eléctrica..	41
Figura 8. Relleno Sanitario “Puente Hills”.	47
Figura 9. Botadero de “Tumbes	51
Figura 10. Botadero de” Chimbote”	51
Figura 11. Esquema general del Relleno Sanitario “Huaycoloro”.	54
Figura 12. Energía entregada por el Relleno Sanitario “Huaycoloro” al SEIN en el 2012.	55
Figura 13. Esquema funcional de las calderas de vapor en la planta basura cero de Malmö.	58
Figura 14. Ubicación de las cárcavas y límites de “El Carrasco”.	62
Figura 15. Forma de disponer los RSU en “El Carrasco”.	63
Figura 16. Planta desgasificadora implementada por BIONERSIS.	70
Figura 17. Caudal de biogás medido en 2012 en el Relleno Sanitario “El Carrasco”.	71
Figura 18. Elementos dejados por BIONERSIS en el Relleno Sanitario “El Carrasco”.	72
Figura 19. Resumen para la utilización del modelo estadounidense sobre tratamiento de basuras en la producción de biogás.	75
Figura 20. Regiones climáticas de Colombia.	78
Figura 21. Proyección de generación y recuperación de biogás relleno sanitario “El Carrasco” periodo 1997 a 2006.	89

Figura 22. Proyección de generación y recuperación de biogás relleno sanitario “El Carrasco” periodo 2007-2010.	90
Figura 23. Proyección de generación y recuperación de biogás relleno sanitario “El Carrasco” periodo 2011-2013.	91
Figura 24. Proyección de generación y recuperación de biogás relleno sanitario “El Carrasco” periodo 2014-2016.	92
Figura 25. Resultados generales para la generación y recuperación del biogás proveniente del relleno sanitario “El Carrasco”.	94
Figura 26. Consumo de biogás de las microturbinas, y tiempo de operación.	109

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Componentes del biogás.	28
Tabla 2. Tratamiento del biogás según su uso.	34
Tabla 3. Comparación de los motores de combustión.	37
Tabla 4. Plantas de biogás en el mundo.	44
Tabla 5. Plantas de biogás de vertedero y tipo de tecnología utilizada.	45
Tabla 6. Plantas pertenecientes a los distritos sanitarios del Condado de los Ángeles.	48
Tabla 7. Cantidad de Residuos Sólidos Municipales dispuestos en Rellenos Sanitarios.	52
Tabla 8. Plantas de basura cero en el mundo	57
Tabla 9. Disposición histórica de residuos relleno sanitario “El Carrasco”.	65
Tabla 10. Mediciones del relleno sanitario “El Carrasco” realizadas por SCS Engineers.	68
Tabla 11. Simulación del potencial de recuperación de biogás por SCS Engineers.	69
Tabla 12. Volumen quemado por BIONERSIS.	73
Tabla 13. Resultados matriz de priorización.	74
Tabla 14. Disposición histórica de residuos y celdas utilizadas.	79
Tabla 15. Valores del índice de generación de metano (k).	82
Tabla 16. Valores del potencial de metano por tipo de residuo (<i>Lo</i>).	83
Tabla 17. Factor de corrección de metano (MCF).	84
Tabla 18. Hoja de alimentación del modelo colombiano para la generación de biogás en el relleno sanitario “El Carrasco”.	86
Tabla 19. Resultados obtenidos por el modelo colombiano para el relleno sanitario “El Carrasco”	93
Tabla 20. Comparación teórica experimental de la captación de biogás del 2012	97
Tabla 21. Comparación entre la Simulación 1 y 2.	98

Tabla 22. Características de las posibles aplicaciones para el aprovechamiento del biogás en “El Carrasco”.	101
Tabla 23. Factores de selección de tecnología para el aprovechamiento del biogás en “El Carrasco”.	104
Tabla 24. Referencias de microturbinas para vertedero Capstone	107
Tabla 25. Datos característicos de la Microturbina Capstone CR800.	108
Tabla 26. Costos generales de la implementación de las microturbinas.	110

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Tipos de motores de combustión para biogás	124
Anexo B. Aplicaciones de biogás de vertedero en Estados Unidos	125
Anexo C. Plantas de tratamiento del relleno sanitario “El Carrasco”	127
Anexo D. Cuestionario presentado a trabajadores del relleno sanitario “El Carrasco”	130
Anexo E. Glosario del modelo de biogás colombiano	133
Anexo F. Caracterización de residuos sólidos en los departamentos de Colombia y específicos al sitio.	137
Anexo G. Proyecciones de generación y recuperación de biogás para el relleno sanitario “El Carrasco”.	23
Anexo H. Catálogos de microturbinas capstone especializadas en biogás de vertedero.	147
Anexo I. Gráficas de las opciones de microturbinas consideradas para la generación de energía eléctrica por medio del biogás producido por el relleno sanitario “El Carrasco”.	155
Anexo J. Matriz de priorización	159
Anexo K. Formato visitas técnicas	161

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS QUE SE PRODUCE EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO” Y SU ADAPTABILIDAD EN UN ENTORNO DE UNA MICRO-RED ELÉCTRICA.¹

AUTORES: YOHANA CAROLINA GALVIS SILVA
LEONARDO GOMEZ ARIZA²

PALABRAS CLAVE: Biogás, Vertedero, Residuos Sólidos Urbanos, Relleno Sanitario, micro turbinas, Microredes Eléctricas.

DESCRIPCIÓN:

Los países se enfrentan al reto de suministrar a todos los hogares un servicio continuo, eficiente y de calidad. Además, los gobiernos y los medioambientalistas, están preocupados por el continuo crecimiento en la producción de basuras en el mundo, su disposición final y sus consecuencias sociales y ambientales. Actualmente en Colombia, la disposición final de las basuras se hace en rellenos sanitarios o vertederos, donde se realiza su descomposición, liberando gases contaminantes a la atmosfera, tales como dióxido de carbono, metano, entre otros. Gases con una gran capacidad calorífica, que han sido utilizados exitosamente en la generación de energía, especialmente en países como Dinamarca, Alemania y España.

En respuesta a las problemáticas mencionadas, este proyecto pretende brindar una alternativa de solución para el aprovechamiento del biogás producido en el relleno sanitario “El Carrasco”; para esto, se hace una documentación de proyectos mundiales exitosos en el uso adecuado del biogás generado en rellenos sanitarios, en los que se tuvieron cuenta sus principales características tecnológicas y ambientales, con el fin de servir como referente para este caso en específico. Además, se realiza una búsqueda exhaustiva de la información histórica, actual y proyecciones futuras de un relleno sanitario para simular y estimar su potencial de generación y recuperación de biogás a través del modelo estadounidense sobre el tratamiento de basuras para la producción de biogás en el contexto colombiano. De esta manera, se analizó toda la información obtenida y se evaluaron las opciones disponibles, dando como resultado la propuesta tecnológica y ambiental de instalar dos micro turbinas CAPSTONE con una capacidad de producción de energía eléctrica de hasta 800 kW cada una, que permitirán ser un referente para la toma de decisiones respecto al desarrollo del relleno sanitario y su futura implementación energética en una micro red eléctrica.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director: Gabriel Ordóñez Plata. Codirector: Alvaro Alyamani Triana.

ABSTRACT

TITLE: FEASIBILITY STUDY FOR THE USE OF BIOGAS PRODUCED IN THE LANDFILL "THE CARRASCO" AND ITS ADAPTABILITY IN AN ELECTRIC MICRO-GRID.³

AUTHORS: YOHANA CAROLINA GALVIS SILVA
LEONARDO GOMEZ ARIZA⁴

KEYWORDS: Biogas, Landfill Gas, Landfill, Urban Solid Waste, micro turbines, electrical micro grids.

DESCRIPTION

The main challenge for the countries is providing a continuous, efficient and high quality energy service. In addition, governments and environmentalists are concerned about the continuous growth in the production of urban waste in the world, its disposal and its social and environmental consequences. Currently in Colombia, the disposal of waste is in landfills, where decomposition takes place, releasing greenhouse gases into the atmosphere, such as carbon dioxide and methane, among others. Gases with large heat capacities, which have been successfully used in power generation, especially in countries like Denmark, Germany and Spain.

In response to the problems mentioned above, this project aims to provide an alternative solution to the biogas outreach in the landfill "El Carrasco", this makes for a documentation of the successful biogas outreach projects that have been done in the world and its main technological and environmental features, so as to be a reference to this specific case. It also makes an exhaustive search of the historic, current and future information from the landfill to simulate filling its potential for biogas generation and recovery with the US Model about the waste treatment for the biogas outreach in Colombia. Thus, it was possible to analyze all the information gathered and assess the available options, resulting in a technological and environmental proposal of installing two micro turbines Capstone with a production capacity of 800 KW electricity each, that will be a reference for decision-making regarding the development of the landfill and its future implementation in an electrical micro grid.

³ Undergraduate Dissertation.

⁴ Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering, Director: Gabriel Ordoñez Plata. Codirector: Alvaro Alyamani Triana.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía a través de diversos sistemas y con la utilización de los recursos que el medio ofrece ha ganado cada vez más importancia en los sectores industriales; continuamente se busca mejorar la forma en que se produce y se hace uso de la energía, con esto se ha determinado que elementos como los residuos sólidos permiten una generación de la misma a través de un procesamiento adecuado, “es preciso establecer una correcta gestión y aprovechamiento de los residuos, y deben ser considerados no basuras indeseadas, sino fuente de materias primas que nuestra sociedad no puede permitirse el lujo de desaprovechar”⁵. Además, puede lograr una contribución con el medio ambiente al hacer uso de las basuras, debido a que el mal manejo que se les da causa un problema ecológico a gran escala que está captando la atención de los sectores económicos y sociales preocupados por su avance desmedido.

El trabajo de investigación se presenta en tres partes que muestran el estudio de viabilidad para el aprovechamiento energético a partir del biogás generado por el relleno sanitario “El Carrasco”.

La primera parte, presenta la conceptualización requerida para tener precisión a la hora de abordar las características de un relleno sanitario. En primer lugar se expone la temática referente a: Las etapas de formación, la aplicación y los factores, los tipos de vertedero, el tiempo de vida, entre otros; luego, se aborda el tema de los residuos en cuanto a su clasificación y fuente de origen; también, se presentan las características de basura cero; y finalmente, se amplía el concepto

⁵ Cabildo Miranda, M. P., Claramunt Vallespí, R., Cornago Ramírez, M. P., Escolástico León, C., Estaban Santos, S., Farrán Morales, M. A.,... Sanz del Castillo, D. (2010). *Reciclado y tratamiento de residuos*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Fecha de consulta: 7 de octubre de 2014. Recuperado de <http://books.google.com.co/books?id=jXEFxC3GiGQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

de biogás de vertedero en cuanto a las equivalencias energéticas, las fases de generación, la aplicación, la eficiencia y la microred eléctrica.

En el Capítulo 2, se muestran algunos casos seleccionados en el mundo relacionados con la utilización adecuada del biogás proveniente de rellenos sanitarios con el propósito de obtener un referente tecnológico y ambiental que permita conocer en profundidad las características de estos sistemas en cuanto a: La capacidad del relleno, la tecnología empleada, las condiciones ambientales, la disminución de la contaminación y la energía generada.

En el Capítulo 3, se presenta en una secuencia cronológica los aspectos técnicos particulares del sitio a través de la información recopilada, la cual se utilizó para evaluar las condiciones de “El Carrasco” y para proyectar: La capacidad de disposición de residuos, el biogás generado, el contenido de metano en el biogás y el flujo promedio por hora de biogás. Para lograr esta información se estudió la ubicación, el funcionamiento, la capacidad de disposición, el proceso final de los desechos, los datos reales y proyectados de la disposición de basuras en el relleno sanitario, las mediciones y simulaciones que realizaron las empresas SCS ENGINEERS⁶ y BIONERSIS⁷.

Adicionalmente, en este capítulo se expone la caracterización del modelo estadounidense sobre el tratamiento de las basuras para la producción de biogás en Colombia y su aplicación al relleno sanitario “El Carrasco”. Esta caracterización se realizó a través de cuatro simulaciones, por medio del programa lanGEM Colombia. Este software es libre y pertenece a la agencia estadounidense US

⁶ Empresa estadounidense fundada en 1970, provee calidad profesional relacionada con la protección medio ambiental y la conservación de los recursos. Página Web: www.scsengineers.com

⁷ Empresa francesa, opera en la industria de la energía renovable. Página Web: www.bionersis.com

EPA⁸, permite alimentar los datos característicos del relleno sanitario, como la cantidad de residuos que recibe, las características físicas de las celdas de disposición y las chimeneas, entre otros, con el propósito de calcular el biogás que se podría generar y recuperar en el relleno a través de los años.

La sección 3.5 presenta las alternativas identificadas para el uso del biogás que se produce en el relleno sanitario “El Carrasco”, cada alternativa sugiere opciones para el aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario. Una vez realizadas las comparaciones entre las simulaciones realizadas por los autores y las mediciones realizadas por otras empresas se determinan las alternativas de solución, entre ellas se identificó como la más viable ‘la microturbina de gas’. A partir de esta decisión se elabora una propuesta de solución para la generación de energía eléctrica a corto plazo con base en la captura del biogás y su relación con las microturbinas.

Posteriormente se propone una segunda alternativa de solución para un escenario de medio y largo plazo en la cual se muestran los beneficios del biogás producido por el relleno sanitario “El Carrasco”, entre los beneficios identificados se destacan el aporte y soporte de soluciones para la implementación de microredes de energía eléctrica en Colombia como una alternativa que complemente el sistema de potencia nacional, aumentando la calidad y la confiabilidad de los sistemas. El trabajo de investigación realizado se sustentó en proyectos sobre microredes que se están desarrollando en Colombia bajo la legislación del protocolo de Kyoto, la regulación de los mercados de energía (Ley Colombiana #143 de 1994) y la integración de energía renovable no convencional al sistema energético nacional (Ley Colombiana #1715 de 2014).

⁸ Environmental Protection Agency, agencia estadounidense que se propuso como misión la protección de la salud humana y ambiental. Página Web: <http://www.epa.gov/>

Finalmente, se presentan las conclusiones como resultado de la investigación entre las que se destaca la viabilidad de utilizar el biogás proveniente del relleno sanitario “El Carrasco”, para el aprovechamiento energético por medio de dos microturbinas y su futura adaptabilidad a las microredes eléctricas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- ✓ Realizar un estudio detallado de la viabilidad de utilizar como fuente de energía alternativa el biogás proveniente del relleno sanitario “El Carrasco” y su adaptabilidad al entorno de microredes eléctricas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Identificar en forma general las principales características de los escenarios existentes en el mundo, por medio de recopilación de literatura internacional sobre el estado actual y antecedentes de la extracción y producción del biogás provenientes de rellenos sanitarios, para que sirvan como referentes en este proyecto.
- ✓ Evaluar las condiciones actuales del relleno sanitario “El Carrasco”, por medio de la caracterización de parámetros físico-químicos obtenidos a partir de simulaciones, visitas técnicas, y mediciones existentes, con el objetivo de relacionar su potencial energético respecto a los referentes mundiales y buscar una posible solución a los problemas socio-ambientales que este presenta.
- ✓ Realizar una propuesta ambiental y tecnológica al relleno sanitario “El Carrasco”, que permita optimizar el biogás existente, con el fin de servir como referente para una futura toma de decisiones en el mismo.

2. FORMULACION DEL PROBLEMA

“La Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga (EMAB S.A ESP.) es la entidad encargada de los servicios de barrido, recolección, transporte y disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU⁹) de la ciudad. En la actualidad presta el servicio de disposición final de RSU al Área Metropolitana y otros municipios aledaños (Lebrija, Rionegro, Playón, Suratá, Charta, Santa Bárbara, California, Matanza, Tona, Vetas y Zapatoca)”¹⁰, los cuales se depositan en el relleno sanitario “El Carrasco”, ubicado en el departamento de Santander, entre los límites de Bucaramanga y Girón.

La EMAB estima que el relleno recibe aproximadamente 800 toneladas de RSU diarias, y que esta cantidad tiene un crecimiento cercano del 10% anual. Estos desechos son la materia prima para la generación de biogás, el cual está compuesto en su mayoría de metano (gas con alto potencial calorífico), dióxido de carbono (gas de efecto invernadero) y otros gases. Según la investigación realizada por el centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas de España (CIEMAT)¹¹ en el año 2010, una tonelada de desechos con contenido de materia orgánica del 50% generaba aproximadamente 200 m³ de biogás con un rendimiento del 70% y un metro cúbico de biogás compuesto por 70% metano y 30% gas carbónico, equivalía a 6,8 kW de electricidad. De acuerdo con estas cifras “El Carrasco” tiene un potencial energético, el cual está siendo quemado localmente y liberado a la atmósfera.

⁹ Terminado definido por el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000. Página 13.

¹⁰ Empresa de aseo de Bucaramanga EMAB S.A. ESP., “Situación actual relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga, Colombia”. 2012. p.1.

¹¹ Cooperación transfronteriza España-Portugal, Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura, España. 2010, p. 11.

Dado este potencial energético, la empresa francesa BIONERSIS quiso aprovecharlo, no solo en Bucaramanga sino en ciudades como Villavicencio, Pasto, Cúcuta y Manizales. Según un informe de Vanguardia liberal¹² esta empresa invirtió en “El Carrasco” 3 150 millones de pesos con los que implementó la primera fase, en la cual se recolectaba, medía el volumen y las características del biogás para ser llevado a una antorcha central donde se quemaba en condiciones ideales de 1000°C.

La empresa BIONERSIS dejó abandonada esta primera fase en 2013, debido principalmente a que los CER (Certified Emission Reduction), su única fuente de ingresos pasó de valer 14 euros por tonelada de dióxido de carbono (CO₂) en 2010, fecha en que inició la planta, a tan solo 30 centavos de euro por tonelada de CO₂ en 2013¹³. Cuando BIONERSIS se fue, dejó deudas millonarias tanto con el relleno como con la Empresa Electrificadora de Santander ESSA, además se detuvo la extracción y quema del biogás, dejando toda la infraestructura: ductos, extractores, motores, entre otros, sin funcionamiento.

De haber continuado el proyecto, se podría haber evitado que el biogás se siguiera emitiendo a la atmósfera, agravando aún más el problema del calentamiento global. Además, se estaría sacando un provecho económico, a un recurso que se tiene disponible, con la implementación de la segunda fase, la de generación de energía eléctrica a partir de biogás.

¹² CHIO, Juan Carlos. Situación actual relleno sanitario El Carrasco. [En línea]. [Disponible en: <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/198693-planta-que-reducia-gases-en-el-carrasco-fue-apagada>][5 de marzo de 2013].

¹³ *Ibíd.*

3. MARCO TEORICO

El crecimiento exponencial de las poblaciones, el consumo masivo de bienes y servicios y la falta de conciencia ecológica que existe en la mayoría de las personas que integran la sociedad, han hecho que cada día se produzcan más desechos, los cuales representan un problema medioambiental para el planeta, ya que la inadecuada disposición y gestión integral de residuos, genera dificultades en la salud pública de las sociedades y en el desarrollo del ritmo social de la vida cotidiana. En este capítulo, se presenta un resumen de la información relacionada con los residuos sólidos, el biogás de vertedero, el aprovechamiento energético del mismo y su posible contribución con las microredes.

La OCDE¹⁴ define residuo como todo aquel elemento o componente que pierde utilidad y valor comercial, por tanto debe ser descartado y desechado. Todas las sociedades generan residuos, pero su nivel de producción depende de la actividad económica que desarrollan, su ubicación y el estilo de vida de sus habitantes.

El manejo de los residuos es de vital importancia tanto para la sociedad como para el medio ambiente, según Claudia Suárez¹⁵ su inadecuada gestión puede provocar principalmente:

- ✓ La contaminación de los suelos, lagos, ríos superficiales y subterráneos: esto se da por la filtración de los líquidos que producen los RSU, llamados lixiviados¹⁶.
- ✓ Generación de gas: se produce por la descomposición de los residuos vegetales y animales. Este, además de ser tóxico y explosivo, contribuye en la

¹⁴ VELÁZQUEZ, Ana. Tesis: Gestión ambiental y tratamiento de los residuos urbanos. Madrid. 2006.p.86.

¹⁵ SUÁREZ, Claudia. Problemática y gestión de los residuos sólidos en Colombia. 1998.p.41

¹⁶ Ministerio de desarrollo económico y Dirección de agua potable y saneamiento básico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Colombia. 2000.p.11.

generación de biogás, el cual tiene un alto contenido de metano (gas de efecto invernadero).

- ✓ Generación de olores perjudiciales para la salud pública.

A través de la historia el manejo de los RSU ha evolucionado desde su disposición en botaderos, pasando por vertederos controlados y llegando al concepto de basura cero¹⁷.

El botadero de basura es una de las prácticas de disposición final más antigua que ha utilizado el hombre para deshacerse de los residuos que se producen en sus diversas actividades. Según la norma RAS 2000¹⁸, se le llama botadero al sitio donde los residuos sólidos se abandonan sin separación ni tratamiento alguno. Este lugar funciona sin ningún criterio de ingeniería, donde no existe control sanitario ni ambiental, deteriorando el agua, aire y suelo por formación de gases (biogás) y líquidos lixiviados, polvo y malos olores.

Un relleno sanitario controlado o vertedero controlado¹⁹, es una instalación de ingeniería para la disposición de RSU en la tierra, de tal forma que se protege la salud pública y el medio ambiente. En el vertedero controlado los residuos son compactados, triturados y cubiertos con tierra en una zona acondicionada previamente para este fin, de ahí se derivan procesos como el saneamiento de las aguas filtradas (lixiviados) y la recuperación de gases generados en el interior del vertedero (biogás). Los rellenos sanitarios tienen una vida útil variable, que depende del espacio con el que se cuente, la compactación de la basura y el

¹⁷ Es la traducción de Zero Waste, término que fue acuñado en los Estados Unidos en los años 80. Surge de modelos “cero defectos” y “reciclaje total” utilizado por la industria japonesa.

¹⁸ Ministerio de desarrollo económico, Dirección de agua potable y saneamiento básico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Colombia. 2000.p.11

¹⁹ESPINACE, Raúl y PALMA, John. Asentamiento en un vertedero controlado a escala con recirculación de líquidos lixiviados. Chile. 1997.p.1.

grosor de la cobertura; sin embargo su producción de biogás continúa con flujos variables por más de 20 años después de la clausura del relleno²⁰.

Según el colectivo Bogotá basura cero²¹, basura cero es un principio de vida, un compromiso ambiental y social del ser humano con el planeta. Este compromiso se logra creando conciencia entre los ciudadanos, los empresarios y los ambientalistas, buscando disminuir los impactos ambientales que son consecuencia de la inadecuada gestión de los residuos y convertirlos en riqueza colectiva sostenible. El principio fundamental para la reducción de basura, busca disminuir la producción de residuos y revalorizar la mayor cantidad posible de materiales, por medio de la reducción, reciclaje y reutilización de los desechos²².

3.1 BIOGÁS

Según la norma RAS 2000, el término biogás se utiliza para señalar a toda mezcla de gases bioenergéticos provenientes de residuos orgánicos, es producido por la descomposición y degradación de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias (proceso en ausencia de oxígeno).

Esta mezcla gaseosa, se encuentra en las minas de carbón y yacimientos petrolíferos donde se denomina gas natural. De forma artificial, la degradación anaerobia es utilizada para la depuración de las aguas residuales urbanas, para la eliminación de los RSU en vertederos controlados y para el tratamiento de los excrementos animales, conociéndose el gas generado en todos estos casos como biogás.

²⁰ Cooperación transfronteriza España-Portugal, Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogas en Extremadura, España. 2010, p.5.

²¹ Colectivo Bogota basura cero. [En línea]. [Disponible en: www.bogotabasuracero.com/][5 de noviembre de 2014].

²² Greenpeace. Las tres R: reduce-reusa-recicla. [En línea]. [Disponible en: <http://www.greenpeace.org/mexico/es/Actua/Ecotips/Las-tres-r/>][5 de noviembre de 2014].

El biogás es un gas combustible que se obtiene como consecuencia de la desgasificación del vertedero, su composición típica como se muestra en la Tabla 1 es de gas metano (40- 70) %, dióxido de carbono (25 - 45) % y concentraciones mínimas de compuestos no metánicos como nitrógeno, monóxido de carbono y amoniaco.

Tabla 1. Componentes del biogás.²³

Componentes mayoritarios del biogás		
Componente	Formula química	Porcentaje V/V (%)
Metano	CH ₄	40-70
Dióxido de carbono	CO ₂	25-45
Vapor de agua	H ₂ O	1-2
Monóxido de carbono	CO	0-0,3
Nitrógeno	N ₂	1-5
Oxígeno	O ₂	0,1-1,0
Hidrógeno	H ₂	0.15-0.2

El biogás se puede producir a partir de una gran diversidad de sustancias orgánicas, por lo que las posibles materias primas a emplear en el proceso, conforman un amplio rango de posibilidades y combinaciones. En muchos casos se utilizan como materia prima desechos de diversa naturaleza, como excrementos de animales, residuos de cosechas agrícolas, residuos de industrias (agro-azucarera, alimenticia y otras), residuos sólidos municipales, residuos líquidos de procesos agroindustriales, aguas contaminantes, entre otros²⁴. Esto posibilita que se aplique la degradación anaerobia para la obtención de energía a partir de fuentes renovables, y como un método eficaz y eficiente para el

²³ De: Cooperación transfronteriza España-Portugal, Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogas en Extremadura, España. 2010, p. 8.

²⁴ MEJÍA BARRERA, Carlos Salvador, MEJIA TEREZON, Cecilia y RAMIREZ BERMUDEZ, Delia. Tesis: Estudio de factibilidad técnico económico para la implantación de una planta productora de biogás, a partir de desechos orgánicos. Salvador. 2005.p. 51.

tratamiento de los residuos, con el objetivo de contribuir al saneamiento del medio ambiente y a la demanda de energía existente en nuestro planeta.

La adaptación y aplicación energética del biogás dependerá de su uso final, por tal motivo resulta indispensable conocer su equivalencia energética respecto a otras fuentes de energía. La Figura 1 muestra una correlación energética del biogás con concentraciones típicas existentes de metano (70% CH₄) y dióxido de carbono (30% CO₂) respecto a otros recursos energéticos utilizados actualmente (carbón, gasolina, gas natural, madera, entre otros).

Figura 1. Equivalencias energéticas del biogás. ²⁵



Los vertederos de residuos sólidos urbanos presentan importantes impactos sociales, visuales y ambientales, como la generación de biogás, resultante de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. Entre otros efectos, estas emisiones incontroladas de biogás potencian el efecto invernadero

²⁵ De: Cooperación transfronteriza España-Portugal. Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogas en Extremadura, España. 2010, p. 11.

del planeta, por lo que es necesario su control y tratamiento²⁶. La Figura 2 muestra un esquema general para la adecuación, manejo y tratamiento del biogás de vertedero, además de la preparación de las zanjas para la disposición final de los desechos.

Figura 2. Vertedero controlado.



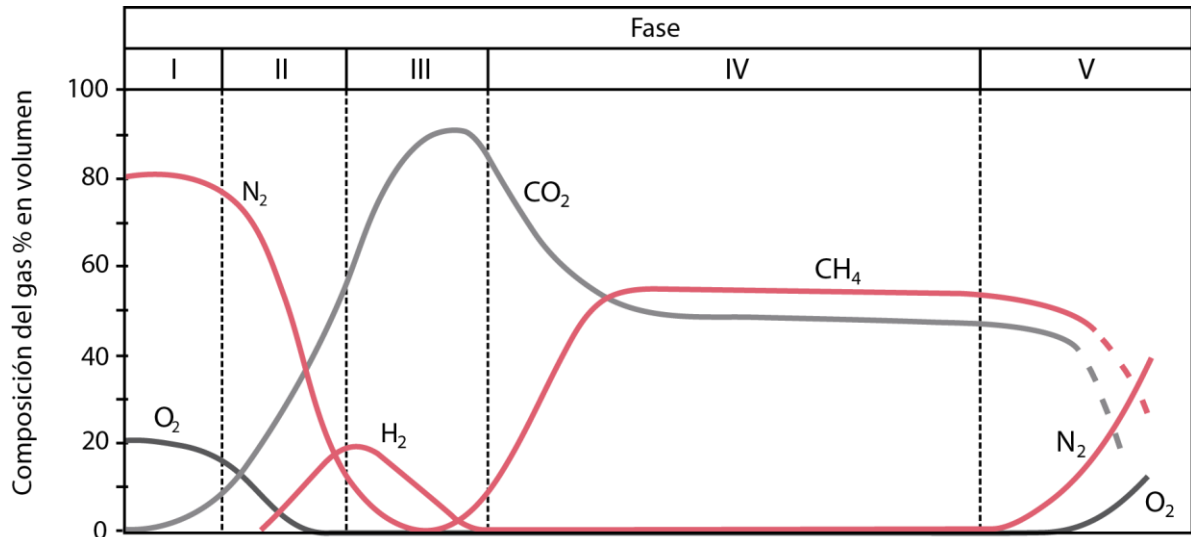
Fuente: Wikipedia. Depósito controlado. [en línea]. (5 de noviembre). Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Dep%C3%B3sito_controlado

El biogás debe ser extraído y eliminado mediante combustión para mitigar el impacto medioambiental, además puede actuar como fuente de energía eléctrica y calorífica. La aplicación práctica comienza, por la captación y transporte del biogás hasta la planta de procesamiento, lo cual se ejecuta normalmente mediante una red de tuberías que cubren toda la superficie²⁷. La composición y el flujo de biogás varía dependiendo de la etapa en la que se encuentre, en la Figura 3 se muestran las fases de generación de biogás en vertedero.

²⁶ Revista ambientum. Edición febrero de 2003. [En línea]. [Disponible en: www.ambientum.com/revista/2003_01/BIOGAS.htm][5 de noviembre de 2014].

²⁷ SANCHEZ, Francisco. FERNÁNDEZ, Susana. CRESPO, Gemma y CUESTA, María José. Informe de Vigilancia Tecnológica de Madrid: "Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento."2012, pp. 47-48.

Figura 3. Fases de generación del biogás de vertedero.²⁸



Se observan cinco fases²⁹:

- ✓ **FASE I.** Es la fase inmediata al vertido y es aeróbica. Predomina el nitrógeno, el oxígeno se va reduciendo y hay una creciente formación de dióxido de carbono. Tiene una duración aproximada de 15 días.
- ✓ **FASE II.** Se produce la transición a condiciones anaeróbicas, reduciéndose los sulfatos y los nitratos.

²⁸ Cooperación transfronteriza España-Portugal, Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura, España. 2010, pp. 40

²⁹ Ibíd, p. 41.

- ✓ **FASE III.** Es la fase anaerobia en la que actúan las bacterias metanogénicas produciendo metano y reduciendo dióxido de carbono e hidrógeno en forma relativa. Dura aproximadamente dos meses.

- ✓ **FASE IV.** Es la fase anaerobia donde se produce el metano. Su duración es variable, ya que depende de la cantidad de desechos orgánicos que contenga el vertido.

- ✓ **FASE V.** Es la fase final, donde ya existe una clara disminución en la producción de los gases del vertedero. Tiene una duración entre 10 y 30 años.

La duración de cada fase depende de diversos factores ambientales, la gestión del vertedero, la composición de los desechos, el tratamiento de los RSU, entre otros³⁰.

3.2 APLICACIONES DEL BIOGÁS

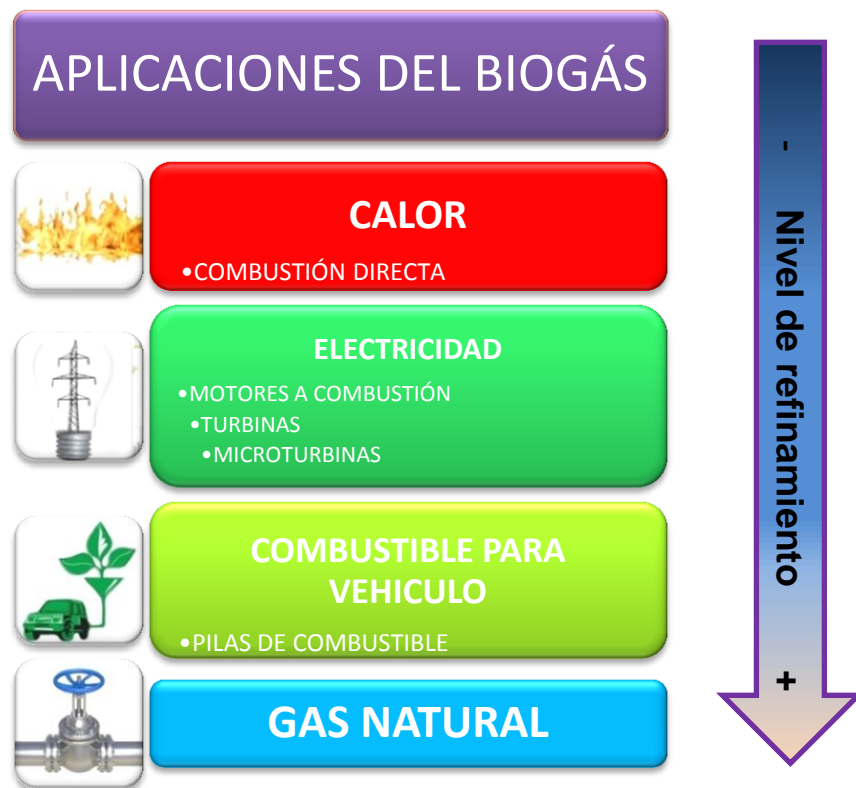
El biogás ha sido utilizado en diversas aplicaciones, hasta el momento las más beneficiosas han sido: la producción de calor, la generación de energía eléctrica, su integración a la red de gas natural y su utilización como combustible para vehículo³¹. Como las fuentes que producen el biogás son variables, la calidad del mismo también lo es, limitando las opciones para su aprovechamiento. Los factores que son determinantes para la utilización del biogás en cualquiera de las aplicaciones son: el flujo de biogás, el porcentaje de metano, temperatura, presión, la ubicación de la fuente, la demanda local, el presupuesto de inversión, entre

³⁰ Ibíd, p. 40.

³¹Francisco. FERNÁNDEZ, Susana. CRESPO, Gemma y CUESTA, María José.. Informe de Vigilancia Tecnológica de Madrid: "Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento."2012, pp. 76-77.

otros. En la Figura 4, se pueden observar las aplicaciones y tecnologías asociadas al biogás.

Figura 4. Tecnologías y aplicaciones del biogás.



Uno de los factores más influyentes, es el costo del proceso, debido a que entre más refinamiento sea necesario, más costoso será su presupuesto de inversión. El refinamiento es necesario debido a que el biogás contiene humedad y dióxido de carbono, los cuales hacen que se disminuya su poder calorífico, además de hidrogeno que al hacer combustión, se convierte en ácido sulfhídrico, componente

que oxida los motores³². En la Tabla 2, se muestra el nivel de refinamiento para los diferentes componentes del biogás, según su aplicación.

Tabla 2. Tratamiento del biogás según su uso.³³

Nivel de tipo de tratamiento del biogás según su uso final			
Usos del biogás	Eliminación del agua	Eliminación del dióxido de carbono	Eliminación del hidrógeno
Combustión directa	Parcial	No	No/Parcial/Elevado
Producción de energía eléctrica y térmica en motores de cogeneración	Parcial/Elevado	No/Parcial/Elevado	Parcial/Elevado
Combustible para vehículos	Elevado	Elevado	Elevado
Red de gas natural	Elevado	Elevado	Elevado
Pilas de combustible	Elevado	Elevado	Elevado

3.2.1 Producción de calor. La producción de calor a través de la combustión directa, es una de las aplicaciones más utilizadas en los vertederos controlados, donde el biogás captado es quemado en una chimenea aproximadamente a 1500°C sin un tratamiento previo³⁴. La combustión directa, pretende transformar el metano en dióxido de carbono a través de su quema, para no afectar el medio

³² GARCIA, Francisco. *APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS EN VERTEDEROS CONTROLADOS*. 2010, pp. 20-21

³³ Cooperación transfronteriza España-Portugal. *Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogas en Extremadura, España*. 2010, p. 133

³⁴ TERRAZA, Horacio y WILLUMSEN. Hans. *Guidance note on landfill gas capture and utilization*, no. 108. 2009, pp. 20-22.

ambiente, debido a que según Emmanuel Boulet³⁵ el metano es un gas de efecto invernadero veintitrés veces más nocivo que el dióxido de carbono. Hay diferentes formas para beneficiarse de este calor como³⁶:

- ✓ Calefacción y agua caliente.
- ✓ Incineración, por ejemplo de desechos del sector médico.
- ✓ Lámparas a gas.
- ✓ Refrigeradores domésticos.
- ✓ Quemadores infrarrojos.

Una de las principales desventajas³⁷ de esta aplicación, es la necesidad de ubicar la zona de consumo de calor lo más cerca posible de la zona donde se genera, ya que debido al bajo poder calorífico del biogás, este no puede ser trasladado de forma rentable por tuberías.

3.2.2 Generación de energía eléctrica. Existen diversas formas de generar electricidad a partir del biogás, a continuación se mencionan las más utilizadas a nivel mundial.

Motores de combustión.

Una primera forma de generar energía eléctrica a partir de biogás, es la combustión en plantas (conjunto de motor y generador). Esta aplicación requiere una inversión mayor que en combustión directa, ya que previamente deben ser eliminadas las impurezas como: la humedad, el ácido sulfhídrico, las partículas sólidas, entre otros, debido a que estas pueden llegar a afectar el rendimiento y el mantenimiento de los motores. Los motores de combustión se basan en ciclos

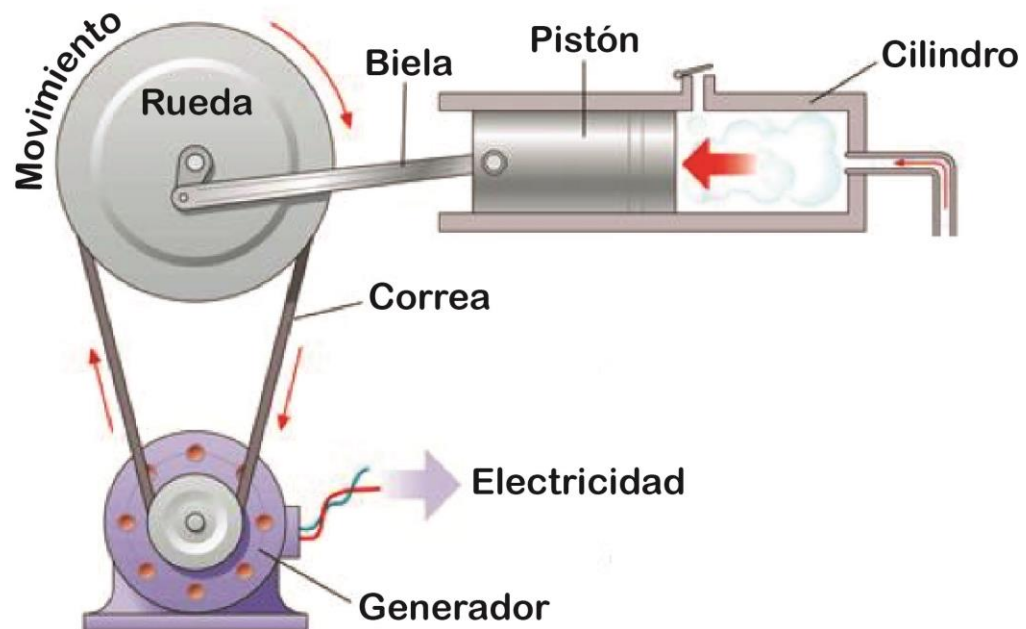
³⁵ BOULET, Emmanuel. BRACKMANN, Simoes. BREISINGER, Mario. WILLUMSEN, Hans. Directrices sobre vertederos. 2010, p. 4.

³⁶ Cooperación transfronteriza España-Portugal, Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogas en Extremadura, España. 2010, p. 136

³⁷ Ibíd, p.137.

termodinámicos Diésel y Otto, y suelen clasificarse según el tipo de encendido como motores de encendido por chispa y motores de encendido por compresión, estos suelen utilizar como combustible para la ignición gasolina, Diésel, gas, entre otros³⁸. La Figura 5, muestra el funcionamiento general de los motores de combustión, donde el combustible y el aire se introducen en el dispositivo cilindro-pistón, hacen combustión por chispa o compresión, liberando gases a alta presión y temperatura que provocan el movimiento del mecanismo biela-manivela, que a su vez mueve el eje de un generador de energía eléctrica³⁹.

Figura 5. Funcionamiento de motores de combustión.⁴⁰



³⁸ Ibíd, pp. 37-39.

³⁹ RUBIO, Carlos y UCHE, Javier. Tecnologías motriz primario para poligeneración. 2008, p. 3.

⁴⁰ Albatecnología. Máquina de vapor y para volar. [En línea]. [Disponible en: <http://albaatecnologia.blogspot.com/>][15 de julio de 2011].

Se debe tener en cuenta que para la combustión en motores del biogás, se necesita: un contenido de metano mayor al 45% y modificar los motores para el uso con biogás, como se explica en el ANEXO A. Esta tecnología tiene una eficiencia baja que oscila entre 20% y 35%. La Tabla 3, muestra una comparación entre las distintas opciones de motores de combustión para la generación de energía eléctrica a partir de biogás.

Tabla 3. Comparación de los motores de combustión. ⁴¹.

Tipo	Ciclo Otto		Ciclo diésel
	Gasolina	Gas	Diésel
Combustible	Gasolina	Gas	Diésel
Eficiencia	20-25%	30-35%	25-35%
Nivel de ruido	Medio	Alto	Alto
Mantenimiento	Alto	Medio	Alto
% de uso de otro combustible a parte del biogás	0%	0%	5-20%
Potencia [kW]	5-30	>150	30-150

Turbinas de gas⁴².

La utilización de las turbinas de gas en ciclos combinados, en vez de en ciclos abiertos ha permitido que presenten un rendimiento mejor que los motores a combustión y se han convertido en una opción más amigable con el medio ambiente. Son atractivas, cuando se requiere de la cogeneración, ya que su temperatura de escape es alta y se utiliza para producir vapores. Es necesario modificarle la cámara de combustión, para que admita el uso de combustibles con bajo poder calorífico, como el biogás. Estas trabajan con potencias desde 500 kW hasta 30 MW.

⁴¹ Cooperación transfronteriza España-Portugal, Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogas en Extremadura, España. 2010, p. 139.

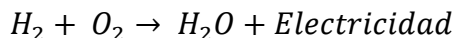
⁴² RUBIO, Carlos y UCHE, Javier. Tecnologías motriz primario para poligeneración. 2008, pp. 11-.21.

Micro-turbinas⁴³.

Esta tecnología es muy utilizada en aplicaciones pequeñas (20 a 1000 kW) y en cogeneración. Sus mayores ventajas son: trabajar con un contenido de metano en el biogás de 35%, una mayor tolerancia al ácido sulfhídrico, son menos contaminantes y requieren menos mantenimiento que los motores de cogeneración. Las microturbinas son adecuadas para vertederos pequeños, o vertederos que se encuentren al principio o final de su vida útil.

Pilas de combustible⁴⁴.

Son elementos electroquímicos que convierten la energía química de una reacción en energía eléctrica, utilizando un funcionamiento inverso a la electrólisis, es decir, haciendo reaccionar hidrogeno y oxígeno, para generar vapor de agua y energía eléctrica. Existen varios tipos de celdas, las cuales son nombradas de acuerdo al electrodo utilizado, estos pueden ser de baja (AFC, PEM), media (PAFC) o alta temperatura en el combustible (MCFC, SOFC), solo la celda tipo PEM es utilizada con biogás.



A diferencia de otras baterías, estas pilas de combustible no necesitan ser recargadas, ya que su funcionamiento es ininterrumpido mientras que el combustible y el oxidante sean suministrados. Las pilas de combustible, tienen diferentes aplicaciones en generación distribuida, generación centralizada, cogeneración y transporte, donde diversas marcas como Ford, Volvo, Honda, BMW, Nissan, entre otras ya han implementado prototipos⁴⁵.

⁴³ *Ibíd*, pp. 22-28.

⁴⁴ *Ibíd.*, pp. 29-35.

⁴⁵ Cooperación transfronteriza España-Portugal. Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura, España. 2010, p. 144.

3.2.3 Combustible para vehículos⁴⁶. Esta es una de las aplicaciones más costosas en cuanto al tratamiento que requiere el biogás para ser utilizado como biocombustible, ya sea inyectado directamente en el motor o en pilas de combustible, debido a que se necesita eliminar impurezas tales como: La humedad, las partículas sólidas, el dióxido de carbono, el ácido sulfhídrico y el amoníaco; además de elevar los niveles de metano a más de 95%, donde se le empieza a llamar biometano.

3.2.4 Red local de gas⁴⁷. El biogás puede ser distribuido en la red de gas natural existente y ser utilizado para los mismos propósitos del gas natural, para esta aplicación es necesaria una inversión mucho mayor que en las de combustión directa y de motores, ya que requiere de un mejoramiento profundo del biogás, además de una concentración de metano mayor que 95% y una odorización del mismo.

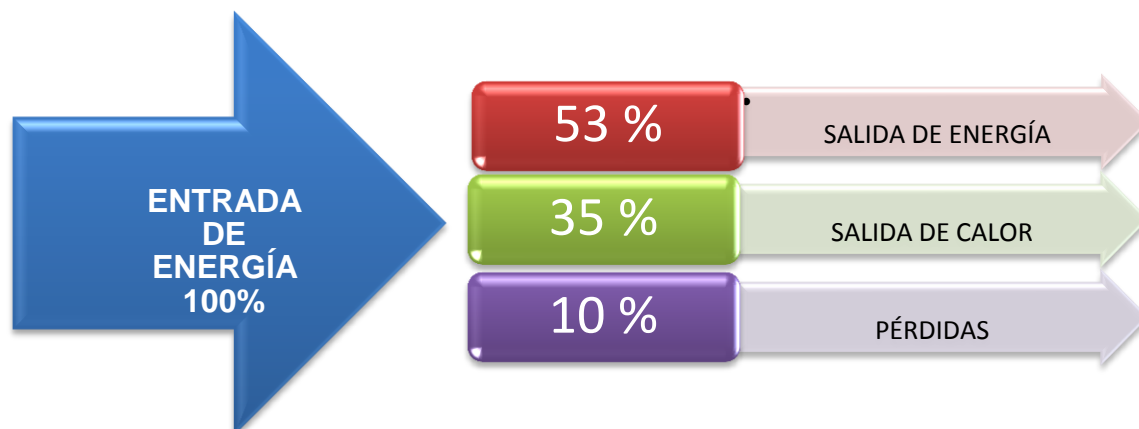
3.2.5 Cogeneración⁴⁸. También conocida por sus siglas en ingles CHP (Combined Head and Power). Tiene una eficiencia energética del 90%, por lo que es una de las aplicaciones más eficientes ya que no libera el calor a la atmósfera, sino que lo aprovecha como lo muestra la Figura 6, produciendo un 35% de electricidad, 53% de calor y 10% en pérdidas.

⁴⁶ SANCHEZ, Francisco. FERNÁNDEZ, Susana. CRESPO, Gemma y CUESTA, María José. Informe de Vigilancia Tecnológica de Madrid: "Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento."2012, pp. 86-87.

⁴⁷ Ibíd, p. 85.

⁴⁸ WILLUMSEN, Hans. Energy recovery from landfill gas in denmark and worldwide. 2008, p. 3.

Figura 6. Aprovechamiento energético de la cogeneración.⁴⁹



Para esta aplicación es necesario un mejoramiento del biogás, donde se eliminan la humedad, el ácido sulfhídrico, entre otros componentes. Las plantas de cogeneración pueden utilizar diferentes tecnologías como: motores de ciclo Otto o ciclo Diésel, micro turbinas, motores Stirling y pilas de combustible⁵⁰.

3.2.6 Trigeneración⁵¹. La trigeneración es un proceso similar a la cogeneración, en el que se produce frío, además de energía eléctrica y calor. EL frío generalmente se obtiene por el método de absorción, haciendo posible la unión de la demanda del calor en el invierno con la de frío en los meses de verano.

3.3 MICRORRED ELÉCTRICA

Es una red eléctrica integrada por fuentes de generación distribuida y sistemas de almacenamiento, que están gestionados en forma general por un sistema de control inteligente. Los sistemas de generación distribuidos, son sistemas que se

⁴⁹ Ibíd, p.3.

⁵⁰ RUTZ, Dominik. PRASSL, Heinz. FINSTERWALDER, Tobias. VOLK, Silke y JANSSEN, Rainer. BIOGAS HANDBOOK. University of Southern Denmark Esbjerg, 2008, pp. 42-44.

⁵¹ Cooperación transfronteriza España-Portugal, Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura, España. 2010, p. 148.

caracterizan por estar conectados a las redes de distribución, generar pequeñas potencias y estar ubicados en puntos cercanos a los centros de consumo, estas fuentes de generación pueden ser de cualquier tipo, renovable o no renovables, aunque se propende por sistemas de distribución amigables con el medio ambiente⁵². Estas redes operan conectadas al sistema eléctrico, pero su principal ventaja es su capacidad de autoabastecerse y operar de forma aislada, lo que hace ideal su implementación en zonas de difícil acceso. En la Figura 7, se muestra la estructura básica de una microrred

Figura 7. Microrred eléctrica.⁵³



⁵² RAMÍREZ, Mario. Hacia una revolución de las redes eléctricas. 2012, pp. 3-4.

⁵³ *Ibíd.*, p. 2.

Las microredes son una pequeña generación energética en la que los operadores, los consumidores y el medioambiente serían sus principales beneficiarios, así mismo una microred es un sistema que está formado por un grupo de cargas y micro generadores que funcionan como un sistema único y controlable que suministra energía eléctrica a una zona o vivienda determinada ayudando a reducir el impacto al medio ambiente por medio de energías renovables⁵⁴.

Al integrar una microred en zonas residenciales se tienen las siguientes ventajas⁵⁵:

- ✓ Alivio térmico a los equipos de distribución, por reducción de la demanda en horas pico.
- ✓ El consumidor minimiza su consumo, ya que la energía es suministrada localmente.
- ✓ La generación distribuida permite producir, almacenar y administrar la energía en el mismo lugar de consumo.
- ✓ Los usuarios de las edificaciones eléctricas serán generadores y consumidores.
- ✓ Beneficios en la gestión energética

⁵⁴ S&C Electric Company. Micro-Redes: Una idea vieja con potencia. 2013, p. 3.

⁵⁵ Ibíd, p. 1.

4. EJEMPLOS MUNDIALES DE APLICACIONES DE BIOGÁS DE VERTEDERO

El interés mundial por el cambio climático y la necesidad de utilizar todas las fuentes renovables posibles de energía, han hecho que se desarrollen plantas de aprovechamiento a partir de gas de relleno sanitario (GRS) desde hace ya varios años. De los complejos creados a nivel mundial, no se ha podido establecer el número exacto, debido a que pocos países tienen información completa y centralizada, pues esta se encuentra fragmentada entre los dueños de las plantas, los consultores y las compañías especializadas en el sector.

Sin embargo en el año 2003, el reconocido consultor de GRS Hans Willumsen, en colaboración con expertos locales llevo a cabo un estudio, donde mostraba información específica, acerca del número de plantas instaladas en el mundo, las técnicas más utilizadas en ellas, la cantidad de energía recuperada, entre otros.

El estudio de Willumsen revela que en el año 2003, existían aproximadamente 1 152 plantas en el mundo que utilizaban el biogás de vertedero para propósitos energéticos⁵⁶, en este momento estos datos no son precisos ya que algunas plantas fueron cerradas debido a que su producción decreció a través de los años volviéndolas no rentables, y además se implementaron otras nuevas en sitios con gran potencial energético. Aunque la información que se tiene es de hace varios años, sirve como referente para saber qué se tenía y sobretodo cuáles eran las tendencias tecnológicas en el mundo.

La Tabla 4, muestra una comparación del número de plantas, la producción de energía eléctrica y la cantidad de biogás extraído en los países más representativos, esta información evidencia que el uso de plantas de GRS es una opción tecnología llamativa en el mundo, que además de ser una gran fuente de

⁵⁶ TERRAZA, Horacio y WILLUMSEN, Hans. Guidance note on landfill gas capture and utilization, no. 108. 2009, p. 28

energía renovable, también ayuda a la disminución de los gases que producen el calentamiento global.

Tabla 4. Plantas de biogás en el mundo.⁵⁷

Región	No de plantas	Producción de energía [MW]	Extracción de biogás [m^3 /TON/DIA]
Europa	734	1 275	3,1
Estados unidos	354	2 378	2,9
Asia	19	72	4,7
Australia	18	76	3,8
Canadá	15	106	5,7
Sur América	8	18	3,6
África	4	4	3,5

La Tabla 5, muestra una lista de los tipos de tecnología más relevantes, y la cantidad de plantas a nivel mundial que los usan. En ella se puede observar que más del 50% de las plantas prefiere utilizar motores de combustión, los cuales pueden producir entre 350 y 1 200 kW de electricidad por motor.

Se debe tener en cuenta que para producir 350 kW de electricidad en ellos, se necesitan 210 m^3 de biogás por hora y para producir 1 200 kW, se necesitan 720 m^3 de biogás por hora⁵⁸. También muestra que la producción de calor en calderas es muy utilizada, esto se da especialmente en las plantas que están cerca de las zonas de consumo de calor o que necesita de este en alguno de sus subprocesos.

⁵⁷ Ibíd, p. 21.

⁵⁸ Ibíd, p.21

Tabla 5. Plantas de biogás de vertedero y tipo de tecnología utilizada.⁵⁹

Tipo de tecnología	No de plantas
Motores de combustión	581
Calor	277
Cogeneración	187
Turbina de gas	39
Evaporación de lixiviados	17
Hornos	14
Mejoramiento a gas natural	13
Turbina de vapor	11
Ciclo combinado	7
Micro turbinas	3
Combustible para vehículos	2
Celdas de combustible	1
TOTAL	1 152

De los casos que existen actualmente en el mundo, se seleccionaron cuatro casos especiales. Estos casos fueron seleccionados por contar con características que se consideran importantes: El primer caso fue escogido por ser el relleno que tiene la capacidad instalada más grande para generar energía eléctrica en el mundo, el segundo caso se seleccionó por tener características similares al relleno sanitario “El Carrasco” y porque utiliza microturbinas para generar energía eléctrica, el tercer caso fue elegido por ser un caso exitoso de generación de energía eléctrica con biogás de vertedero en Sur América y el último por ser un ejemplo diferente de producción de energía eléctrica a través de los RSU.

⁵⁹ Ibíd, p. 21.

4.1 RELLENO SANITARIO “PUENTE HILL⁶⁰”, ESTADOS UNIDOS.

En Estados Unidos la información completa, centralizada y actualizada acerca de las plantas de GRS, se encuentra disponible en la agencia de protección medioambiental estadounidense (US Environmental Protection Agency EPA), la cual está encargada de publicar anualmente una visión general de las plantas de aprovechamiento de GRS en el país. El último estudio fue realizado el 16 de julio del 2013, y revela que en Estados Unidos actualmente están funcionando 621 plantas de GRS y que hay 450 vertederos que son candidatos para la construcción de una nueva planta⁶¹. En el Anexo B, se muestran las aplicaciones y el número de proyectos existentes que las usan, además de la capacidad instalada en MW según el tipo de generación de energía eléctrica y la capacidad instalada en metros cúbicos de GRS por día (mmscfd) según el uso directo utilizado.

Según la información del Anexo B Estados Unidos ha duplicado su número de plantas neto desde el 2003 hasta el 2013 y además sigue el referente mundial del 2003, debido a que las tecnologías más utilizadas siguen siendo los motores de combustión para producir energía eléctrica y las calderas para la producción de calor⁶².

Existen gran cantidad de empresas estadounidenses que ya están siendo directamente beneficiadas por la energía eléctrica y térmica proveniente del GRS⁶³, algunas de las más reconocidas son: Coca Cola, que recibe energía

⁶⁰ La información referente al relleno sanitario “Puente Hills” fue tomada del documento Puente Hills Energy Recovery from Gas (PERG) Facility realizado por John Eppich y Michael Phillips en 1998.

⁶¹ Environmental Protection Agency. Número de plantas en Estados Unidos. [En línea]. (10 de Junio de 2014). Disponible en: www.epa.gov/lmop/projects-candidates/index.html#map-area.

⁶² U.S. Environmental Protection Agency, “An overview of landfill gas energy in the United States,” no. July. 2013, pp. 18-20.

⁶³ *Ibíd*, p. 23.

eléctrica, vapor y agua caliente del relleno sanitario “Hickory Ridge”⁶⁴, ubicado en Coley, Georgia; Caterpillar, que recibe energía eléctrica del relleno sanitario “Lycoming County”⁶⁵, ubicado en Montgomery, Pensilvania, que a su vez suministra energía a una prisión de alta seguridad; entre otros.

En la Figura 8, se muestra una imagen aérea del relleno sanitario “Puente Hills”, que es el más grande de Estados Unidos y está ubicado cerca de la ciudad de Whittier, California. Este relleno es el lugar de desarrollo de sistemas avanzados de control ambiental, que pretenden proteger la calidad del aire y las aguas subterráneas, incluyendo extensas redes de recolección de GRS y revestimientos subterráneos⁶⁶.

Figura 8. Relleno Sanitario “Puente Hills”.⁶⁷



⁶⁴ masEnergy. CocaCola cogen plant. [En línea]. (5 de noviembre de 2014). Disponible en: <http://mas-energy.com/projects/coca-cola-cogen-plant.aspx>

⁶⁵ Gabrielle, Steve. Lycoming County LFGTE. 2013, p. 6.

⁶⁶ EPPICH, John y HILLIPS Michael. Puente Hills energy recovery from gas (PERG) Facility. 1998, p. 2.

⁶⁷ WISEMAN, John. Puente Hills Landfill. [En línea]. [Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/wallofhair/2726048885/>][5 de noviembre de 2014].

El relleno hace parte de los distritos sanitarios del condado de los Ángeles, que es un ente encargado de proteger la salud pública y el ambiente a través del manejo de las aguas residuales y desechos sólidos; al hacerlo convierten los desechos en recursos tales como agua reciclada, energía y materiales reciclados.

La Tabla 6 muestra que los distritos sanitarios incluyen varios rellenos y plantas de tratamiento de agua, que actualmente generan un total de 133 MW de electricidad, esta energía permite que las plantas sean autosuficientes, y además suministran electricidad a aproximadamente 185 000 hogares en el Sur de California⁶⁸.

Tabla 6. Plantas pertenecientes a los distritos sanitarios del Condado de los Ángeles.⁶⁹

Planta	Tecnología de generación	Producción neta de electricidad [MW]
Joint	Cogeneración, turbina de gas	24
Valencia	Cogeneración, motores de combustión	0,7
Puente Hill fase I	Turbina de vapor	46
Palos Verdes	Turbina de vapor	6
Spadra	Turbina de vapor	8
Calabasas	Microturbinas	0,3
Commerce	Incinerador de desechos	10
Long Beach	Incinerador de desechos	30
Puente Hill fase II	Motores de combustión	8
CAPACIDAD DE GENERACIÓN TOTAL		133

⁶⁸ LACOBONI, Mario, CHOW, Josephine, y WHELESS, Ed. CALABASAS LANDFILL MICROTURBINE POWER GENERATION PROJECT Lessons Learned after One Year of Operation. 1988, p. 2.

⁶⁹ Ibid, p. 6.

El relleno sanitario “Puente Hills” cuenta con un área de 2,8 km^2 , inició sus operaciones en 1987 y en el año 2013 dejó de recibir desechos debido a que su capacidad ya estaba copada, esto no significó el cese de actividades en la planta de tratamiento de GRS, ya que el biogás continua generándose por lo menos 10 años más después de la clausura del relleno, por lo que la planta se encuentra produciendo energía en la actualidad.

“Puente Hills” solía recibir un total de 12 000 toneladas de basura por día, produciendo un flujo de biogás cercano a los 300 000 pies cúbicos por minuto. Este relleno sanitario se compone de tres fases: La primera fue implementada desde sus inicios y consta de una planta de energía de vapor convencional tipo Rankine, que utiliza el GRS como combustible para generar 46 MW de electricidad; la segunda fase fue implementada en 2006, y consiste en tres motores Caterpillar Oruga 3616 de gas natural con una capacidad eléctrica de 3 MW cada uno, estos se alimentan con GRS y actualmente está generando 8 MW de electricidad; y la última fase que fue inaugurada en 2006 , es una estación de servicio de gas licuado que abastece principalmente a vehículos.

No necesariamente todos los casos de plantas de biogás de vertedero son tan grandes como el de “Puente Hills”. El relleno sanitario “Calabazas”, que también pertenece a los distritos sanitarios, es un ejemplo de esto. Este relleno se encuentra localizado en Agoura, California, tiene un área aproximada de 1,6 km^2 , inicio en 1961 y actualmente acepta 1 100 toneladas de basura en el día.

El sistema de recolección de biogás que se utiliza, consiste en 650 tubos de extracción y más de 70 000 pies de tubería horizontal, que recolectan aproximadamente 6 000 pies cúbicos por minuto (scfm) de biogás con un 25% de metano en su composición, porcentaje que es bajo incluso para generar energía con micro turbinas, ya que el mínimo porcentaje que estas admiten es del 35%.

Para resolver este problema fue necesario construir una planta de mejoramiento para el biogás, que elevara este porcentaje de metano por encima del 40%.

La planta fue inaugurada en 2002 y está usando aproximadamente 150-180 scfm de gas de vertedero, que dependiendo del contenido de metano, puede llegar a producir hasta 300 kW de energía eléctrica. Esta energía se está utilizando solamente para abastecer al relleno sanitario y la planta, la cual tiene conexión con la red de california (SCE), de tal forma que cuando las diez micro turbinas no están en operación, se puede hacer un cambio rápido a la SCE.

4.2 RELLENO SANITARIO “HUAYCOLORO⁷⁰”, PERÚ.

Perú es un país que está formado por 24 provincias, muchas de las cuales no cuentan con un relleno sanitario y siguen disponiendo sus desechos en botaderos e incluso en ríos, generando olores desagradables, gases y líquidos contaminantes que fomentan la aparición de insectos y roedores, que perjudican la salud pública de los habitantes. De acuerdo con el catastro de botaderos, rellenos sanitarios y plantas de transferencia, elaborado por la Dirección General de Salud Ambiental (Digesa) para el 2010, el país ya contaba con 30 botaderos no autorizados, las figuras 9 y 10, muestran imágenes de los botaderos “Tumbes” y “Chimbote”, en donde se pone en evidencia el mal manejo de los desechos.

⁷⁰ La información referente al relleno sanitario “Huaycoloro” fue encontrada principalmente en el documento De la basura a la electricidad: La primera experiencia peruana, realizado por Jorge Zegarra Reátegui, presidente ejecutivo de PETRAMAS.

Figura 9. Botadero de “Tumbes”.



Figura 10. Botadero de” Chimbote”.⁷¹



⁷¹ ZEGARRA, Jorge. De la Basura a la Electricidad: La primera experiencia peruana. pp. 6-10, 2012.

La situación es tan crítica que tal como se muestra en la Tabla 7, más de la mitad de los residuos municipales sólidos que se producen en Perú, se disponen actualmente en botaderos. Esta condición ha preocupado a agencias internacionales como la JICA (Japan International Cooperation Agency), la cual ha realizado estudios acerca de esta problemática y ha advertido que los 10 rellenos sanitarios con los que actualmente cuenta Perú no son suficientes y que por el contrario necesita implementar 190 rellenos sanitarios nuevos. La Tabla 7 también muestra la cantidad de RSU que se han depositado en los rellenos sanitarios existentes durante los años 2010 y 2011

Tabla 7. Cantidad de Residuos Sólidos Municipales dispuestos en Rellenos Sanitarios.⁷²

Relleno Sanitario	Tonelada/año	
	Año 2010	Año 2011
RS Huaycoloro	1 133 128	1 148 531
RS Portillo Grande	482 821	503 322
RS Zapallal	61 983	114 850
RS Ancon	0	0
RS Modelo del Callao	663 152	659 449
RS Independencia	4 615	5 963
RS Concepción	1 565	4 284
RS El Treinta	172 452	231 158
RS Cajamarca	44 622	30 079
RS Carhuaz	2 768	3 990
Total dispuestos en rellenos	2 567 105	2 737 627
Total generados en Perú	6 024 677	7 203 183
Total dispuestos en botaderos	3 457 572	4 465 556

Se puede observar que el relleno sanitario “Huaycoloro” es el que recibe más toneladas de residuos sólidos al año, siendo así el más grande de Perú. Además

⁷² Ibíd, p. 18.

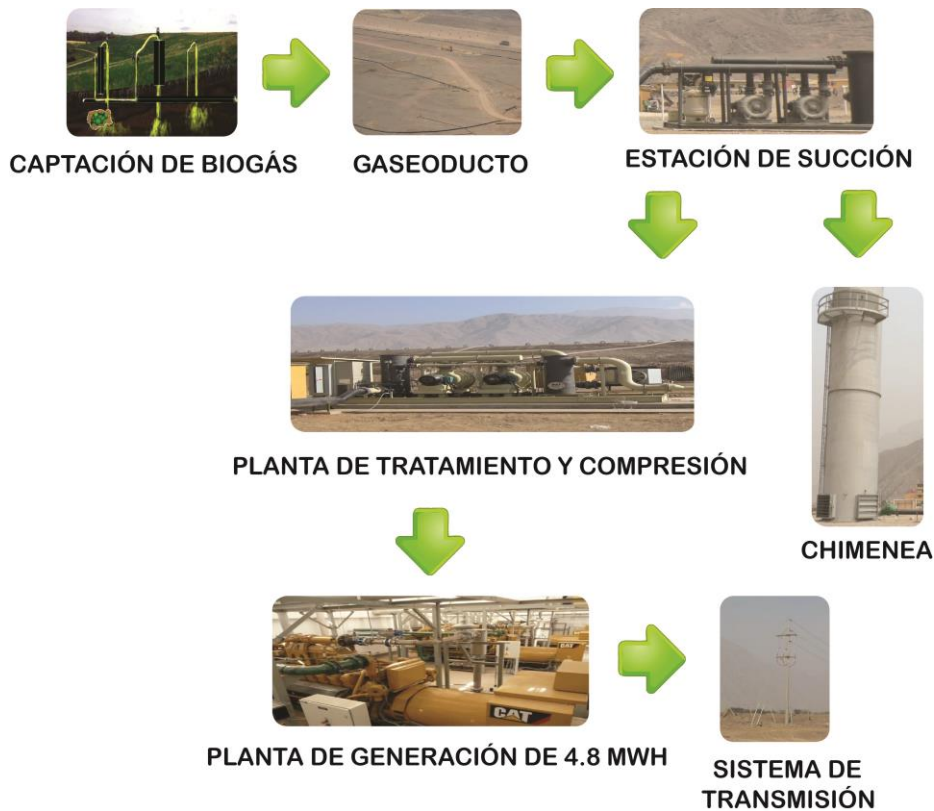
este le pertenece a la empresa peruana PETRAMAS, quien lo convirtió en el primer relleno sanitario privado, que rompió el monopolio municipal de la disposición final de los desechos y demostró que la basura del país también se puede aprovechar de forma rentable en la producción de energía eléctrica.

“Huaycoloro” se encuentra ubicado en San Antonio de Chaclla, provincia de Huarochiri, cuenta con una extensión de 1 570 hectáreas, por lo tanto se estima que tiene capacidad para funcionar 200 años. El relleno inicio sus operaciones en el año 1994, y desde ese tiempo hasta el 2012 se han dispuesto sanitariamente 17 616 364 toneladas de residuos.

No fue sino hasta el año 2007 que PETRAMAS registro el primer proyecto de mecanismo de desarrollo limpio (MDL), en el marco del protocolo de Kyoto, con la finalidad de reducir las emisiones de biogás que provocan el calentamiento global.

El proyecto fue inaugurado el 28 de octubre de 2011, y como lo muestra la Figura 11, se compone de 7 fases: La fase de captación consta de 250 pozos que están dispuestos verticalmente; el gaseoducto que se extiende por toda el área, completando alrededor de 20 Km en tubería; la estación de succión, donde están dispuestas las motobombas que extraen el biogás desde el vertedero hacia la antorcha o hacia la planta de tratamiento y compresión; la antorcha, es la estación automatizada de captura y quema con una alta eficiencia de destrucción de emisiones de 99,9%, esta tiene una capacidad instalada de 4 400 pies cúbicos por minuto; la planta de tratamiento y compresión, que se encarga de limpiar las impurezas como las partículas sólidas, la humedad y el ácido sulfhídrico que contiene el GRS; la planta de generación, que consiste en tres moto generadores CATERPILLAR, que tienen una capacidad instalada de 4,8 MWh; y por último el sistema de transmisión que le pertenece al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

Figura 11. Esquema general del Relleno Sanitario “Huaycoloro”.⁷³

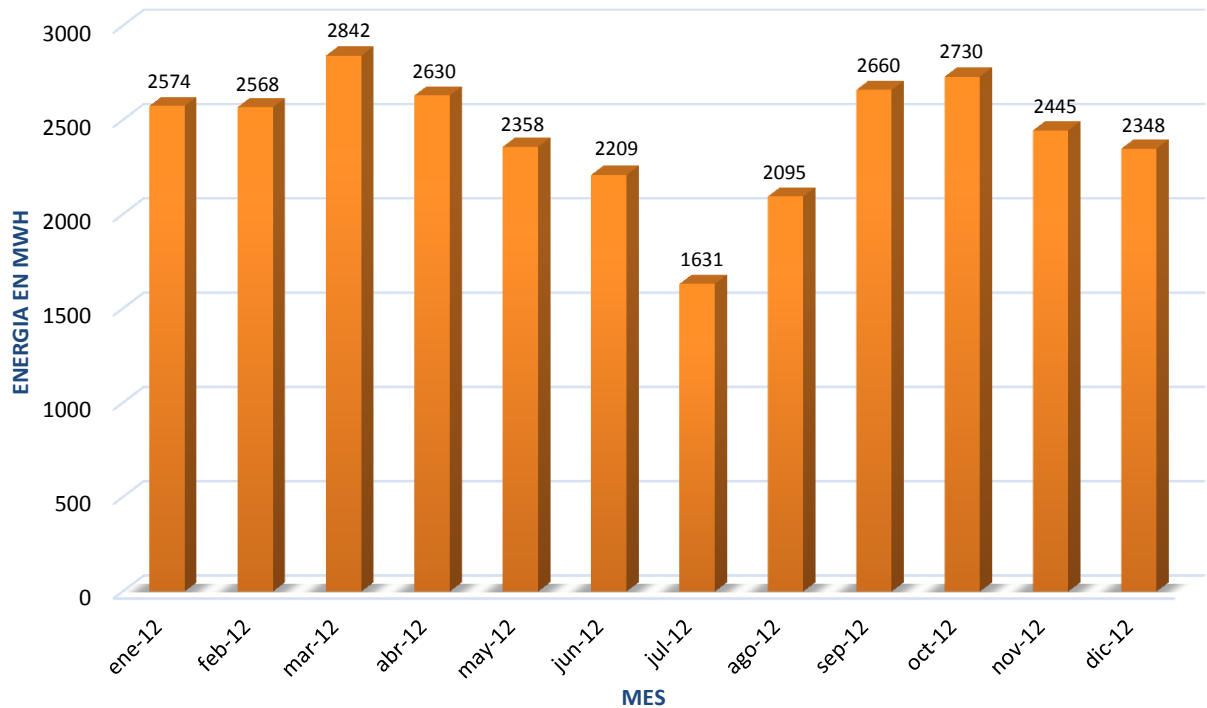


El 12 de febrero del 2010, PETRAMAS obtiene el permiso para abastecer de energía eléctrica al SEIN, dentro del marco de la primera subasta de suministro de electricidad con recursos energéticos renovables, convirtiéndose en la primera empresa peruana en iniciar un proyecto de generación de energía renovable a partir de los residuos sólidos municipales. El proyecto consiste en entregar a las redes del SEIN 28 295 MWh anuales de energía eléctrica por 20 años, utilizando el GRS proveniente del relleno sanitario “Huaycoloro”; esta energía suministrada representa el 19,75% de la energía total proveniente de la biomasa y adicionalmente ayudara a reducir 14 485,5 toneladas de dióxido de carbono anuales por la generación de electricidad. La Figura 12, muestra la energía que entregó el relleno sanitario al SEIN en el 2012.

⁷³ Ibid, p. 42.

En el primer año de funcionamiento, se entregó al SEIN 29 091 MWh de energía eléctrica. Este modelo es respaldado por el Banco Mundial, como un modelo exitoso de gestión integral de los residuos sólidos por la alta calidad de su servicio y su contribución al cambio. Por estos y otros motivos, fueron ganadores del premio creatividad empresarial, categoría cuidado del medio ambiente en el año 2011.

Figura 12. Energía entregada por el Relleno Sanitario “Huaycoloro” al SEIN en el 2012.⁷⁴



4.3 PLANTA DE BASURA CERO DE MALMÖ, SUECIA⁷⁵.

Uno de los casos más exitosos en cuanto al manejo de los residuos sólidos urbanos, es el caso de Suecia, que hace ya 100 años viene implementando las

⁷⁴ Ibíd, p. 48.

⁷⁵ SYSAV. Heat and electricity from waste, case Malmö. Vol. I. 2012.

plantas de basura cero, las cuales a través de la incineración de los desechos son responsables de suministrar calefacción a 810 000 casas y electricidad a 250 000 hogares. Esta aplicación aún se encuentra en desarrollo, por lo que existen algunas variantes entre una planta y otra.

El éxito en el manejo medioambiental de la basura en Suecia, no se debe a que tenga el mayor número de plantas, ya que Francia lo supera con 130 plantas o a que tenga la capacidad más grande de procesamiento, con 30 toneladas de basura por hora, pues Portugal tiene la capacidad de procesar 80 toneladas por hora⁷⁶. Su éxito se debe al compromiso de los ciudadanos, que además de estar muy por debajo de la media de producción de basura europea, también están comprometidos desde muy pequeños con el reciclaje, logrando así, que el 100% de sus desechos se distribuyan en 47% reciclaje, 52% basura para incinerar y 1% dispuesto en rellenos sanitarios⁷⁷. Este fenómeno ha hecho que la capacidad de procesamiento de basura de todas las plantas de Suecia, sea mucho mayor que la capacidad de producción de desechos, razón por la cual el gobierno decidió importar la basura desde Noruega, con el fin de incinerarla y seguir generando electricidad y calor para los hogares. Los desechos que no se puedan incinerar, son devueltos a su país de origen para que sean dispuestos en rellenos sanitarios. Según la Confederación de plantas de basura cero de Europa (CEWEP) para el 2012 existían 86 plantas incineradoras en Estados Unidos y 455 plantas en 18 países de Europa, de las cuales 35 se encuentran ubicadas en el territorio de Suecia. La Tabla 8, muestra algunas de las plantas que actualmente están operando en el mundo, su capacidad de procesamiento de desechos, el año de inicio y la energía que producen.

⁷⁶ Datos tomados de Waste to energy state of art report, realizado en el 2012.

⁷⁷ RWL Water. Hambrienta de basura Suecia pide a Noruega por residuos. [En línea]. [Disponible en: <http://www.rwlwater.com/hambrienta-de-basura-suecia-pide-a-noruega-por-residuos/?lang=es>][5 de noviembre].

Tabla 8. Plantas de basura cero en el mundo⁷⁸

Planta	País	Año de inicio	Capacidad (Ton/año)	Energía total: electricidad y calor (MW)
Mallorca 1	España	1 996	300 000	21,89
Galicia	España	2 000	400 000	45
Marseille	Francia	2 008	300 000	35
Hereford	Reino Unido	2 010	160 000	13

Una de las plantas con más capacidad de procesamiento en Suecia está ubicada en Malmö, es capaz de procesar un total de 550 000 toneladas de basura al año como combustible, con los cuales produce 1 400 000 MWh de calefacción urbana al año y 250 000 MWh de electricidad al año⁷⁹. La planta fue inaugurada en 1973 y es administrada por la compañía Solid Waste Company of Southwest Scania (SYSÄV).

La planta basura cero Malmö está conformada por cuatro calderas, dos de ellas son calderas de agua caliente que solo producen calefacción urbana y las otras dos, son calderas de vapor que producen conjuntamente electricidad y calefacción urbana. El funcionamiento de estos dos tipos de calderas, es un poco diferente y se expone a continuación⁸⁰.

Calderas de vapor.

La Figura 13, muestra el esquema de las calderas de vapor que utiliza la planta de Malmö para producir electricidad y calefacción urbana, cada una tiene la capacidad de procesar 200 000 toneladas de basura por año. El proceso a grosso modo, utiliza un horno (4) de 200 m² el cual seca, evapora e incinera los desechos que anteriormente ya han pasado por una línea de reciclaje. El gas formado

⁷⁸ ARIAS, Arturo. Gestión integral de residuos, el nuevo enfoque. p. 32, 2012.

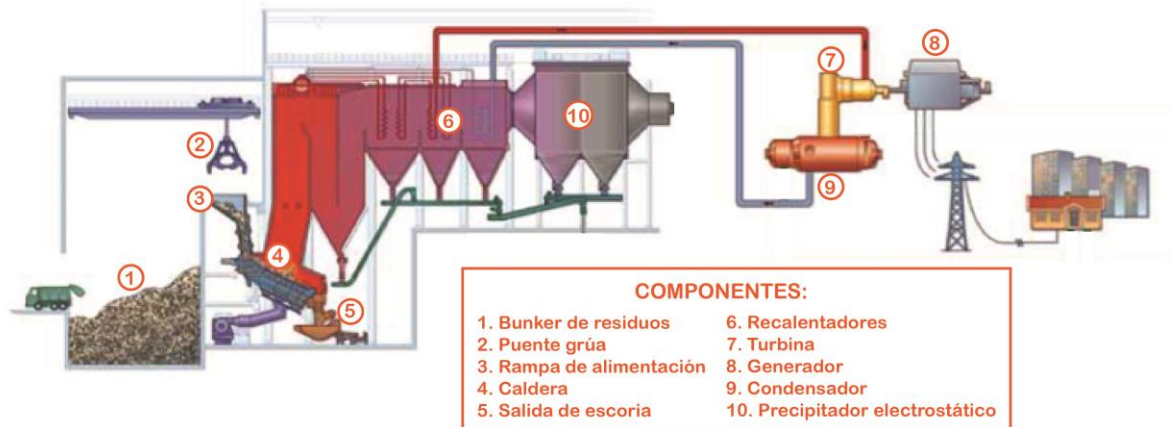
⁷⁹ SYSÄV. *Heat and electricity from waste, case Malmö*, vol. I. 2012, p. 3.

⁸⁰ *Ibíd*, p. 6.

durante el proceso de combustión tiene una temperatura de al menos 850°C y va a los súper calentadores (6), que contienen tuberías con agua. Cuando el agua circula por los súper calentadores se convierte en vapor alcanzando una temperatura de 400°C y una presión de 40 bares. Una vez el vapor ha pasado por la turbina que esta acoplada a un generador de energía eléctrica, es dirigida al condensador, donde el vapor se condensa, transmitiéndole una temperatura al agua que va a la red de suministro local de entre 40 y 60°C. El agua condensada, se lleva de nuevo al súper calentador para ser reutilizada en el proceso.

Los subproductos generados por la combustión son la escoria y el gas de combustión o humo. Por una parte, la escoria está compuesta por vidrio, chatarra y otros materiales estables, los cuales son enfriados después de salir del horno y reciclados. El gas de combustión, después de liberar su energía a los súper calentadores, es llevado a diferentes estaciones, donde lo limpian y regulan la temperatura para que pueda salir a la atmosfera.

Figura 13. Esquema funcional de las calderas de vapor en la planta basura cero de Malmö.⁸¹



⁸¹ Ibíd, p. 5.

Calderas de agua caliente.

Cada caldera tiene la capacidad de procesar 100 000 toneladas de basura por año. El proceso es en términos generales el mismo que se utiliza en las calderas de vapor, la diferencia es que el calor que tienen los gases de combustión, solo es utilizado para calentar el agua de la red local y además la tecnología utilizada para limpiar los gases de combustión provenientes del horno es diferente, pero sin embargo cumple con todos los requerimientos para liberar los gases libremente a la atmósfera.

5. RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”, SIMULACIÓN DE POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS Y ALTERNATIVAS PARA SU APROVECHAMIENTO

Este capítulo documenta la información necesaria obtenida del “El Carrasco” para una posterior simulación del potencial de generación y recuperación de biogás del mismo, por último, analiza la información obtenida de estudios anteriores y la simulación realizada por los autores, con el fin de proponer una alternativa tecnológica y ambiental para el aprovechamiento del biogás proveniente del relleno sanitario en estudio.

5.1 ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL DEL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”.

Bucaramanga es la capital del departamento de Santander, delimitada al sur con el cañón del Chicamocha, al oriente con el páramo de Berlín y al occidente con el municipio de Lebrija. Según el DANE⁸² y el ICER⁸³, actualmente la ciudad cuenta con una población cercana a los 525 940 habitantes y su desarrollo económico en las diversas industrias de calzado, software, salud, educación, calzado, joyería, metalmecánica, avicultura, hidrocarburos, construcción, ganadería, transporte, almacenamiento entre otros aumenta en un valor promedio por año del 7% desde el año 2009. Su ubicación a 1000 metros sobre el nivel del mar y su agradable temperatura ambiente que oscila entre los 21 y 29 grados centígrados, facilitan la producción, el transporte y el comercio en el nororiente colombiano, consolidándola como uno la cuarta ciudad más importante para la economía del país.

⁸² Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Censo general 2005. Colombia. 2010.p. 1-6.

⁸³ URIBE, John. BUSTAMANTE, Jorge. GUATAQUI, Juan Carlos. Informe de coyuntura económica regional del Departamento de Santander. 2012.p. 15.

A pesar de las buenas cifras económicas, la ciudad se ha visto afectada por un fenómeno mundial que es común en ciudades con gran crecimiento económico y social, como lo es el control y manejo integral de residuos sólidos urbanos (RSU). La basura se considera hoy, como uno de los más grandes problemas en la sociedad, ya que su inadecuado tratamiento trae grandes complicaciones ambientales, sociales y económicas.

En el año de 1977 la empresa municipal de aseo de Bucaramanga (EMAB) bajo el asesoramiento del técnico canadiense experto en rellenos sanitarios George Riviche, crearon un convenio para la disposición y sitio final de los residuos sólidos urbanos, basándose en aspectos geotécnicos, dando como resultado la selección de una zona apta para este tipo de proyecto que denominaron “El Carrasco”, el cual fue ubicado en la parte suroccidental de la ciudad de Bucaramanga, limitando con el barrio El Porvenir y el municipio de Girón⁸⁴.

“El Carrasco” empezó a ser utilizado como un botadero a cielo abierto en el año 1978, allí se dejaban caer los residuos en una zona inaugural, sin control ni cuidado ambiental, lo que originó problemáticas relacionadas con incendios, malos olores, generación de vertimientos líquidos y emisiones gaseosas⁸⁵. Entre 1977 y 1988, se formuló un plan de manejo ambiental que se presentó y aprobó por la CDMB (Corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga), en el que se denominaban Cárcavas al sitio de disposición final de los desechos. Actualmente, el relleno sanitario “El Carrasco” se compone de 3 cárcavas⁸⁶ como se observa en la Figura 14, destinadas para la disposición final de residuos⁸⁷.

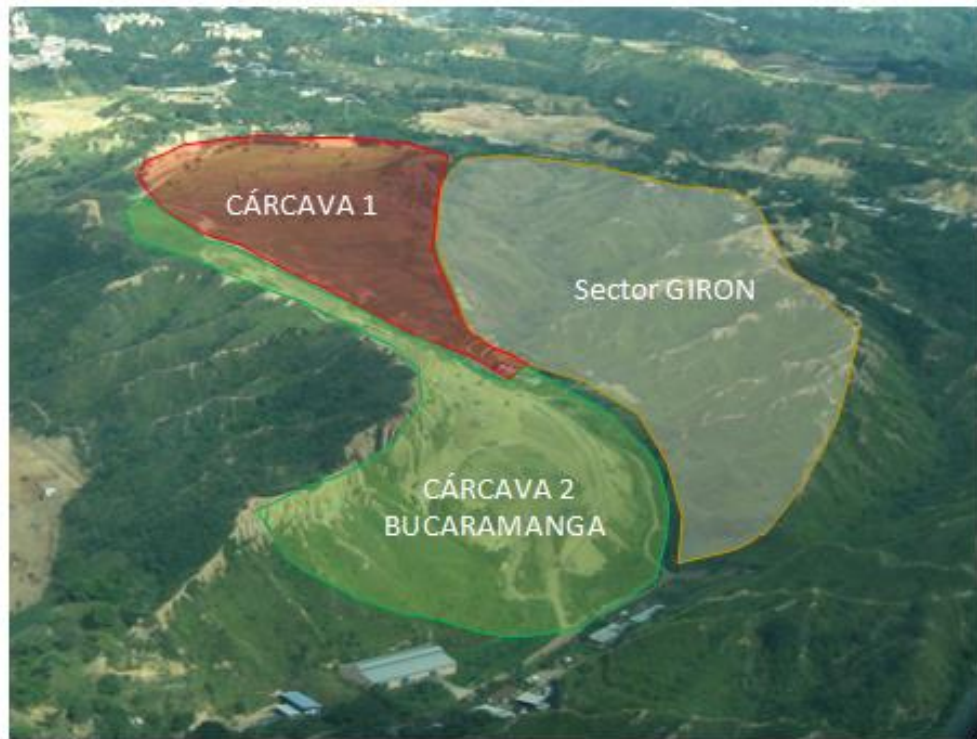
⁸⁴ Empresa de aseo de Bucaramanga EMAB S.A. ESP. Situación actual relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga, Colombia. 2012.p. 4.

⁸⁵ Ibid, p. 3

⁸⁶ Ibid, p. 4.

⁸⁷ Proactiva Chicamocha SA ESP. Ampliación disposición en El Carrasco, Resolución 0190 de 2013.p. 1, p.7.

Figura 14. Ubicación de las cárcavas y límites de “El Carrasco”.⁸⁸



Cárcava I:

Está compuesta por dos zonas:

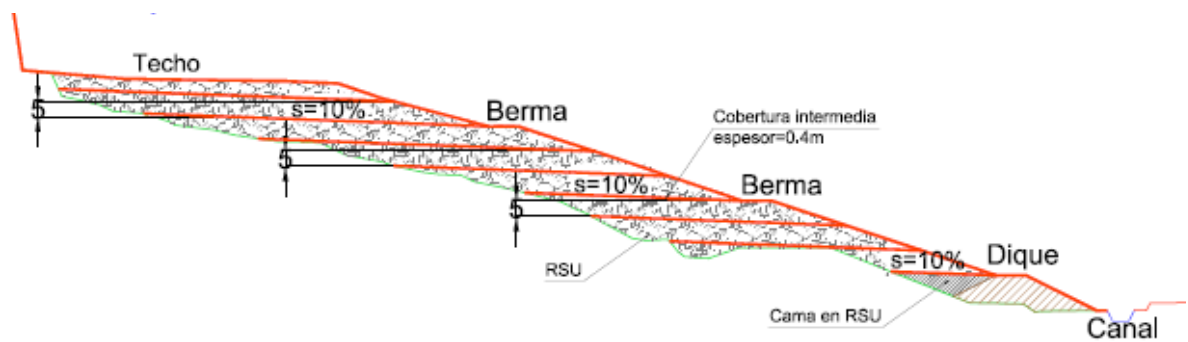
Zona I: Esta se encuentra sellada actualmente. Allí se dispusieron residuos en dos períodos: el primero va desde 1986 hasta 1996, se ubicaron los residuos de la ciudad de Bucaramanga sin control ni adecuado tratamiento, por tal motivo no existen datos característicos de los residuos y el segundo periodo va desde 1997 hasta 2006, se adecuó y remodeló la Zona I para la disposición final de los desechos, integrando a la celda de disposición tubos de extracción de biogás, geo-membranas impermeabilizantes, recubrimientos de desechos con tierras y el

⁸⁸ Ibid, p.7

primer canal de ductos de extracción de lixiviados. Durante este periodo se depositaron 1 815 652 toneladas de RSU.

Zona II: Es el sitio donde se dispone y opera actualmente desde el año 2007, esta zona está dividida en 3 celdas de depósito, las cuales cuentan con una capacidad de 667 mil metros cúbicos para disponer residuos en forma escalonada, es decir, conformando una serie de terrazas de basuras y de material de cobertura con una altura promedio de 5 metros y separadas por bermas (espacio llano, o barrera elevada que separa dos zonas) como se observa en la Figura 15. Esta Cárcava se halla ubicada en su totalidad en jurisdicción de Bucaramanga.

Figura 15. Forma de disponer los RSU en “El Carrasco”.⁸⁹



Actualmente se opera y se compacta la basura en la celda I y la celda III en las cuales se han dispuesto 233 087 toneladas de basura. La EMAB anunció que para noviembre de 2014 habría un cierre total y definitivo de las 2 celdas de disposición. La resolución 0190 de 2013⁹⁰ presentada por la empresa PROACTIVA S.A, aprobó la adecuación de la cárcava número II, zona II, celda II con el objetivo de prolongar la vida de ésta, en la que se presentó el informe de estabilidad realizado por el consultor CARLOS CARABALI, en la que avaló a la

⁸⁹ Ibid, p. 32.

⁹⁰ Ibid, p. 5.

EMAB, para que continuará la actividad de recepción y disposición final de los residuos sólidos urbanos bajo los criterios de seguridad y condiciones de estabilidad en el relleno sanitario “El Carrasco”⁹¹.

Cárcava II

Esta cárcava fue el sitio donde se dispusieron los residuos a cielo abierto desde el año de 1977 hasta 1985, la cual se nombró botadero “Malpaso”. En dicha zona se dispuso más de 500 mil toneladas de desechos provenientes de Bucaramanga y su área metropolitana. Está ubicada en jurisdicción de Bucaramanga y Girón⁹².

Cárcava III

La cárcava III se encuentra localizada al sur-occidente del predio, con un área aproximada de 12 hectáreas que se extienden en sentido oriente – occidente con una altura que va desde los 770 msnm y 830 msnm. Esta cárcava está ubicada en su totalidad en jurisdicción de Girón, en la actualidad no se ha realizado ningún tipo de intervención encontrándose cubierta por vegetación natural.

La Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga (EMAB S.A ESP.), es la entidad encargada de los servicios de barrido, recolección, transporte y disposición final de los RSU de la ciudad. En la actualidad presta el servicio de disposición final de RSU al Área Metropolitana y otros municipios aledaños (Lebrija, Rionegro, Playón, Suratá, Charta, Santa Bárbara, California, Matanza, Tona, Vetas y Zapatoca)⁹³, los cuales se depositan en el relleno sanitario “El Carrasco”. La EMAB estima que el relleno recibe aproximadamente 800 toneladas de RSU diarias, y que esta cantidad tiene un crecimiento cercano del 5% anual desde sus inicios. En la Tabla 9 se muestra el registro histórico de los desechos sólidos dispuestos en “El

⁹¹ Ibid, pp. 2-5.

⁹² Empresa de aseo de Bucaramanga EMAB S.A. ESP. Situación actual relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga, Colombia. 2012.p. 4.

⁹³ Ibid, p. 1.

Carrasco”⁹⁴. En esta tabla se muestran los datos reales que van desde 1997 hasta 2003 y de 2010 hasta 2013, datos estimados que van desde 1985 hasta 1996 y de 2004 hasta 2009 y datos proyectados desde 2014 hasta 2016. Los datos estimados de 1985 a 1996 no existen debido a que en ese entonces no se ejercía ningún tipo de control de residuos, de 1996 a 2004 fueron los años de adecuación y aprendizaje de gestión del relleno sanitario, en el cual los datos se perdieron y se creía que no eran de fundamental importancia para la disposición del relleno, de 2014 a 2016 son datos de proyección futura o cierre definitivo propuesto por la norma 0190 de 2013 que se mencionó anteriormente. Todos los datos estimados, se calcularon teniendo en cuenta un crecimiento constante del cinco por ciento anual, según información de la EMAB⁹⁵.

Tabla 9. Disposición histórica de residuos relleno sanitario “El Carrasco”.

AÑO	DISPOSICIÓN TOTAL ANUAL (Toneladas)	DISPOSICIÓN TOTAL ACUMULADA (Toneladas)	TIPO DE DATO
1985	103 864,774	103 864,774	Estimado
1986	109 331,3409	213 196,115	Estimado
1987	115 085,622	328 281,737	Estimado
1988	121 142,76	449 424,466	Estimado
1989	127 518,695	576 943,191	Estimado
1990	134 230,205	711 173,367	Estimado
1991	141 294,953	852 468,345	Estimado
1992	148 731,529	1 001 199,879	Estimado
1993	156 559,504	1 157 759,383	Estimado
1994	164 799,478	1 132 2558,861	Estimado
1995	173 473,135	1 496 031,996	Estimado
1996	182 603,300	1 678 635,296	Estimado

⁹⁴ Documento privado proporcionado por la EMAB.

⁹⁵ Proactiva Chicamocha SA ESP. Ampliación disposición en El Carrasco, Resolución 0190 de 2013.p. 1, pp. 2-5.

AÑO	DISPOSICIÓN TOTAL ANUAL (Toneladas)	DISPOSICIÓN TOTAL ACUMULADA (Toneladas)	TIPO DE DATO
1997	192 214,000	1 870 849,296	Real
1998	201 392,000	2 072 241,296	Real
1999	201 392,000	2 273 633,296	Real
2000	202 854,000	2 476 487,296	Real
2001	202 158,000	2 678 645,296	Real
2002	227 171,000	2 905 816,296	Real
2003	240 171,000	3 145 987,296	Real
2004	252 679,000	3 398 666,296	Estimado
2005	228 762,470	3 627 428,766	Estimado
2006	240 802,600	3 868 231,366	Estimado
2007	253 476,420	4 121 707,786	Estimado
2008	253 476,420	4 375 184,206	Estimado
2009	266 817,280	4 642 001,486	Estimado
2010	280 860,300	4 922 861 ,768	Real
2011	274 561,000	5 197 422,786	Real
2012	292 617,000	5 490 039,786	Real
2013	318 813,000	5 808 852,786	Real
2014	546 013,000	6 354 865,786	Proyectado
2015	574 750,000	6 92 625,786	Proyectado
2016	605 000,000	7 534 615,786	Proyectado

Fuente: Datos suministrados por la EMAB.

“El Carrasco” cuenta con una zona y espacio en el que sus principales tratamientos de residuos son: La planta de producción de abono orgánico, la planta para disminuir la contaminación que produce el lixiviado y las chimeneas para quemar el gas que emiten los residuos compactados. En el Anexo C se puede observar las plantas de que actualmente operan en el relleno sanitario y sus principales características.

5.2 BIOGÁS PRODUCIDO EN “EL CARRASCO”

Durante el tiempo de vida e historia del relleno sanitario se ha observado el interés de las diferentes empresas extranjeras por aprovechar el biogás generado por “El Carrasco”. En un intento de aprovechar este recurso energético se han hecho diferentes estudios en los que se destacan los realizados por la empresa estadounidense SCS Engineers y la empresa franco-chilena BIONERSIS.

En el año 2005 la empresa SCS Engineers⁹⁶ preparó un informe para el Banco Mundial de pre-factibilidad, acerca de la posible implementación de un sistema de control y uso del biogás en el relleno sanitario “El Carrasco”, el proyecto consistiría en la instalación de un sistema de colección de biogás para ser utilizado como combustible para generadores de combustión interna en una planta de energía.

“El Banco Mundial ha identificado el relleno sanitario “El Carrasco” como candidato para un proyecto de utilización de biogás por varias razones, incluyendo:

- ✓ Tamaño del relleno (volumen), profundidad de los residuos, edad y la capacidad futura del mismo.
- ✓ Métodos modernos de disposición, incluyendo el uso de una capa de arcilla y sistema de colección de lixiviados y la instalación de un sistema de recubrimiento de baja permeabilidad.
- ✓ Interés expresado y apoyo por parte de la Ciudad de Bucaramanga, propietario y la Empresa de Aseo de Bucaramanga S.A. ESP (EMAB), operador del relleno sanitario.

⁹⁶ SCS Engineers. Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en el relleno sanitario El Carrasco. 2005.p. 1.

- ✓ La disposición continúa y capacidad futura del relleno sanitario resulta en una recuperación potencial de biogás significativa. Además, el uso de biogás como combustible en un proyecto en el relleno sanitario puede resultar en una reducción neta de emisiones de carbón a través de la combustión del metano y posiblemente indirectas por el desplazamiento de otros combustibles fósiles⁹⁷.

La empresa SCS Engineers tomó mediciones de la composición del biogás en varias de las chimeneas mientras estuvo en el lugar⁹⁸. El objetivo de estas mediciones fue confirmar la producción del biogás y la calidad como indicador del índice de producción del biogás. En la Tabla 10 se muestra un resumen de los resultados de la monitorización realizada.

Tabla 10. Mediciones del relleno sanitario “El Carrasco” realizadas por SCS Engineers.⁹⁹

Fecha	No. de chimenea	CH ₄ (%Vol.)	CO ₂ (%Vol.)	Oxígeno (%Vol.)	Balance (%Vol.)
11/03/04	PE-2	58,3	40,4	0,4	0,9
11/03/04	PE-1	55,6	38,0	0,9	5,7
11/03/04	SP-3	47,8	32,6	2,7	17,1
11/03/04	SP-4	46,8	33,2	3,0	17,1
11/03/04	PA-4	57,5	37,1	0,0	5,1
11/03/04	PA-1	18,7	23,5	1,0	56,9

Los resultados indicaron que la producción de biogás en el relleno sanitario “El Carrasco” ocurre bajo condiciones anaeróbicas, con buena calidad del biogás (alto contenido de metano y nada de oxígeno y nitrógeno). Además, SCS Engineers, hizo una simulación del índice de recuperación de biogás, el actual se debe a

⁹⁷ Ibid, p. 7.

⁹⁸ Ibid, p. 26.

⁹⁹ Ibid, p. 26.

mediciones realizadas actualmente y el potencial a datos supuestos a futuro. La Tabla 11 muestra los resultados.

Tabla 11. Simulación del potencial de recuperación de biogás por SCS Engineers.¹⁰⁰

Año	Índices de R recuperación de potencial de biogás [m ³ /h]	Cobertura del sistema estimada (%)	Índice de recuperación actual de biogás [m ³ /h]
2006	2 872	75	2 154
2007	2 937	75	2 202,75
2008	2 930	80	2 344
2009	2 352	80	1 881,6
2010	1 908	80	1 526,4
2011	1 565	80	1 252
2012	1 300	80	1 040
2013	1 095	80	876
2014	935	80	748
2015	811	80	648,8
2016	713	80	570,4
2017	635	80	508
2018	574	80	459,2
2019	525	80	420

En el año 2011 se abrió espacio para nuevas oportunidades de desarrollo como la que propuso e implementó la empresa franco-chilena BIONERSIS, quien adecuó “El Carrasco” para poder extraer el biogás de las terrazas y llevarlo a un mismo sitio para su posterior quema en la locación que se observa en la Figura 16. Dado este potencial energético, la empresa francesa quiso aprovecharlo e invirtió en “El Carrasco” 3 150 millones de pesos con los que implementó la primera fase, en la cual se recolectaba, medía el volumen y las características del biogás para ser

¹⁰⁰ Ibid, p. 39.

llevado a una antorcha central donde se quemaba anualmente cerca de 33 mil toneladas de gases tóxicos como el metano y el CO₂ a una temperatura ideal de 1000°C¹⁰¹.

Figura 16. Planta desgasificadora implementada por BIONERSIS.¹⁰²



La empresa franco-chilena monitorizaba y controlaba el biogás extraído por el relleno sanitario, obteniendo mediciones normalizadas por hora del flujo del biogás extraído de todas las zonas operadas en el relleno. En la Figura 17 se muestra el flujo promedio extraído en el año 2012 por la empresa BIONERSIS¹⁰³ y su

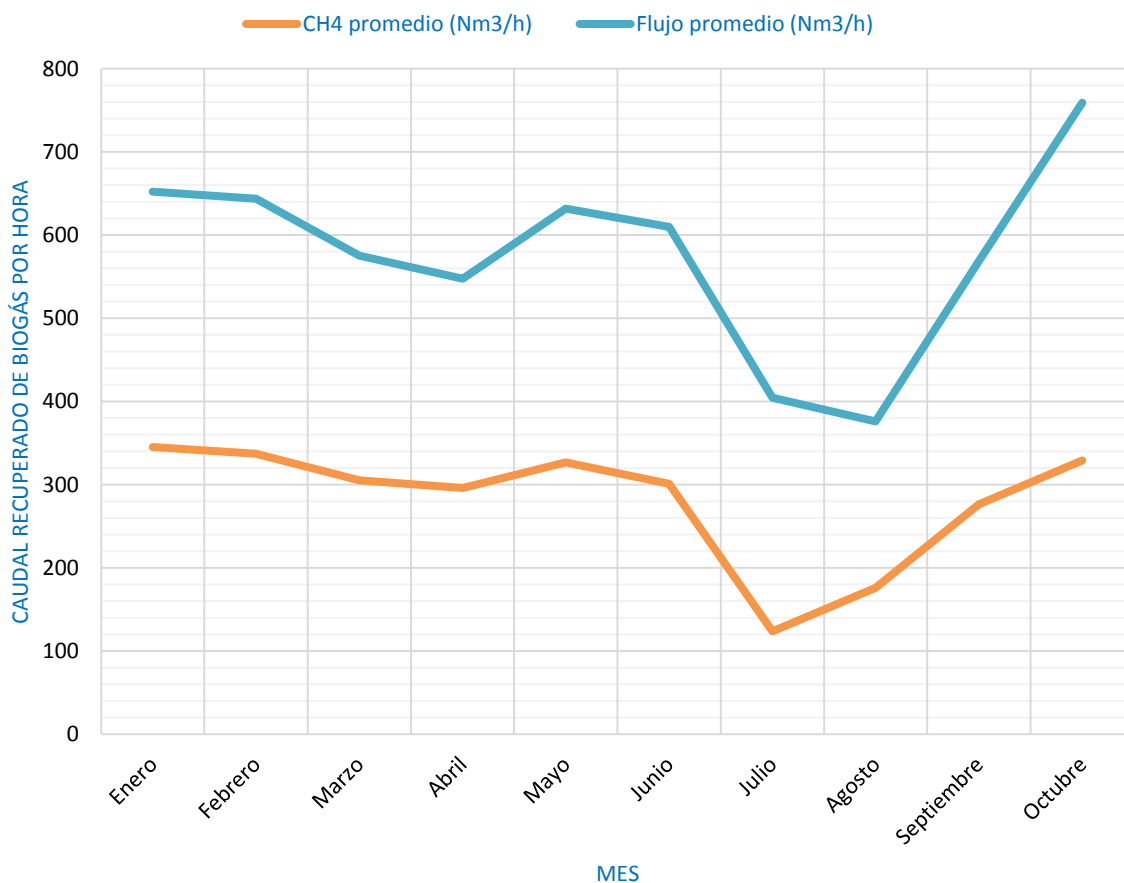
¹⁰¹ CHIO, Juan Carlos. Situación actual relleno sanitario El Carrasco. En: Vanguardia Liberal. [En línea]. [Disponible en: <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/198693-planta-que-reducia-gases-en-el-carrasco-fue-apagada>][5 de marzo de 2013].

¹⁰² *Ibíd.*

¹⁰³ Datos privados suministrados por la EMAB.

contenido de metano, donde se observa la importancia de su quema controlada debido a su alto potencial energético (metano).

Figura 17. Caudal de biogás medido en 2012 en el Relleno Sanitario “El Carrasco”.¹⁰⁴



La empresa BIONERSIS dejó abandonada esta primera fase en 2013, debido principalmente a que los CER (Certified Emission Reduction), su única fuente de ingresos pasó de valer 14 euros por tonelada de dióxido de carbono (CO₂) en 2010, fecha en que inició la planta, a tan solo 30 centavos de euro por tonelada de

¹⁰⁴ *Ibíd.*

CO2 en 2013¹⁰⁵. Cuando BIONERSIS se fue, dejó deudas millonarias tanto con el relleno como con la Empresa Electrificadora de Santander ESSA, además se detuvo la extracción y quema del biogás, dejando toda la infraestructura: ductos, extractores, motores, entre otros, sin funcionamiento como se observa en la Figura 18¹⁰⁶.

Figura 18. Elementos dejados por BIONERSIS en el Relleno Sanitario “El Carrasco”.



De haber continuado el proyecto, se podría haber evitado que el biogás se siguiera emitiendo a la atmósfera, agravando aún más el problema de

¹⁰⁵ CHIO, Juan Carlos. Situación actual relleno sanitario El Carrasco. [En línea]. [Disponible en: <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/198693-planta-que-reducia-gases-en-el-carrasco-fue-apagada>][5 de marzo de 2013].

¹⁰⁶ Acta de terminación y liquidación unilateral del contrato de cesión de derechos de explotación del biogás generado en el relleno sanitario El Carrasco. P. 1-7.

contaminación actual. En la Tabla 12, se muestra el volumen del biogás quemado por la planta de desgasificación durante su funcionamiento.

Tabla 12. Volumen quemado por BIONERSIS.¹⁰⁷

Año	Volumen quemado
	CH ₄ [m ³]
2011	3 984 724
2012	3 838 763

5.3 SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”.

La creciente problemática referida a la contaminación resultado de la saturación del relleno sanitario “El Carrasco”, hace necesarios estudios, proyecciones y análisis para el biogás que se está generando. Para este fin se encontraron dos modelos para la estimación de generación del biogás. El primero es el modelo estadounidense lanGEM¹⁰⁸, sobre tratamientos de basuras en la producción del biogás producido en Colombia, preparado para Landfill Methane Outreach Program de la agencia para la protección del ambiente (U.S. EPA¹⁰⁹) por el gerente del proyecto José Luis Dávila de SCS Engineers., el segundo es el modelo Retscreenplus de la agencia de protección del medio ambiente canadiense.

Para la selección de un modelo adecuado para la estimación de generación del biogás en el relleno sanitario el carrasco se identificaron diferentes factores técnicos como: estimación y recuperación de biogás, caracterización de residuos sólidos urbanos, entre otros, que se ordenaron por medio de una matriz de priorización que se puede observar en el Anexo J.

¹⁰⁷ Ibid, pp. 3-5.

¹⁰⁸ Modelo libre. [En línea]. [Disponible en: <http://www.epa.gov/lmop/international/colombia.html>

¹⁰⁹ US Environmental Protection Agency. Página Web: <http://www.epa.gov/>[5 de noviembre de 2014].

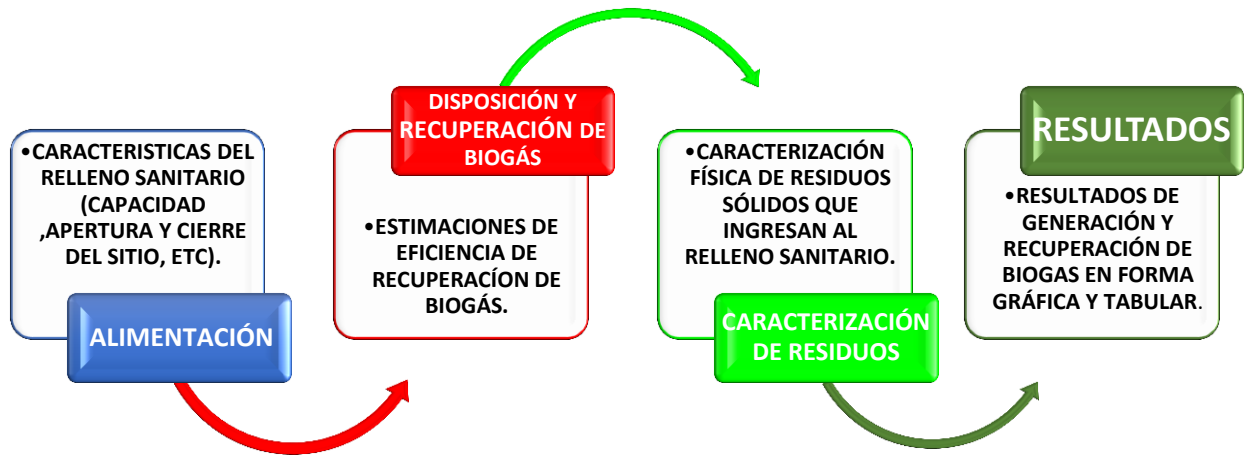
La Tabla 13 muestra el resultado obtenido en valor de ponderación para cada uno de los parámetros seleccionados. Se escogió como mejor alternativa para la estimación del biogás en el relleno sanitario el carrasco el modelo americano sobre tratamiento de basuras mencionado anteriormente.

Tabla 13. Resultados matriz de priorización.

Factores	Modelo estadounidense	Modelo canadiense
Actualidad	0.136	0.136
Se ha utilizado en casos exitosos de generación	0.075	0.025
Caracterización del sitio de disposición	0.136	0.136
Estimados de eficiencia de captura	0.136	0.136
Caracterización de residuos solidos	0.169	0.034
Presenta manual de usuario	0.147	0.147
Se especializa en biogás de vertederos	0.153	0.031
Total	0.950	0.643

El Modelo de Biogás está elaborado en una hoja de cálculo de Excel que opera al abrir el archivo “Modelo Colombiano de Biogás v1.xls”. Consta de cinco hojas a las que se pueden acceder haciendo clic en las pestañas de la parte inferior de la pantalla de Excel. La Figura 19, muestra el esquema y la composición del programa.

Figura 19. Resumen para la utilización del modelo estadounidense sobre tratamiento de basuras en la producción de biogás.



Los métodos contenidos en este modelo están basados en criterios profesionales de ingeniería y representan los estándares de cuidado que se ejercen por profesionales con experiencia en el campo de las proyecciones del biogás producido por rellenos sanitarios.

El modelo está elaborado en una hoja de cálculo de Excel y se basa en una ecuación de degradación de primer orden. En él, se requiere que el usuario alimente datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, ubicación del sitio y preguntas referentes a condiciones físicas pasadas y presentes del sitio, las cuales se obtuvieron por medio de visitas técnicas¹¹⁰ a las instalaciones del relleno sanitario en estudio, recopilación de información procedente de la EMAB, y una encuesta que se realizó a los trabajadores y personal administrativo en la institución, la cual se detalla en el Anexo D.

¹¹⁰ Se realizaron 6 visitas técnicas al relleno sanitario. El registro se puede ver en el Anexo K.

Para la ejecución del modelo propuesto se debe tener una noción de la terminología utilizada en el modelamiento del biogás como: Año de clausura, capacidad de diseño del relleno sanitario, cobertura del sistema de captura, entre otros. La terminología completa se presenta en el Anexo E.

El modelo estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado, la cual fue modificada por US EPA en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005.

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF) (F)$$

111

Dónde:

i = Incremento en tiempo de 1 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 (1/año).

L_0 = Generación potencial de metano (m^3/Mg).

M_i = Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg).

t_{ij} = Edad de las sección j de la masa de residuos M_i dispuestas en el año i (años decimales).

MCF = Factor de corrección de metano.

F = Factor de ajuste por incendios.

La ecuación anterior estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año. Proyecciones para múltiples años son desarrolladas variando la proyección anual y luego iterando la ecuación.

¹¹¹ SCS Engineers. Manual de usuario del Modelo colombiano de biogás. V1. 2009.p. 2

La generación de biogás total es igual a dos veces la generación de metano calculada. La función de degradación exponencial asume que la generación de biogás está a su máximo un período antes que la generación de metano. El modelo asume un período de seis meses entre la colocación de los residuos y la generación de biogás. Por cada unidad de residuos, después de seis meses el modelo considera que la generación de biogás desciende exponencialmente conforme la fracción orgánica de los residuos es consumida. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).

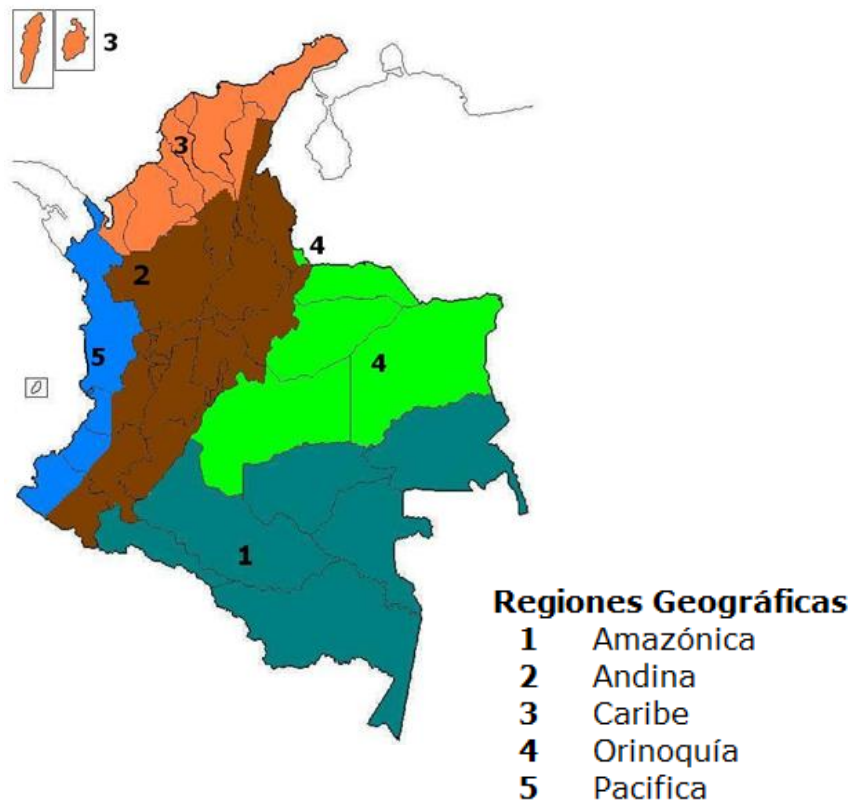
El modelo estima la generación y recuperación de biogás en metros cúbicos por hora [m^3/h] y en pies cúbicos por minuto [pies^3/min]. También estima el contenido de energía del biogás recuperado (en millones de unidades térmicas británicas por hora [mmBtu/h]), la eficiencia de captura, la capacidad máxima de la planta de energía en megavatios [MW], y las toneladas de reducción de emisiones de CO_2 equivalente (CERs).

5.3.1. Descripción del modelo colombiano de biogás, aplicado al relleno sanitario “El Carrasco”. La US EPA reconoce que es difícil modelar la generación y recuperación de biogás en forma exacta debido a las limitaciones en la información disponible para alimentar el modelo. Sin embargo, con la construcción y operación de nuevos rellenos sanitarios, y la disponibilidad de nueva información, el modelo presentado contribuye a la aproximación de la recuperación, calibración y desarrollo de tecnologías para la utilización del biogás producido en rellenos sanitarios en Colombia.

El modelo puede calcular los índices de disposición anual usando la información alimentada por el usuario o el usuario puede alimentar los índices año con año en la hoja “Disposición y Recuperación de Biogás”. El modelo automáticamente asigna los valores de k y L_0 , basándose en la información de clima y

caracterización de residuos. Los valores de **k** varían dependiendo del clima y el grupo de residuos. Los valores de **Lo** varían dependiendo del grupo de residuos. El clima esta categorizado en cinco regiones basándose en la precipitación anual promedio, la temperatura y localización dentro de una de las cinco regiones geográficas en Colombia como se observa en la Figura 20.

Figura 20. Regiones climáticas de Colombia.¹¹²



Los índices de disposición anual, los valores de **k** y **Lo**, los factores de corrección de metano, el ajuste por incendio y las estimaciones de la eficiencia de captura, son usados para estimar la generación y recuperación de biogás de rellenos sanitarios en cada uno de los departamentos de Colombia. Los resultados son

¹¹² *Ibíd*, p. 3

presentados en forma de tabulación en la hoja “Resultados-Tabla” y gráfica en la hoja “Resultados-Gráfica”.

Para la utilización de este modelo en el relleno sanitario “El Carrasco” se separó en cinco periodos de servicio la utilización del relleno sanitario, debido a que ha tenido diferentes sitios de disposición o cárcavas, las cuales cuentan con distintas épocas de ejecución, diferentes volúmenes de relleno y en otros casos diferentes tipos de gestión de las basuras.

Los primeros cuatro períodos van desde 1978 hasta 2013 y el quinto período, es una proyección futura de acuerdo a la resolución 0190 de 2013 que se habló anteriormente, esta va desde el 2014 hasta el 2016 (año proyectado de clausura del relleno). En la Tabla 14, se muestran los cinco períodos de utilización del relleno sanitario y sus correspondientes celdas de disposición.

Tabla 14. Disposición histórica de residuos y celdas utilizadas.¹¹³

Año de inicio	Año de clausura	Cárcava de disposición	Zona de disposición	Celda de disposición	Tipo de vertedero
1978	1985	Cárcava II	Zona I	Celda I	No controlado
1986	2006	Cárcava I	Zona I	Celda I	No controlado
2007	2011	Cárcava I	Zona II	Celda I	Controlado
2012	2013	Cárcava I	Zona II	Celda III	Controlado
2014	2016	Cárcava I	Zona II	Celda II	Controlado

Para la estimación del modelo colombiano adecuado a la producción del biogás producido por el relleno sanitario “El Carrasco”, se tuvo en cuenta aspectos físicos, por tal motivo se realizó solamente estimaciones de producción del gas a partir de 1997, debido a que no se cuenta con datos técnicos de volumen para el depósito

¹¹³ PROACTIVA CHICAMOCHA SA ESP. Ampliación disposición El Carrasco, Resolución 0190 de 2013. Bogotá, p. 1. Y Empresa de aseo de Bucaramanga EMAB S.A. ESP. Situación actual relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga, Colombia. Bucaramanga.pp. 3-4.

de los residuos en las celdas, de igual forma se hace inoficiosa la estimación, ya que en ese entonces el relleno sanitario no contaba con ningún tipo de control técnico ni ambiental y se estima que el biogás que se está produciendo es casi nulo.

El modelo colombiano para la estimación de biogás producido en Colombia provee una herramienta de estimación de residuos orgánicos agrupados de acuerdo a su índice de degradación¹¹⁴:

1. Residuos de degradación rápida: Residuos alimenticios y otros orgánicos.
2. Residuos de degradación moderadamente rápida: Residuos vegetales, poda de casas y parques, papel higiénico, entre otros.
3. Residuos de degradación moderadamente lenta: Papel, cartón, textiles y demás.
4. Residuos de degradación muy lenta: Madera, piel, huesos, paja, entre otros.

La generación de biogás calculada, es la suma de las cantidades de generación de cada uno de las cuatro categorías de residuos, las cuales tienen asignadas diferentes valores de **k** y **Lo** que son usadas para el cálculo. Los datos que toma el modelo incluye un ajuste que depende de la descomposición aeróbica de los residuos conocido como el factor de corrección de metano (MCF), y un ajuste que depende si el sitio ha sido afectado por incendios.

5.3.2. Índice de generación de metano (k) y generación potencial de metano (Lo)¹¹⁵. El índice de generación de metano **k**, determina el índice de generación de metano producido por la degradación de los desechos en el relleno sanitario los cuales la describen como el índice al cual los residuos dispuestos en el relleno sanitario se degradan y producen metano, y está relacionado con el período de

¹¹⁴ SCS Engineers. Manual de usuario del Modelo colombiano de biogás. V1. 2009.p. 5

¹¹⁵ *Ibíd*, pp. 5-8.

vida de los residuos de acuerdo con la ecuación **período = $\ln(2)/k$** . Conforme el valor de **k** se incrementa, la generación de metano en un relleno sanitario también se incrementa (siempre y cuando el relleno sanitario siga recibiendo residuos) y luego disminuye con el tiempo (después que el relleno sanitario es clausurado).

El valor de **k** está directamente relacionado con la humedad de los residuos, nutrientes para las bacterias generadoras de metano, pH y temperatura. Las condiciones de humedad dentro del relleno sanitario generalmente son difíciles de determinar por lo que son estimadas en base a la precipitación promedio anual. La disponibilidad de nutrientes está en función de las cantidades de residuos y la caracterización de los mismos. El pH dentro del relleno sanitario es desconocido y no es evaluado en el modelo. La temperatura en el relleno sanitario es relativamente constante debido al calor generado por las bacterias anaeróbicas y tiende a ser independiente de la temperatura ambiente, excepto en rellenos sanitarios poco profundos en climas muy fríos. Por lo que los valores de **k** están basados en el tipo de residuo y clima.

El modelo asigna valores de **k** para las cuatro categorías listadas anteriormente, estos valores reflejan los diferentes índices de degradación. Los valores de **k** asignados a cada una de las cuatro categorías también varían en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el relleno sanitario. El usuario del modelo tendrá la opción de categorizar el clima en el sitio, en una de las cinco regiones climáticas basadas en la precipitación anual media¹¹⁶:

1. Seco (precipitación <500 mm/año).
2. Moderadamente seco (precipitación 500-999 mm/año).
3. Moderadamente húmedo (precipitación 1000-1499 mm/año).

¹¹⁶ *Ibíd*, p. 6

4. Húmedo (precipitación 1,500-1,999 mm/año).
5. Excesivamente húmedo (precipitación > 2,000 mm/año).

Para el caso del relleno sanitario “El Carrasco”, el cual se sitúa en la región andina de Colombia, se escogió una precipitación anual media de entre 500 y 900 mm/año, ubicándolo en la Categoría 2 moderadamente seco las cuales asignaron valores de **k** según la categoría de residuos mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores del índice de generación de metano (k).¹¹⁷

Clima	Categoría de residuos			
	1	2	3	4
Excesivamente húmedo	0,4	0,17	0,07	0,035
Húmedo	0,34	0,15	0,06	0,03
Moderadamente húmedo	0,26	0,12	0,048	0,024
Moderadamente seco	0,18	0,09	0,036	0,018
Seco	0,1	0,05	0,02	0,01

El valor de la generación potencial de metano (**Lo**) de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producida por una tonelada de residuos cuando esta se degrada, depende casi exclusivamente de la caracterización de los residuos en el relleno sanitario. A un contenido mayor de celulosa le corresponde un valor mayor de **Lo**. Las unidades de Lo están en metros cúbicos por tonelada de residuos [m³/Mg].

Los valores de **Lo** usados por el modelo están derivados de la caracterización de residuos de 57 ciudades que representan 21 departamentos. El promedio de la

¹¹⁷ Ibíd, p. 7.

caracterización de los residuos fue calculado para cada departamento en cada región.

El modelo permite adecuar las características de los residuos urbanos ubicados en el relleno sanitario, para este caso en particular no se modificó las características de los residuos, debido a que los datos que proporciona el modelo concuerdan con los datos de las especificaciones y tipo de residuos que actualmente se depositan en el vertedero. En el Anexo F se muestra la caracterización de residuos sólidos para el departamento de Santander proporcionados por el modelo, así como los valores de generación de potencial de metano (**Lo**) calculados, dependiendo de la categoría y tipo de residuo. En la Tabla 16 se muestra los valores de generación de potencial de metano (**Lo**) por tipo de residuo.

Tabla 16. Valores del potencial de metano por tipo de residuo (Lo**).**¹¹⁸

Residuos alimenticios	Residuos de jardinería	Papel	Madera y paja	Textiles y pañales desechables
70	93-134	186	200	112

El factor de corrección de metano (MCF) es un ajuste de la estimación de la generación de biogás que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. El MCF varía dependiendo de la profundidad de los residuos y el tipo de relleno sanitario como lo definen las prácticas de manejo. En sitios con manejo, se asume que la degradación es anaeróbica en los residuos (MCF=1). En sitios con condiciones menos apropiadas para degradación anaeróbica, el MCF será menor para reflejar las condiciones aeróbicas del sitio. La Tabla 17 resume los valores de MCF aplicados por el modelo, basados en las distintas respuestas

¹¹⁸ *Ibíd*, p. 8.

correspondientes al relleno sanitario “El Carrasco” ya que al contar con diferentes periodos y épocas de depósito estas varían las condiciones de control y profundidad del relleno sanitario.

Tabla 17. Factor de corrección de metano (MCF).¹¹⁹

Manejo del sitio	Profundidad<5m	Profundidad>=5m
Sin manejo	0,4	0,8
Con manejo	0,8	1,0
Semi-aerobico	0,4	0,5
Condición desconocida	0,4	0,8

Incendios en rellenos sanitarios consumen residuos usándolos como combustible y dejando cenizas, las cuales no producen biogás. La generación de biogás puede ser significativamente impactada en rellenos sanitarios que han experimentado incendios. El modelo descuenta de la generación de biogás el porcentaje del área impactada multiplicado por el ajuste por la severidad del impacto (1/3 para impacto bajo, 2/3 para impacto medio, y 1 para impacto severo). El modelo cataloga el nivel de gravedad del incendio por medio de un menú de opciones que el usuario debe señalar, 1 si es un impacto bajo, 2 si es un impacto medio y 3 para impacto grave

5.3.3. Estimación de eficiencia, captura y recuperación de biogás. La eficiencia de captura es una medida de la habilidad del sistema de captura para recuperar el biogás generado. Está en función del diseño del sistema (cuanta área del relleno sanitario está cubierta por el sistema de captura) y la operación y mantenimiento de sistema (que tan eficientemente es operado y mantenido). La eficiencia de captura es un porcentaje aplicado por el modelo a la generación de biogás para estimar la cantidad de biogás que puede ser recuperado para combustión o uso benéfico. A pesar de que la recuperación de biogás puede ser

¹¹⁹ Ibíd, p. 8.

medida, los índices de generación de un relleno sanitario no pueden ser medidos (por esto se necesita el modelo para estimar la generación); por lo tanto existe una incertidumbre considerable en la eficiencia de captura actual lograda en rellenos sanitarios.

De acuerdo con la US EPA, las eficiencias de captura típicas varían entre 60% a 85%, con un promedio de 75%. Más recientemente, un reporte del Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, 2006) estableció que una “recuperación >90% puede ser lograda en celdas con cobertura final y un sistema de captura eficiente.” Mientras los rellenos sanitarios en Colombia pueden alcanzar eficiencias de captura máximas de más de 90% bajo las mejores condiciones, sitios sin manejo nunca podrían alcanzar eficiencias de captura de 50%, aun con un muy buen sistema de captura instalado.

El modelo calcula automáticamente la eficiencia de captura basado en los factores¹²⁰ que se pueden observar en el Anexo E, factores que son variables y dependen del tipo de gestión del relleno sanitario, por tal motivo inciden en la estimación del biogás recuperado.

En la Tabla 18, se resumen las diferentes respuestas y características seleccionadas en el modelo para cada una de los periodos descritos anteriormente, teniendo en cuenta los diferentes escenarios que el relleno sanitario “El Carrasco” presenta durante su vida de funcionamiento, basándonos en aspectos técnicos proporcionados por la EMAB.

¹²⁰ Factores tomados del Manual para el Usuario del Modelo colombiano de biogás

Tabla 18. Hoja de alimentación del modelo colombiano para la generación de biogás en el relleno sanitario “El Carrasco”.

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS					
PAGINA DE ALIMENTACIÓN					
1	Nombre del sitio:	Relleno sanitario "El Carrasco"			
2	Ciudad:	Bucaramanga			
3	Departamento:	Santander			
4	Seleccionar una de 5 regiones geográficas en Colombia:	Andina			
5	Seleccionar una de 5 zonas climáticas basado en la precipitación anual promedio:	Moderadamente Seco (500-999 mm/yr)			
6	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?	No			
7	Año de apertura del sitio:	1997	2007	2012	2014
8	Disposición anual del año más reciente (Mg/año):	228 762	274 561	318 813	0
9	Año de disposición	2006	2011	2013	2014
10	¿Existe información sobre el volumen total dispuesto en el sitio (volumen o masa)?	No	Si	Si	Si
11	¿Existe información sobre la disposición histórica de residuos para calcular el Mg. dispuesto en sitio?	Si	Si	Si	No
12	¿Cuál es el estimado de residuos puesto en sitio al final del año? (Mg)	228 762	274 561	318 81	550 000
13	¿Cuál es la densidad estimada en sitio en Mg/m ³ ?	0.50	1.1	1.1	1.1
14	Si el volumen de residuos puesto en sitio se encuentran en (m ³), convertir a Mg.:	228 762	274 561	318 813	605 000
15	Año de clausura actual o proyectado:	2006	2011	201	201

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS

				3	6
16	Crecimiento estimado en la disposición anual:	5.0%			
17	Profundidad promedio del relleno sanitario (m):	50	40	20	15
18	Diseño y prácticas de manejo del relleno sanitario (condiciones históricas promedio):	2	2	2	2
19 a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	Si	Si	Si	No
19 b	Si la respuesta a 19a es "Si", indique el área del impacto en % del total del relleno sanitario:	5%	0%	0%	0%
19 c	Si la respuesta a 19a es "Si", indique la gravedad o impacto del incendio:	2	1	1	
20	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):	2011	2011	2011	2015
21	Porcentaje del área con residuos que cubre el sistema de captura:	30%	50%	70%	70%
22	Porcentaje del área con residuos con cubierta final:	100%	100%	100%	100%
23	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:	25%	20%	30%	30%
24	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:	25%	10%	20%	20%
25	Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	-50%	-30%	-50%	-50%
26	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:	5%	100%	100%	100%
27	¿La compactación de residuos se hace regularmente?	Si	Si	Si	Si
28	¿La disposición de residuos se hace en una área específica?	Si	Si	Si	Si

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS					
29 a	¿Existe el afloramiento/brote de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	Si	Si	Si	No
29 b	Si la respuesta de 29a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?	Si	No	Si	
30	Eficiencia de captura estimada:	28%	43%	69%	73%

Fuente: Simulación hecha por los Autores

Se debe aclarar que los valores que se encuentran en color rojo en la Tabla 15, son aquellos que el modelo calcula automáticamente dependiendo de las respuestas seleccionadas en la hoja de alimentación.

5.4. RESULTADOS DE CAPTURA Y EXTRACCIÓN DEL BIOGÁS.

Los resultados del modelo se muestran en una tabla situada en la hoja "Resultados-Tabla" como se observa en el Anexo G la cual proporciona la información¹²¹ necesaria para la caracterización del biogás generado y estimados para las proyecciones futuras de recuperación del biogás en el relleno sanitario "El Carrasco".

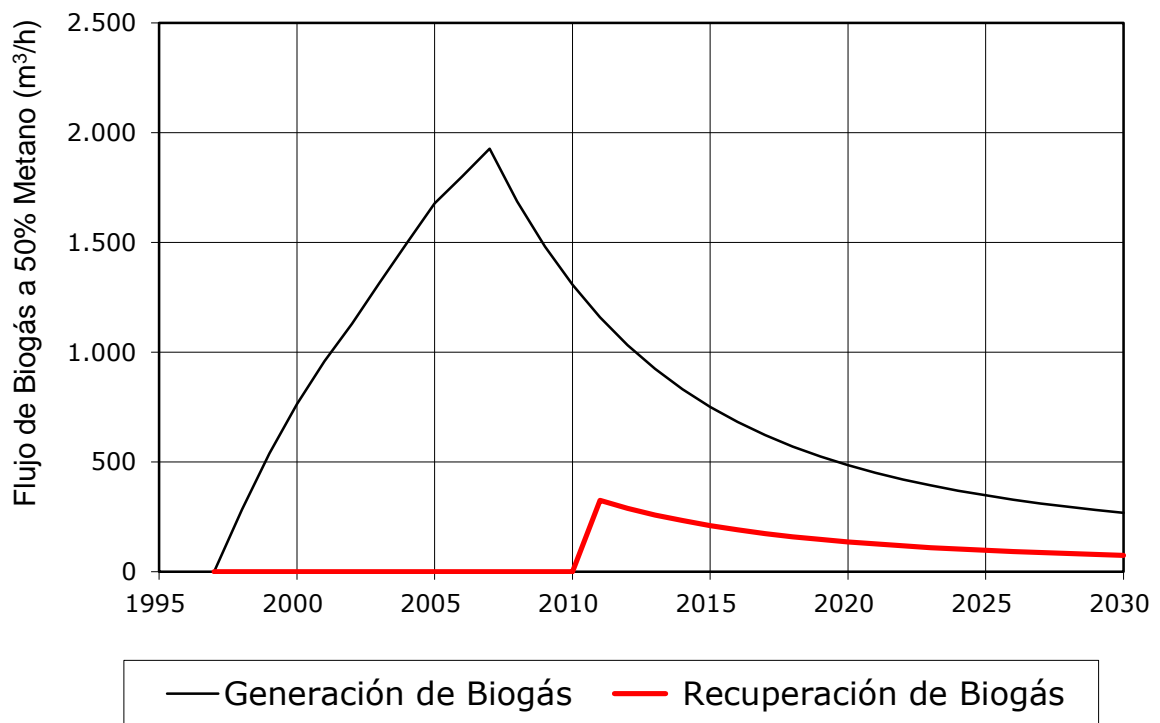
Desde la Figura 21 hasta la Figura 24, se observan 4 gráficas las cuales representan la generación del biogás para los cuatro periodos descritos anteriormente y su posible recuperación a lo largo de 20 años.

Para la primera grafica se tuvo en cuenta la disposición final de residuos desde el año 1997 al 2006 en la cual se dispuso 2 189 595 toneladas de basura, las cuales cuentan con datos reales del año 1997 hasta el 2003 y datos estimados del año 2004 a 2006. La gráfica presenta resultados para la generación de biogás basado

¹²¹ Tomado del Manual de usuario del modelo colombiano de biogás

en datos característicos de los residuos presentados en el modelo colombiano, en la cual se observa que su máxima generación de biogás ocurrió en el año 2007. También muestra la estimación de recuperación de biogás a partir del año 2011, año en el que BIONERSIS empezó a extraer el biogás generado. La estimación depende de diversos factores físicos que en ese entonces el relleno sanitario no presentaba como son recubrimientos de tierra y geomembranas que en aquel periodo no se disponía para la adecuación de la celda de disposición, por tal motivo la eficiencia de recuperación del biogás es de un valor bajo de 28% como se mostró en la tabla de resultados.

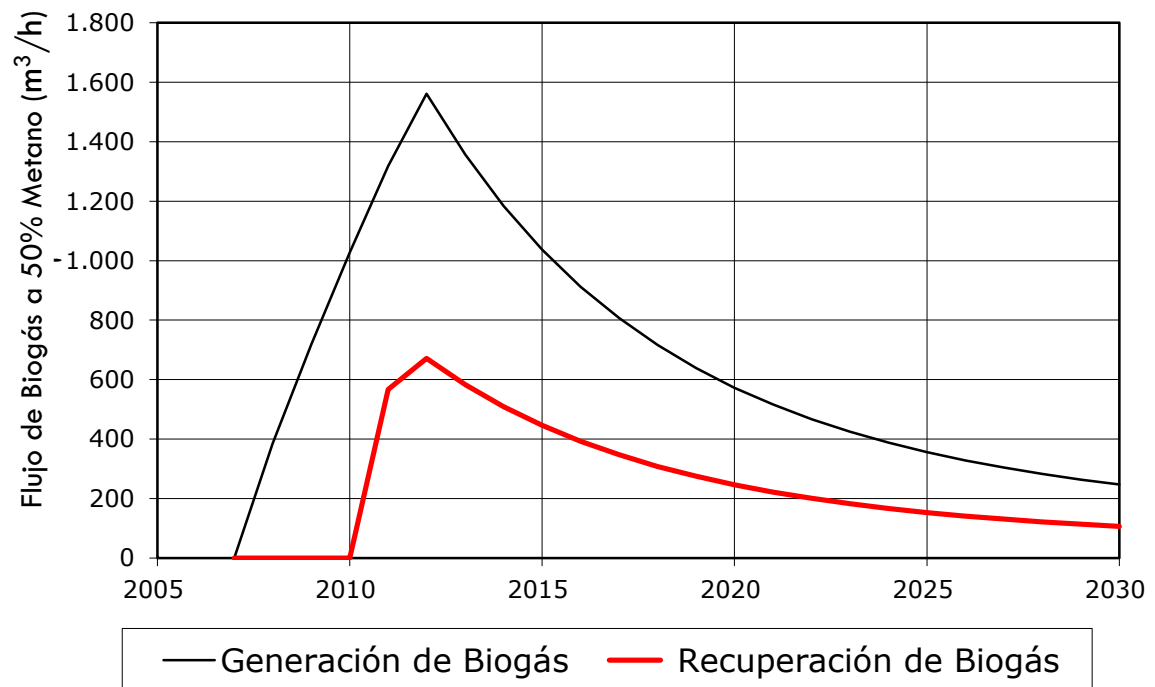
Figura 21. Proyección de generación y recuperación de biogás relleno sanitario “El Carrasco” periodo 1997 a 2006.



La Figura 22 estimó la generación de biogás a partir del año 2007 a 2010, período en el que se dispusieron 1 054 638 toneladas de residuos. Para la simulación de

esta gráfica se tuvo en cuenta la disposición de datos reales solo para el año 2010, de igual forma se presentan dos curvas las cuales muestran la generación máxima de biogás en el año 2011 y estimación de recuperación de biogás en el año 2011 como se mencionó anteriormente. Como característica principal se menciona que para este período de disposición ya se contaba con un relleno sanitario en proceso de adaptación para convertirse en un vertedero controlado por tal motivo la celda de disposición contaba con recubrimientos y tratamientos de lixiviados adecuados, debido a esto la eficiencia de captación del biogás es mucho mayor con respecto al período anterior alcanzando un valor estimado de 43%.

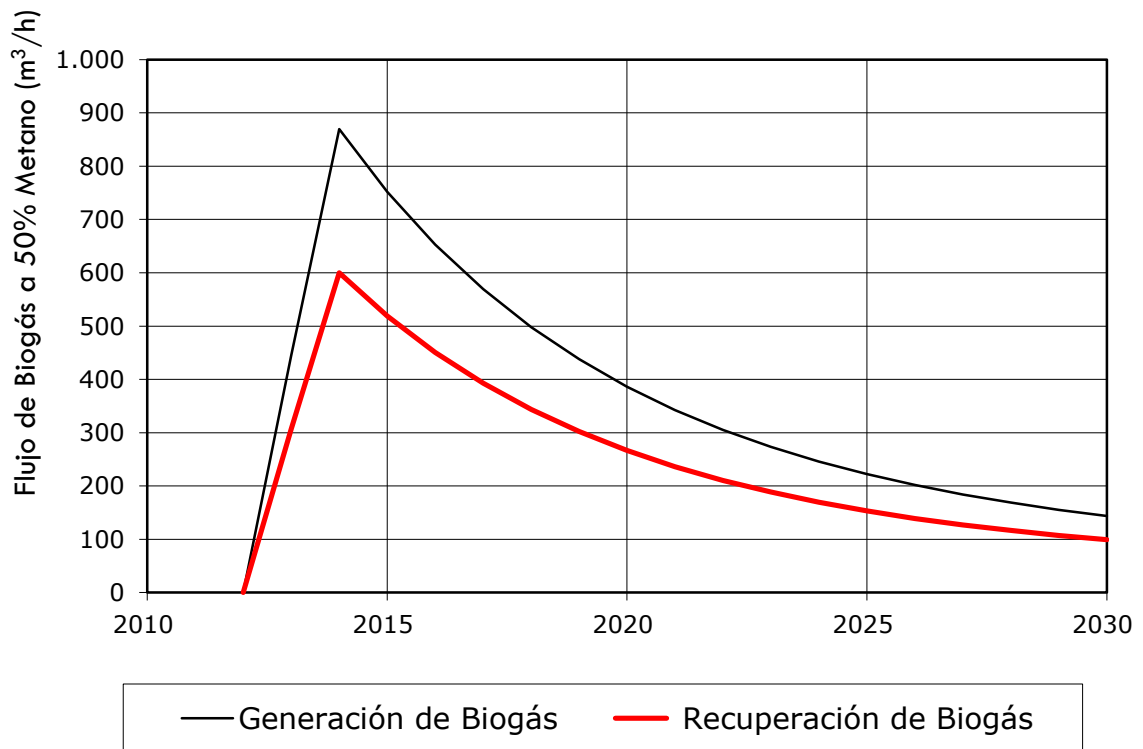
Figura 22. Proyección de generación y recuperación de biogás relleno sanitario “El Carrasco” periodo 2007-2010.



La Figura 23 representa el biogás generado en el período entre 2012 y 2013 donde se dispusieron 611 430 toneladas de residuos, las cuales fueron

depositados de forma totalmente controlada con diferentes tipos de recubrimientos de arcillas y geomembranas que permitieron estimar una generación de biogás máxima en el año 2014 gracias a datos reales de toneladas de basura proporcionados por la EMAB. Debido a esto se permitieron estimar índices de eficiencia del 69% para la captación del biogás generado a partir del año 2011 como se explicó en la primera gráfica.

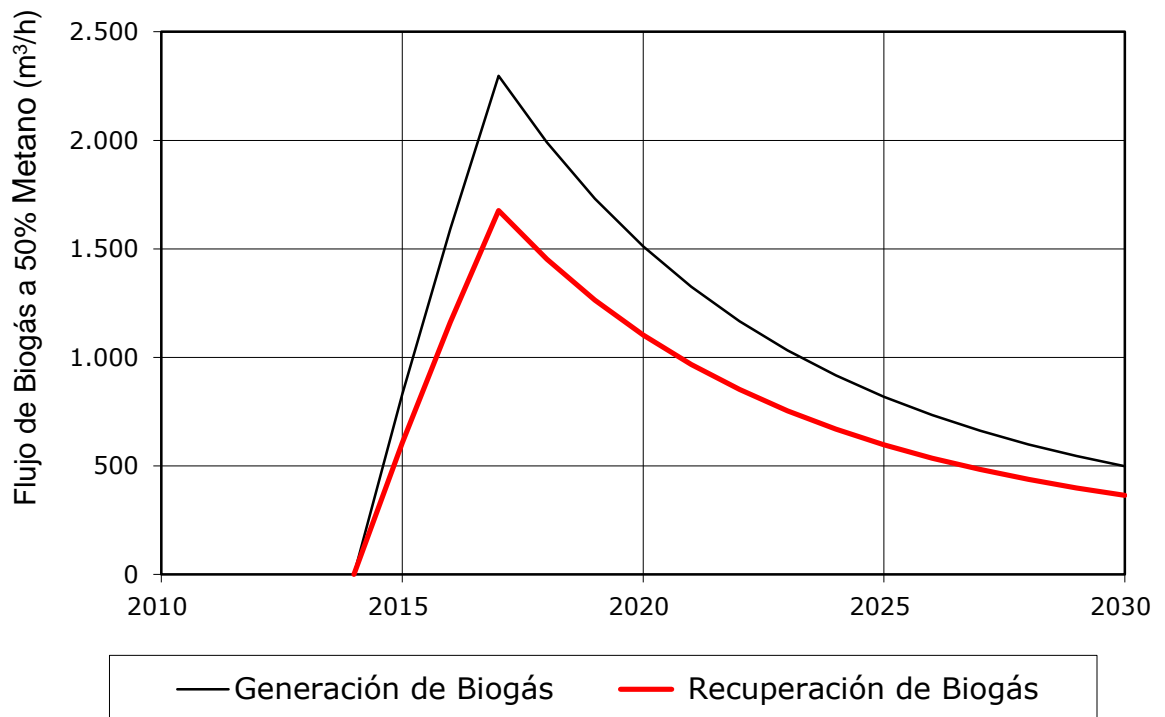
Figura 23. Proyección de generación y recuperación de biogás relleno sanitario “El Carrasco” periodo 2011-2013.



La Figura 24 estima la generación de biogás a partir del año 2014 hasta el año 2016 según el diseño realizado bajo la ley 0190, la cual cuenta con un valor cercano a los 550 000 m³ de volumen con densidad de compactación de 1,1 ton/m³ mencionada en el Capítulo 3. La gráfica muestra una generación máxima de biogás en el año 2017 teniendo en cuenta que el relleno sanitario continuará

con su sistema de disposición actual controlada y que tendrá un progreso significativo respecto a la extracción y recuperación del biogás logrando una eficiencia aproximada del 73% que empezaría a recuperarse a partir del año 2015.

Figura 24. Proyección de generación y recuperación de biogás relleno sanitario “El Carrasco” periodo 2014-2016.



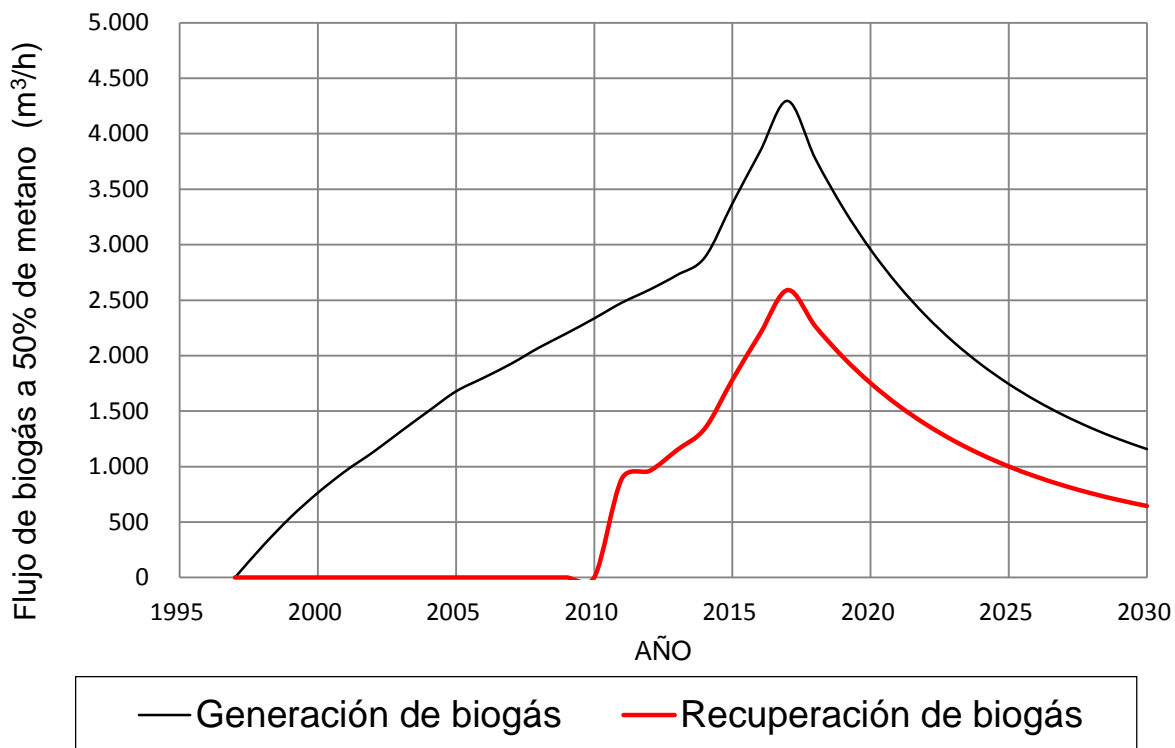
En la Tabla 19 se muestran los valores y resultados obtenidos por el modelo para el relleno sanitario “El Carrasco”, en la que se unificaron los datos obtenidos por las simulaciones, mostrando el total de las emisiones de generación de biogás, su posible recuperación, su máxima capacidad de generación de energía y su máximo de reducciones de CH₄ y CO₂. En el Anexo G se muestran los resultados individuales tabulados para cada período de disposición final de desechos en “El Carrasco” así como los valores de **k** y **Lo** para cada tipo de degradación de residuo.

Tabla 19. Resultados obtenidos por el modelo colombiano para el relleno sanitario “El Carrasco”

Año	Disposición [Mg/yr]	Disposición Acumulada [Mg]	Generación de Biogás [m ³ /h]	Recuperación de Biogás Estimada [m ³ /h]	Capacidad Máxima de Planta de Electricidad [MW]	Reducción de Emisión Estimadas	
						(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ eq/yr)
1997	192 214	192 214	0	0	0,00	0	0
1998	201 392	393 606	283	0	0,00	0	0
1999	201 392	594 998	540	0	0,00	0	0
2000	202 854	797 852	764	0	0,00	0	0
2001	202 158	1 000 010	960	0	0,00	0	0
2002	227 171	1 227 181	1 130	0	0,00	0	0
2003	240 171	1 467 352	1 317	0	0,00	0	0
2004	252 679	1 720 031	1 499	0	0,00	0	0
2005	228 762	1 948 793	1 678	0	0,00	0	0
2006	240 802	2 189 595	1 801	0	0,00	0	0
2007	253 476	2 443 071	1 927	0	0,00	0	0
2008	253 476	2 696 547	2 072	0	0,00	0	0
2009	266 817	2 963 365	2 200	0	0,00	0	0
2010	280 868	3 244 233	2 335	0	0,00	0	0
2011	274 561	3 518 794	2 477	891	1,47	2 795	58 697
2012	292 617	3 811 411	2 594	961	1,59	3 012	63 258
2013	318 813	4 130 224	2 727	1 149	1,90	3 605	75 700
2014	546 013	4 676 236	2 885	1 342	2,22	4 208	88 369
2015	574 750	5 250 986	3 372	1 782	2,95	5 588	117 339
2016	605 000	5 855 986	3 840	2 196	3,63	6 887	144 626
2017	0	5 855 986	4 296	2 591	4,29	8 126	170 636
2018	0	5 855 986	3 776	2 265	3,75	7 102	149 148
2019	0	5 855 986	3 334	1 988	3,29	6 234	130 914
2020	0	5 855 986	2 957	1 752	2,90	5 496	115 413
2021	0	5 855 986	2 635	1 552	2,57	4 867	102 212
2022	0	5 855 986	2 360	1 381	2,28	4 331	90 946
2023	0	5 855 986	2 123	1 235	2,04	3 872	81 311
2024	0	5 855 986	1 920	1 109	1,84	3 479	73 049
2025	0	5 855 986	1 745	1 001	1,66	3 140	65 947
2026	0	5 855 986	1 593	908	1,50	2 849	59 824
2027	0	5 855 986	1 461	828	1,37	2 597	54 529
2028	0	5 855 986	1 346	758	1,25	2 378	49 936
2029	0	5 855 986	1 246	698	1,15	2 187	45 937
2030	0	5 855 986	1 158	644	1,07	2 021	42 443

En la Figura 25 se presenta la curva que comprende todos los períodos de generación y recuperación de biogás provenientes del relleno sanitario “El Carrasco”, donde se puede observar su máximo valor de generación de biogás en el año 2017. También es interesante señalar que actualmente este biogás generado se está emitiendo a la atmósfera y que esta estimación de recuperación de biogás que empezó en el año 2011 por BIONERSIS, actualmente está fuera de servicio.

Figura 25. Resultados generales para la generación y recuperación del biogás proveniente del relleno sanitario “El Carrasco”.



La estimación para recuperación del biogás a partir del año 2011, se hizo principalmente con el objetivo de contrastar los valores dejados por BIONERSIS, respecto a los simulados por el modelo colombiano presentado en este proyecto. Por tal motivo se espera que para el año 2015, se empiecen las labores de gestión

para la recuperación del biogás generado, con la premisa de evitar la contaminación de la ciudad.

5.5 ALTERNATIVAS DE USO PARA EL BIOGÁS QUE SE PRODUCE EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”.

Se pretende evaluar diferentes opciones de utilización para el biogás que se genera en “El Carrasco”, para esto se analizarán todos los datos medidos y estimados que se tienen hasta la fecha. Lastimosamente existen muy pocas medidas del flujo de biogás y sus componentes. Tal como se mencionó en el Numeral 3.2, SCS Engineers¹²² hizo la toma de medidas solo en un mes del año 2004 en algunas de las chimeneas y además simuló el potencial de recuperación de biogás hasta el año 2019, mientras que BIONERSIS¹²³ hizo una medida del caudal de biogás todos los días del año 2012.

Las mediciones de biogás y metano que se tienen, encierran en un rango más aterrizado estos valores, pero no suponen una información precisa para proponer una alternativa de solución. Por tanto se hace necesario contar con simulaciones de recuperación de biogás. Tal como se relató en la Sección 3.2, la empresa SCS Engineers fue la primera en simular el potencial de generación y recuperación del relleno en el año 2005, para esta época se contaba con que “El Carrasco” se cerraría en el año 2006, por lo tanto esta simulación queda descartada, ya que el relleno sanitario siguió recibiendo RSU después de la fecha proyectada para su cierre. Debido a esto, este proyecto simuló el potencial de generación y recuperación de biogás desde el año 1997 hasta el 2030, utilizando el mismo modelo estadounidense diseñado especialmente para Colombia que utilizó SCS Engineers. Está simulación fue explicada en detalle en el numeral 3.3, donde además se presentaron los resultados generales de la simulación y se tuvo en

¹²² Información expuesta en el presente libro.p. 61.

¹²³ *Ibíd*, p. 62.

cuenta el año 2016 como fecha proyectada de cierre, según la resolución 0190 de 2013 que se mencionó en el Numeral 3.1.

Para llegar a comparar los flujos de biogás de los datos teóricos y los experimentales, se hace necesario normalizarlos a un porcentaje de metano del 50% por año, ya que el modelo proyecta la generación y recuperación del biogás bajo esta condición. Debido a esto, las mediciones del 2004 por parte de SCS Engineers quedan descartadas, ya que no cuentan con datos de recuperación de biogás anuales, por lo tanto la simulación del proyecto se comparará con los datos medidos por parte de BIONERSIS en el año 2012 y se tendrá en cuenta la simulación realizada por SCS Engineers en 2004. Las mediciones presentan porcentajes de metano diferentes al 50% cada mes, por lo que se normalizaron teniendo en cuenta que el flujo de biogás es el doble de la cantidad total de metano medido¹²⁴.

La Tabla 20, muestra una comparación de los diferentes flujos de biogás simulados y medidos para el año 2012. Como se puede apreciar los valores simulados son más grandes que el medido, esto se da porque las eficiencias de captura simuladas fueron calculadas con respecto a información suministrada de forma escrita por el relleno o relatos verbales de sus trabajadores, como el área afectada y las fechas de los incendios ocurridos, información que puede variar la eficiencia de captación. Además, se puede ver que la simulación realizada en este proyecto se acerca más a la medida real que la proyectada por SCS Engineers. Por lo tanto se consideró a simulación realizada en el Numeral 3.3 de este proyecto, como referente para la elección de una alternativa de solución, sin olvidar las mediciones reales que se tienen.

¹²⁴ Definición utilizada por el modelo lanGEM.

Tabla 20. Comparación teórica experimental de la captación de biogás del 2012.

Año 2012	Flujo de biogás con 50% de metano [m ³ /h]
Simulación 1 ¹²⁵	1 300
Simulación 2 ¹²⁶	961
Medición BIONERSIS	629, 2

La Tabla 21, muestra la comparación entre las simulaciones 1 y 2. Es importante aclarar que la principal diferencia en los valores de recuperación de biogás, se debe a que fueron simuladas para diferentes años de clausura del relleno sanitario, la simulación 1 suponía el cierre en el 2006 y la simulación 2 supone el cierre para el año 2016. Es interesante observar que los valores en rojo de la tabla, son los máximos flujos de biogás que se presentan, se esperaba que el valor máximo de la simulación 2 fuera mayor, debido a que se continuaron disponiendo desechos después del 2006, pero este dio un valor más pequeño que la simulación 1. Este fenómeno se da porque las eficiencias de captación utilizadas para las simulaciones son diferentes. La simulación 1 utiliza una eficiencia mejor que la simulación 2. Se considera que la eficiencia utilizada en la simulación 2 es adecuada, ya que los datos de captación teóricos y experimentales se acercan, mientras que los valores de la simulación 1 aun decreciendo son mucho mayores que los medidos por BIONERSIS como se muestra en el Tabla 19.

¹²⁵ Se considera como Simulación 1 la realizada por SCS Engineers

¹²⁶ Se considera como Simulación 2 la realizada por los autores

Tabla 21. Comparación entre la Simulación 1 y 2.

AÑO	Simulación SCS Engineers Recuperación de biogás se [m ³ /h]	Simulación de los autores Recuperación de biogás se [m ³ /h]
2007	2 937	-
2008	2 930	-
2009	2 352	-
2010	1 908	-
2011	1565	891
2012	1 300	961
2013	1 095	1 149
2014	935	1 342
2015	811	1 782
2016	713	2 196
2017	635	2 591
2018	574	2 265
2019	525	1 988

5.5.1 Alternativas de solución a corto plazo. Estas alternativas fueron planteadas únicamente para el biogás que se produce actualmente y se producirá por los RSU que se dispongan hasta el 2016. Cada propuesta se analiza teniendo en cuenta las condiciones específicas del relleno, los datos de la simulación 2 y las mediciones realizadas en el 2012 por BIONERSIS. Al final se propone un método de evaluación para las alternativas, que permita seleccionar la opción adecuada. Se consideran cuatro opciones de solución:

1. Combustión directa
2. Uso directo
3. Generación de energía eléctrica
4. Cogeneración

Todas estas propuestas ya han sido implementadas exitosamente en rellenos sanitarios del mundo como se relató en el Capítulo 2. A continuación, se explicará

en detalle cada propuesta y se analizarán sus ventajas y desventajas, con el fin de explicar las razones por las cuales se descartan unas y se selecciona una de las alternativas analizadas.

OPCIÓN 1: COMBUSTIÓN DIRECTA¹²⁷.

Pretende retomar los esfuerzos que BIONERSIS emprendió¹²⁸, se proyecta una inversión en la compra e instalación de nuevos medidores y controladores, ya que los que dejó la empresa fueron extraviados, además se debe volver a instalar la tubería que conecta los ductos verticales de extracción de biogás, para llevarlo a una estación central donde se quema a 1500 °C, condiciones en las que la mayoría del metano se quema, brindando una mejor solución medioambiental, ya que la presencia de metano en la atmosfera es 23 veces más nociva que la del dióxido de carbono¹²⁹. Es importante saber, que actualmente la quema del biogás se hace en sitio a una temperatura de 100 °C¹³⁰, por tanto la gran mayoría del metano no se está quemando, liberándose a la atmósfera.

La combustión directa resulta medioambientalmente atractiva, pero no una opción tecnológicamente atrayente debido a que no hay aprovechamiento térmico o eléctrico del biogás. Además, su única fuente de financiamiento serían los bonos de carbono, los cuales en este momento tienen un precio bastante bajo, por lo que no significarían un ingreso potencial al relleno.

¹²⁷ RUTZ, Dominik. PRASSL, Heinz. FINSTERWALDER, Tobias. VOLK, Silke y JANSSEN, Rainer. BIOGAS HANDBOOK. University of Southern Denmark Esbjerg, 2008, p. 42.

¹²⁸ CHIO, Juan Carlos. Situación actual relleno sanitario El Carrasco. [En línea]. [Disponible en: <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/198693-planta-que-reducia-gases-en-el-carrasco-fue-apagada>][5 de marzo de 2013].

¹³⁰ Información relatada por el trabajador del relleno, Rubén Amaya.

OPCIÓN 2: USO DIRECTO¹³¹.

El biogás del relleno sanitario podría transportarse por tuberías hasta una industria o zona residencial cercana para ser utilizado en una caldera o para implementar la aplicación térmica directa en vez de la utilización de gas natural o propano.

Esta opción requiere de clientes que estén dispuestos a pagar un sobrecosto en el nuevo combustible, bajo la promesa de adquirir un gas más amigable con el medio ambiente, propuesta que no es tomada con agrado ni por los industriales ni por los residentes de zonas aledañas, pues cabe resaltar que para los industriales un sobrecosto significa disminuir sus ganancias o aumentar el precio de su producto. Este sobrecosto se debe a que para que el poder calorífico iguale al gas natural o propano, el biogás debe ser tratado para quitarle todos los componentes que lo disminuyen (Dióxido de carbono, humedad y otros) y llevarlo de un porcentaje de metano de alrededor de 50% a uno del 100%.

OPCIÓN 3: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA¹³².

La propuesta de generar energía eléctrica, supone un mayor interés, ya que el relleno sanitario podría empezar a abastecerse de electricidad e incluir a algunos usuarios cercanos. Como se explicó en el Capítulo 1, existen diversas formas de generar energía eléctrica a partir del biogás de vertedero, las aplicaciones más conocidas y utilizadas en el mundo son: motores a combustión (plantas eléctricas), turbinas a gas y microturbinas. La Tabla 22, hace una comparación de las principales características de las aplicaciones más conocidas.

¹³¹ Información expuesta en el presente libro, p. 34.

¹³² Información expuesta en el presente libro, pp. 30-33.

Tabla 22. Características de las posibles aplicaciones para el aprovechamiento del biogás en “El Carrasco”. ¹³³

Características	Motores de combustión	Turbinas a gas	Microturbinas
Capacidad mínima de generación de energía eléctrica (KW)	5	500	20
Capacidad máxima de generación de energía eléctrica (KW)	10 000	30 000	1 000
Eficiencia eléctrica	20-35%	38% (Se amplía con Cogeneración hasta un 75-85%)	30-35%
Nivel de refinamiento del biogás	Eliminación elevada de H ₂ O, CO ₂ y H ₂ .	Eliminación parcial de H ₂ O, CO ₂ y H ₂ .	Eliminación parcial de H ₂ O, CO ₂ y H ₂ .
Porcentaje de metano necesario	≥45%	≥45%	≥35%

Los motores a combustión pueden ser diésel, gasolina o gas, como se explicó en el Capítulo 1, para que funcionen con biogás se les deben hacer modificaciones dependiendo del tipo, lo que significa una disminución en su rendimiento¹³⁴.

La Tabla 3, muestra que la opción más eficiente es adecuar los motores de gas para que funcionen con biogás, ya que estos tienen un rendimiento del 30-35% trabajando con biogás, pero el principal problema de esta propuesta es que necesita que el biogás a utilizar tenga como mínimo un 45% de metano, y en el relleno sanitario “El Carrasco”, este porcentaje varía entre el 31 y el 54% según las mediciones de BIONERSIS. Esto no quiere decir que no se puedan implementar, sino que la eficiencia de las plantas disminuirá considerablemente o habrá que invertir en una estación de mejoramiento del biogás.

¹³³ RUTZ, Dominik. PRASSL, Heinz. FINSTERWALDER, Tobias. VOLK, Silke y JANSSEN, Rainer. BIOGAS HANDBOOK. University of Southern Denmark Esbjerg. 2008

¹³⁴ Información dada en el ANEXO A.

Las turbinas de gas¹³⁵, también han sido utilizadas en forma exitosa en la generación de energía eléctrica a partir de biogás. Sin embargo las turbinas de gas se adaptan mejor a los rellenos sanitarios más grandes en donde se encuentran disponibles volúmenes de biogás mayores, además esta tecnología también requiere de un porcentaje de biogás más elevado que el de “El Carrasco”.

Las microturbinas¹³⁶ son la tecnología más nueva, ya han sido implementadas exitosamente en muchos rellenos sanitarios en el mundo que tienen una recuperación de biogás baja, es actualmente una de las favoritas, debido a que presenta una de las mejores eficiencias energéticas en el mercado, ocupan poco espacio, no producen gran cantidad de ruido y pueden funcionar con un flujo de biogás y metano relativamente bajos.

Como se quiere presentar una alternativa tecnológica y ambiental, se considera que para la generación de energía en “El Carrasco”, esta es la alternativa más llamativa.

OPCIÓN 4: COGENERACIÓN, APROVECHAMIENTO TÉRMICO Y ELÉCTRICO¹³⁷.

Esta propuesta, considera el aprovechamiento térmico y eléctrico del biogás, el cual puede implementarse con turbinas de gas o microturbinas, siendo el uso de turbinas de gas el más común por sus adecuadas eficiencias térmicas y eléctricas. Para que esta propuesta sea viable, es necesario tener un proceso dentro del relleno o una empresa aledaña que necesite las veinticuatro horas del día el calor suministrado por el cogenerador.

¹³⁵ FARRET, Felix y GODOY, Simoes. . Integration of alternative sources of energy, wiley-inte. hoboken: john wiley & sons, inc, 2006, p. 211.

¹³⁶ Ibid, pp. 215-216.

¹³⁷ Información expuesta en este libro, p.34.

Como se había mencionado antes, el flujo de biogás de “El Carrasco” es bajo para la implementación de turbinas de gas, además el relleno no cuenta con un proceso en donde necesite calor o frío las veinticuatro horas del día¹³⁸, lo que hace ineficiente la implementación de la cogeneración.

Pensar en vender calor a industrias cercanas o incluso al Centro de Ferias y Convenciones de Bucaramanga (CENFER), tampoco es una idea adecuada, ya que transportar el calor largas distancias supone una pérdida y el calor ofrecido puede superar o no alcanzar la demanda. Por otro lado, al igual que los motores de combustión requieren que el porcentaje de biogás sea mayor o igual a 45%¹³⁹, lo que hace que para “El Carrasco” no sea la propuesta más eficiente y tecnológica.

Con el propósito de elegir la opción adecuada, se utiliza un método de evaluación, basado en la ponderación numérica de los factores que influyen la decisión a tomar. Para esto se escogen tres opciones de calificación: Alto, medio y bajo, asignándoles respectivamente ponderaciones de 5, 3 y 1.

Se entiende que una calificación Alta, significa un excelente cumplimiento del factor, una Media, quiere decir que el factor se cumple bien y una baja que no se cumple. Después de ponderar cada factor según el criterio de los autores, se saca el promedio de cada alternativa y se toma como opción adecuada aquella que presente el promedio más alto como se muestra en la Tabla 23.

¹³⁸ Información brindada por el Jefe de disposición final del relleno, Ingeniero Oscar Soto.

¹³⁹ RUTZ, Dominik. PRASSL, Heinz. FINSTERWALDER, Tobias. VOLK, Silke y JANSSEN, Rainer. BIOGAS HANDBOOK. University of Southern Denmark Esbjerg, 2008, p. 44.

Tabla 23. Factores de selección de tecnología para el aprovechamiento del biogás en “El Carrasco”.

ALTERNATIVAS DE USO				
FACTORES	Combustión directa	Uso directo	Generación de energía eléctrica	Cogeneración
Ambiental	Alto	Alto	Alto	Alto
Tecnológica	Medio	Medio	Alto	Alto
Recuperación económica	Bajo	Medio	Alto	Medio
Cómoda inversión inicial	Alto	Bajo	Medio	Medio
Posibles clientes	Bajo	Bajo	Alto	Medio
PROMEDIO	3	2,6	4,6	3,8

Según el criterio de evaluación utilizado, la alternativa más adecuada es la generación de energía eléctrica, ya que cumple ampliamente factores como el ambiental, al hacer una adecuada combustión del biogás; el tecnológico, al utilizar métodos de aprovechamiento y mitigación del biogás conjuntamente; el factor de recuperación económica lo cumple al tener una fuente de financiamiento por la venta de energía eléctrica; la cómoda inversión inicial se debe principalmente a la cantidad y valor de equipos necesarios; y el factor de posibles clientes lo cumple al generar energía eléctrica para autoabastecer su demanda y vender el resto de la energía al sistema de distribución.

- **Alternativa de solución para la generación de energía eléctrica en el relleno sanitario “El Carrasco”.**

Como se explicó en el desarrollo de la opción 3, para el caso específico del “El Carrasco”, la mejor opción tecnológica y ambiental es la generación de energía eléctrica con microturbinas, debido a que esta tecnología admite porcentajes de metano relativamente bajos, tiene una de las eficiencias más altas del mercado y hay diseños fabricados especiales para trabajar con biogás, entre otros.

Microturbinas de gas.

Las microturbinas de gas son una tecnología relativamente nueva, han pasado de su etapa experimental a convertirse en una alternativa factible para la generación de energía eléctrica a pequeña escala; además tienen una capacidad de generación entre 30 kW y 1 MW¹⁴⁰ y son capaces de funcionar en conexión paralelo a la red o en isla, como una fuente independiente de energía. Las microturbinas se pueden clasificar en dos¹⁴¹:

- ✓ *Ciclo simple*: Se mezcla el aire comprimido con combustible y se realiza la combustión bajo condiciones de presión constante, los gases calientes resultantes se expanden en la turbina produciendo el trabajo. Su costo es inferior y se utilizan más en cogeneración que las de ciclo regenerativo.
- ✓ *Ciclo con regeneración*: Su funcionamiento es parecido al de ciclo simple, solo que se le adiciona un intercambiador de calor, con el fin de recuperar calor de la corriente de salida de la turbina y transferirlo a la corriente de entrada del aire. El aire precalentado es después utilizado en el proceso de combustión, generando un ahorro de combustible entre el 30 y el 40%. El hecho de adicionarle un intercambiador de calor a esta tecnología, puede llegar a doblar su eficiencia eléctrica.

La utilización de microturbinas ofrece un gran número de ventajas¹⁴² en comparación con otras tecnologías de producción de energía a pequeña escala, como los motores de gas y las turbinas a gas:

- ✓ Menor número de partes móviles.
- ✓ Tamaño compacto.
- ✓ Menor peso.

¹⁴⁰ Información proporcionada por Capstone Turbine Corporation, Anexo H.

¹⁴¹ FARRET, Felix y GODOY, Simoes. Integration of alternative sources of energy, wiley-inte. hoboken: john wiley & sons, inc, 2006, pp. 216-220.

¹⁴² *Ibíd*, pp. 215-216.

- ✓ Energía térmica recuperable en una sola corriente.
 - ✓ Alta disponibilidad.
 - ✓ Menor nivel de emisiones.
 - ✓ Vida operativa más larga.
-
- **Propuesta de generación con microturbinas.**

Para escoger la referencia optima de turbina, se tuvieron en cuenta los resultados de la simulación obtenidos en el Numeral 3.3 y las mediciones realizadas por BIONERSIS. Se debe aclarar que no es necesario hacer que las microturbinas consuman todo el biogás generado, ya que esto saldría ineficiente y costoso. Esto no significa que el biogás sobrante se vaya a emitir a la atmósfera, por el contrario será quemado en una antorcha central a 1 500°C teniendo en cuenta la posible reutilización y evaluación tecnológica de la maquinaria dejada por BIONERSIS.

Además, se debe tener en cuenta que proponer una sola microturbina para que opere, es una solución ineficiente, ya que el flujo de biogás va disminuyendo con el tiempo, por ejemplo, en el caso específico de “El Carrasco”, la simulación muestra que siete años después de clausurado el relleno, el flujo de biogás se habrá reducido a la mitad. Por tanto se propone dividir la capacidad de producción de energía eléctrica total en dos microturbinas.

Hay múltiples referencias de microturbinas, pero una de las más reconocidas en el mundo es Capstone Turbine Corporation¹⁴³, empresa estadounidense que ha trabajado en el desarrollo de microturbinas desde el año 1988, y además tiene una amplia experiencia en la implementación de esta tecnología en rellenos sanitarios, tanto así, que ha desarrollado seis referencias de microturbinas que trabajan especialmente con biogás de vertedero, con potencias eléctricas que van desde

¹⁴³ Empresa estadounidense. Página Web: <http://www.capstoneturbine.com/>

los 30 kW hasta los 1 MW. La Tabla 24 muestra las referencias de las turbinas Capstone para vertederos, su potencia nominal y consumo de biogás.

Tabla 24. Referencias de microturbinas para vertedero Capstone

REFERENCIA CAPSTONE	POTENCIA NOMINAL [kW]	FLUJO DE BIOGAS [mmBTU/h]	EFICIENCIA %
CR30	30	0,433	26
CR65	65	0,842	29
CR200	200	2,28	33
CR600	600	6,84	33
CR800	800	9,12	33
CR1000	1 000	11,4	33

Fuente: Adaptado de catálogos CAPSTONE, ANEXO H.

Para el caso en específico de “El Carrasco”, se evaluaron diferentes alternativas que contemplaban la implementación de dos microturbinas de igual o diferentes referencias, se analizaron especialmente características como la cantidad de biogás utilizado, el tiempo de utilización de cada turbina y la potencia instalada. Los diferentes resultados se pueden observar en el Anexo I, donde se muestra que una de las mejores opciones es la implementación de dos microturbinas Capstone CR800, debido a que el tiempo de utilización de las microturbinas es de 6 y 11 años, tiempo cercano a la vida útil ofrecida por Capstone y además cumplen los límites de recuperación de biogás simulados y medidos. La instalación de estas dos microturbinas, supondría una capacidad neta instalada de 1 MW. La Tabla 25 muestra las principales referencias de esta microturbina.

Tabla 25. Datos característicos de la Microturbina Capstone CR800.

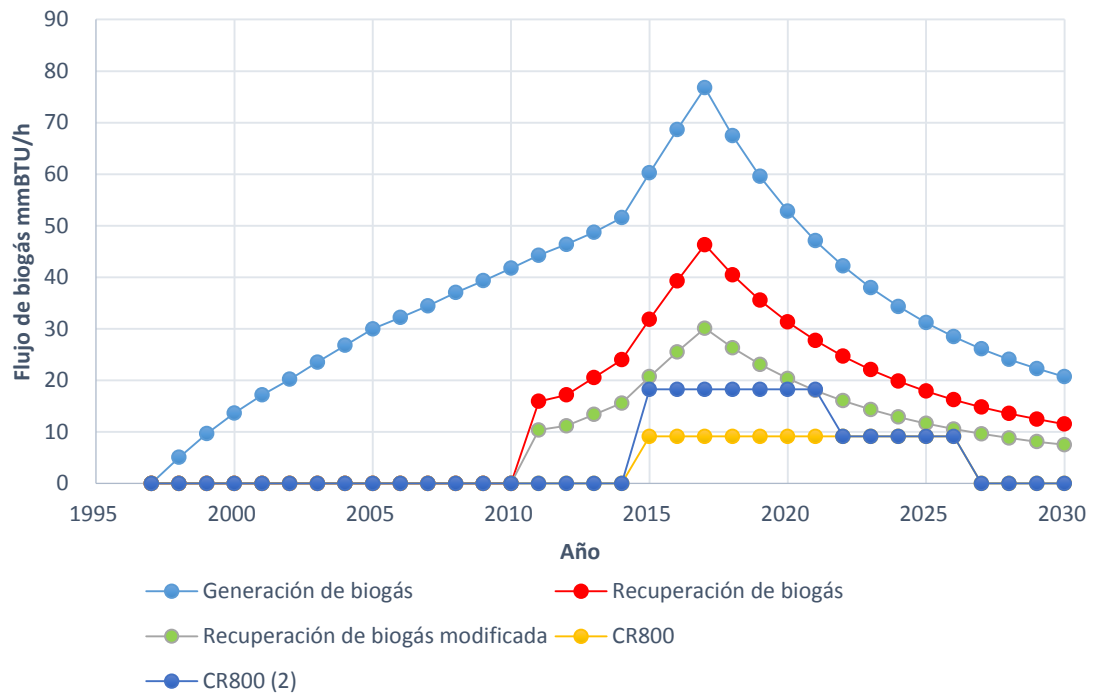
RENDIMIENTO ELÉCTRICO	
Potencia eléctrica	800 KW
Tensión	400 – 480 VAC
Servicio eléctrico	Tres fases, cuatro cables
Frecuencia	50/60 Hz, conectado a la red
Máxima corriente de salida	Conectado a la red: 1 160 A RMS a 400 V 960 A RMS a 480 V
Eficiencia eléctrica	33%
CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS	
Capacidad calorífica	13 – 22,3 MJ/m ³
Presión de entrada	517 – 552 KPa
Contenido de Ácido Sulfhídrico	< 5 000 ppm
Flujo de biogás	9 120 000 BTU/h
CARACTERÍSTICAS DE LOS GASES DE ESCAPE	
Flujo de gas de escape	5.3 Kg/s
Temperatura gases de escape	280 °C
Energía de escape	5 680 MJ/h
NIVEL DE SONIDO	65 dB
DIMENSIONES	2,4 x 9,1 x 2,9 m
PESO (MODELO DE CONEXION A LA RED)	14 651 Kg

Fuente: Catálogo CR600 Capstone Turbine Corporation, ANEXO H.

La Figura 26, muestra cinco curvas interesantes: Generación de biogás, recuperación de biogás, recuperación de biogás modificado, CR800 y CR800(2). Las dos primeras curvas son el resultado de la simulación realizada en el Numeral 3.3.; la curva de recuperación de biogás modificada, es el 80% de los valores de la curva recuperación de biogás, esto se hizo para tener en cuenta la diferencia obtenida en el año 2012 entre la simulación y las mediciones; la curva CR800, muestra la cantidad de biogás que consumiría una microturbina Capstone CR800;

la curva CR800(2), correspondiente a la cantidad de biogás que consumirían funcionando las dos microturbinas Capstone CR800.

Figura 26. Consumo de biogás de las microturbinas, y tiempo de operación.



En la Tabla 26, se muestra la inversión en general que se tendría que hacer para la compra, instalación y mantenimiento de las dos microturbinas Capstone CR800.

Tabla 26. Costos generales de la implementación de las microturbinas.

CONCEPTO	CANTIDAD	COSTO INDIVIDUAL (\$)	COSTO TOTAL (\$)
Microturbina CR800	2	1 579 612 800	3 159 225 600
Planta de compresión y tratamiento	1	320 792 040	320 792 040
Instalación eléctrica	1	97 273 000	97 273 000
Instalación mecánica	1	146 880 000	
AIU (15%)	-	36 622 950	
INVERSIÓN INICIAL			3 760 793 590
Mantenimiento anual	-	286 603 680	

Fuente: Cotización realizada por Carlos Villalobos¹⁴⁴ de Capstone Turbine Corporation.

5.5.2 Alternativas de solución a largo plazo. A continuación se plantean diferentes alternativas futuras para el aprovechamiento energético de “El Carrasco”, como primera opción, se propone la implementación de una planta incineradora o de pirolisis que pueda producir energía eléctrica, como segunda opción se plantea la adaptación del sistema de energía eléctrica proveniente de combustibles renovables de “El Carrasco” en microredes y como última alternativa se proyecta el aumento de la producción de biogás por medio de la aplicación de BiogasPlus para su futura implementación en las diferentes aplicaciones ya mencionadas. No se escoge uno en específico, debido a que las alternativas se pueden utilizar en conjunto.

- **Planta incineradora.**

Una de las alternativas futuras más atractivas para “El Carrasco” es la implementación de una planta incineradora, ya que evitaría por un largo tiempo buscar un nuevo espacio apto para disponer residuos sólidos. Como se explica más detalladamente en los capítulos 1 y 2, una planta incineradora aprovecharía

¹⁴⁴ Contacto Capstone Colombia, correo electrónico: carlos.villalobos@supernova-es.com

los RSU desde el reciclaje hasta la generación de energía eléctrica. Además representa una ventaja frente a la extracción de biogás de vertedero, ya que la capacidad instalada no depende del tiempo sino de la cantidad de basura que les llegue por día.

- **Generación de energía eléctrica en “El Carrasco” y futura adaptación a un entorno de microredes eléctricas.**

Según Andrea Ruótulo¹⁴⁵, las microredes inteligentes (“microgrids”) son un elemento clave en la modernización de la red eléctrica hacia la denominada red inteligente (“smart grid”). Alrededor del mundo distintos modelos de negocios se están desarrollando para su implementación, ya que promete grandes beneficios como la descentralización del suministro, mejor adecuación de la oferta y demanda, ahorro en los costos, reducción en la congestión de alimentadores de transmisión y distribución, entre otros.

La generación de energía eléctrica proveniente de combustibles renovables del relleno sanitario “El Carrasco”, podría adaptarse a una microred con cargas residenciales, comerciales e industriales, ya que está ubicado en un lugar donde estas cargas se encuentran cercanas. Los principales retos para el desarrollo de estos proyectos son: Técnicos, económicos, regulatorios e institucionales. En cuanto a regulación, Colombia ha tratado avanzar a través de instrumentos como la Ley 1715 de 2014, donde promueve el desarrollo y la utilización de energías renovables no convencionales tanto en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) como en las Zonas No Interconectadas (ZNI), buscando la eficiencia energética y la reducción de gases de efectos invernaderos; pero hay temas no están aún reglamentados como los incentivos, subsidios y ayudas que se brindarán. La puesta en marcha de estos incentivos económicos y de beneficios administrativos,

¹⁴⁵ RUÓTULO, Andrea. Costos y beneficios de las microredes inteligentes. 2014. [En línea]. [Disponible en: <http://expertosenred.olade.org/energiayacceso/costos-y-beneficios-de-las-microredes-inteligentes/>][6 de noviembre de 2014].

ayudaría a que proyectos de generación como el de “El Carrasco”, fueran más rentables y por tanto más interesantes para inversionistas públicos y privados.

La futura integración de la generación eléctrica del relleno a una microred podría convertirse en un laboratorio de pruebas, donde se analicen los comportamientos de la demanda y de la generación, convirtiéndose en un ejemplo de investigación que ayude a tener una conceptualización más sólida que permita establecer futuras regulaciones y además convertirse en referente para zonas donde es difícil tener una conexión continua a una red eléctrica.

- **BiogasPlus146 en el relleno sanitario para el aumento de generación de biogás**

Recientemente investigadores del Institut Català de Nanociència y Nanotecnologia y de la Universitat Autònoma de Barcelona, desarrollaron una aplicación nanotecnológica para optimizar la producción de biogás que llamaron BiogasPlus. Ellos encontraron que la introducción controlada de nano partículas de óxido de hierro en los procesos de tratamientos de residuos orgánicos permitía triplicar la producción de biogás debido a que el óxido de hierro mejora considerablemente la eficacia biológica. Este producto ya ha sido probado exitosamente en rellenos sanitarios y biodigestores, comprobando su efectividad.

Si se llegara a utilizar en el relleno sanitario “El Carrasco” y se tuvieran microturbinas en el, se podría aumentar la capacidad eléctrica instalada, ya que una gran ventaja de esta tecnología es su diseño modular, por lo que se puede aumentar o disminuir la capacidad eléctrica dependiendo de las necesidades especiales del relleno.

¹⁴⁶ Rtve.es. Consiguen triplicar la producción de biogás con una tecnología de nano partículas. [En línea]. [Disponible en: <http://www.rtve.es/noticias/20141021/consiguen-triplicar-produccion-biogas-tecnologia-nanoparticulas/1033545.shtml>][6 de noviembre de 2014].

6. FUTUROS DESARROLLOS

Este proyecto muestra los beneficios de la utilización del biogás como fuente energética y pretende incentivar al público en general para que aprovechen el potencial energético específicamente del gas proveniente de desechos líquidos y sólidos, ya que este es un recurso que se puede encontrar en abundancia en todas las sociedades. Se plantearon proyectos, de cara al reto tecnológico que la academia afronta actualmente:

1. Implementación de un incinerador de basura en el relleno sanitario El Carrasco:

La propuesta podría brindar una solución al problema de capacidad de recepción de basuras que actualmente presenta el relleno, debido a que plantea dos panoramas muy favorables, el primero la necesidad de empezar a responsabilizarse, reciclar y reutilizar los desechos que se producen día a día y el segundo, generar energía eléctrica a partir de la incineración de los materiales que no se reciclaron. Lo que daría como resultado la disposición en el relleno de solo el uno por ciento de los RSU. Esta solución, evitaría tener que buscar un nuevo lugar para disponer los desechos y además brindaría una solución tecnológica, ambiental y energética.

2. Aprovechamiento local del biogás:

En Bucaramanga existen entidades que producen grandes cantidades de basura, por ejemplo: Las universidades, las grandes empresas, los colegios, los hoteles, los centros comerciales, entre otros. Estas entidades pagan un precio elevado a la EMAB para que se encargue del manejo de sus basuras, de este precio más de la mitad se va en el transporte de los desechos desde el lugar de origen hasta el relleno sanitario. En este orden de ideas, sería bueno que estas entidades se encargaran de la adecuada gestión de sus residuos, es decir, que opten por buscar tecnologías de cero basura (procesos de pirolisis y gasificación), para

producir energía eléctrica y/o calor, que ayuden a aliviar sus costos de energía y tratamiento de desechos. Esta propuesta se podría desarrollar por ejemplo en la Universidad Industrial de Santander y servir como un referente a los demás edificios de la ciudad.

3. Aprovechamiento del biogás proveniente de las aguas negras:

Las aguas negras de Bucaramanga y su área metropolitana, finalmente van a dar a la planta de tratamiento de aguas negras, que se encuentra ubicada en Girón. Esta planta ha venido generando olores muy fuertes que han afectado a la comunidad a su alrededor en un radio bastante extenso, llegando incluso a afectar a la comunidad del barrio Cañaveral, donde habitan gran cantidad de personas. Una posible solución a este problema, sería implementar un sistema de captación del biogás proveniente de las piscinas, el cual evite que los olores salgan a la atmosfera. Esta propuesta también incluiría el aprovechamiento del mismo en la generación de energía eléctrica para las instalaciones de la empresa y zonas aledañas o la generación de calor/frío para empresas cercanas a la planta.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo de grado se planteó como objetivo general estudiar la viabilidad de aprovechar el biogás que produce el relleno sanitario “El Carrasco” y su adaptabilidad en un entorno de microredes eléctricas, esto se da por medio del cumplimiento de tres objetivos específicos: el primero, identifica los escenarios existentes en el mundo para que sirvan como referentes al proyecto, para esto se recopiló literatura internacional sobre el estado actual y antecedentes de la extracción, producción y aprovechamiento del biogás proveniente de rellenos sanitarios; el segundo, evalúa las condiciones actuales y antecedentes del relleno sanitario “El Carrasco” necesarias para determinar su potencial energético, por medio de recopilación de información oficial, encuestas y múltiples visitas técnicas realizadas que sirvieron para simular el potencial de generación y recuperación de biogás; el último objetivo plantea la realización de una propuesta ambiental y tecnológica que permita el aprovechamiento del biogás proveniente de “El Carrasco”, esta propuesta se muestra en detalle en el Numeral 3.5, donde propone la implementación de dos microturbinas Capstone CR800 con una capacidad instalada inicial de 1,6 MW.

Una vez realizado el trabajo de grado, a continuación se muestran las conclusiones más relevantes del proyecto:

- ✓ El estudio detallado de la viabilidad de utilizar como fuente de energía alternativa el biogás, determinó que el relleno sanitario “El Carrasco” tiene un flujo de biogás y un porcentaje de metano contenido en él, apto para ser utilizado como fuente de generación de energía eléctrica.
- ✓ La implementación de proyectos que obtienen beneficios de los residuos sólidos urbanos, son una realidad en el mundo; se conocen más de mil proyectos que actualmente están funcionando de forma exitosa, ya que basan

el aprovechamiento del biogás de vertedero especialmente en la generación de electricidad y/o calor. Las tecnologías de aplicación más populares en el mundo son: los motores de combustión, la combustión directa, las microturbinas de gas, la cogeneración y las turbinas de gas. Las microturbinas de gas son la tecnología de última generación para el aprovechamiento del biogás de vertedero y ha resultado ser una de las más longevas, resistentes y eficientes.

- ✓ El relleno sanitario “El Carrasco” presentó un potencial energético que se considera bajo, respecto a otros proyectos que se han implementado mundialmente. Sin embargo, se considera posible aprovechar este potencial energético en la generación de energía eléctrica, contribuyendo así, en la disminución de la contaminación y las emisiones de gases de efecto invernadero de la ciudad.
- ✓ La implementación de microturbinas a gas para la generación de energía eléctrica, es una opción adecuada para el aprovechamiento energético del biogás producido por el relleno sanitario “El Carrasco”. El flujo de biogás y el porcentaje de metano que presenta el relleno, permite proponer la implementación de dos microturbinas con una capacidad de 800 kW cada una, proyectando desde el año 2015 una capacidad instalada de 1,6 MW durante los primeros seis años y de 800 kW por 5 años más. De esta manera se propone una alternativa de solución tecnológica y ambiental, que ayudaría a que alrededor de 89 012 toneladas de CO₂ no se emitan a la atmósfera por año.
- ✓ Se estimó que la generación máxima de biogás proveniente del relleno sanitario “El Carrasco” es en total 1 221 mmBtu/h entre los años 1997 y 2030, con una recuperación de biogás de 40% según la simulación realizada en este proyecto, sin embargo esta cantidad se disminuyó en un 65%, ya que se

tuvieron en cuenta los datos y mediciones dejados por la empresa BIONERSIS. Con la implementación de las dos microturbinas seleccionadas se consumiría el 90,05% del biogás recuperado en el relleno sanitario, debido a esto existe un porcentaje de biogás sobrante que se debe quemar en una antorcha central para evitar su emisión a la atmosfera, por tal motivo se propone el estudio y futura reapertura de las instalaciones y maquinaria dejada por BIONERSIS para la quema de este gas en condiciones ideales.

- ✓ La capacidad de operación por medio de microredes eléctricas es una alternativa que permite aumentar la eficiencia, seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico de potencia. Sin embargo, se observa que en Colombia no se cuenta con una política energética clara destinada al desarrollo de las microredes con tecnología de energía renovable, lo que ocasiona que se estén subutilizando algunos beneficios energéticos así como el desperdicio de recursos propios del país.
- ✓ El relleno sanitario “El Carrasco” actualmente opera bajo criterios y condiciones de ingeniería que lo hace apto para depositar los residuos sólidos urbanos, sin embargo uno de los principales problemas que presenta es la falta de espacio para la disposición de los residuos futuros, debido a esto el relleno sanitario está en continua emergencia sanitaria. Por tal motivo este proyecto propone la implementación de una planta que incinere los residuos para que el vapor obtenido se use para generar energía eléctrica trayendo consigo consecuencias beneficiosas para la ciudad como el reciclaje, reutilización y revalorización de los desechos, por tanto no existiría una preocupación por su disposición futura, eliminado la contaminación y problemas sociales que presenta actualmente, tal como lo hace la planta de basura cero en Malmo, Suecia.

- ✓ El proyecto permitió generar soluciones innovadoras y pertinentes relacionadas con la generación de energía eléctrica, a través del desarrollo de procesos de investigación que mejoraron la capacidad de planear, organizar, diseñar, gestionar y controlar propuestas que contribuyen en nuestra formación profesional.

BIBLIOGRAFIA

ALBATECNOLOGIA. Máquina de vapor y para volar. [En línea]. [Disponible en: <http://albaatecnologia.blogspot.com/>] [15 de julio de 2011].

ARIAS, Arturo. Gestión integral de residuos, el nuevo enfoque. 2012.

BOULET Emmanuel, BRACKMANN Stefanie, BREISINGER Milena, TERRAZA Horacio y WILLUMSEN Hans. Directrices sobre vertederos. 2010.

CHIO, Juan Carlos. Situación actual relleno sanitario El Carrasco. [En línea]. [Disponible en: <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/198693-planta-que-reducia-gases-en-el-carrasco-fue-apagada>][5 de marzo de 2013].

COLECTIVO BOGOTÁ BASURA CERO. [En línea]. [Disponible en: www.bogotabasuracero.com/][5 de noviembre de 2014].

COOPERACIÓN TRANSFRONTERIZA ESPAÑA-PORTUGAL. Informe sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura, España. 2010.

COLOMBIA. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). Censo general 2005. Colombia. 2010.

EMPRESA DE ASEO DE BUCARAMANGA EMAB S.A. ESP. Acta de terminación y liquidación unilateral del contrato de cesión de derechos de explotación del biogás generado en el relleno sanitario El Carrasco. 2013.

----- . Situación actual relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga, Colombia. 2012.

ENVIROMENTAL PROTECCION AGENCY. Número de plantas en Estados Unidos. [En línea]. [Disponible en: www.epa.gov/lmop/projects-candidates/index.html#map-area][10 de Junio de 2014].

EPPICH, John y HILLIPS Michael. Puente Hills Energy Recovery from Gas (PERG) Facility. Estados Unidos. 1998.

ESPINACE, Raúl y PALMA, John. Asentamiento en un vertedero controlado a escala con recirculación de líquidos lixiviados. Chile. 1997.

FARRET, Felix y GODOY, Simoes. Integration of alternative sources of energy. Wiley-inte. Hoboken: john wiley & sons, inc. 2006.

GARCÍA, Francisco. Aprovechamiento del biogás en vertederos controlados. 2010.

GREENPEACE. Las tres R: reduce-reusa-recicla. [En línea]. [Disponible en: <http://www.greenpeace.org/mexico/es/Actua/Ecotips/Las-tres-r/>][5 de noviembre de 2014].

LACOBONI, Mario, CHOW, Josephine, y WHELESS, Ed. Calabasas landfill microturbine power generation project Lessons Learned after One Year of Operation. 1988.

MASENERGY. CocaCola cogen plant. [En línea]. [Disponible en: <http://mas-energy.com/projects/coca-cola-cogen-plant.aspx>]. [5 de noviembre de 2014].

MEJÍA BARRERA, Carlos Salvador, MEJIA TEREZON, Cecilia y RAMIREZ BERMUDEZ, Delia. Tesis: Estudio de factibilidad técnico económico para la

implantación de una planta productora de biogás, a partir de desechos orgánicos. Salvador. 2005.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO Y DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Colombia. 2000.

MODELO LIBRE LanGEM. [En línea]. [Disponible en: <http://www.epa.gov/lmop/international/colombia.html>][5 de noviembre de 2014].

PROACTIVA CHICAMOCHA SA ESP. Ampliación disposición en El Carrasco, Resolución 0190 de 2013.

RAMÍREZ FERRERO, Mario. Hacia una revolución de las redes eléctricas. 2012. Revista ambientum. Edición febrero de 2003. [En línea]. [Disponible en: www.ambientum.com/revista/2003_01/BIOGAS.htm][5 de noviembre de 2014].

RTVE.ES. Consiguen triplicar la producción de biogás con una tecnología de nano partículas. [En línea]. [Disponible en: <http://www.rtve.es/noticias/20141021/consiguen-triplicar-produccion-biogas-tecnologia-nanoparticulas/10>][6 de noviembre de 2014].

RUBIO MAYA, Carlos y UCHE MARCUELLO, Javier. Tecnologías motriz primario para poligeneración. 2008.

RUÓTULO, Andrea. Costos y beneficios de las microredes inteligentes. 2014. [En línea]. [Disponible en: <http://expertosenred.olade.org/energiayacceso/costos-y-beneficios-de-las-microredes-inteligentes/>][6 de noviembre de 2014].

RUTZ, Dominik. PRASSL, Heinz. FINSTERWALDER, Tobias. VOLK, Silke y JANSSEN, Rainer. BIOGAS HANDBOOK. University of Southern Denmark Esbjerg. 2008.

RWL WATER. Hambrienta de basura Suecia pide a Noruega por residuos. [En línea]. [Disponible en: <http://www.rwlwater.com/hambrienta-de-basura-suecia-pide-a-noruega-por-residuos/?lang=es>][5 de noviembre].

S&C ELECTRIC COMPANY. Micro-Redes: Una idea vieja con potencia. 2013.

SANCHEZ, Francisco. FERNÁNDEZ, Susana. CRESPO, Gemma y CUESTA, María José. Informe de Vigilancia Tecnológica de Madrid: “Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento”. 2012.

SCS ENGINEERS. Manual de usuario del Modelo colombiano de biogás. V1. 2009.

----- . Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en el relleno sanitario El Carrasco. 2005.

STEVE, Gabrielle. Lycoming County LFGTE. 2013.

SUÁREZ, Claudia. Problemática y gestión de los residuos sólidos en Colombia. 1998.

SYSAV. Heat and electricity from waste, case Malmö. Vol I. 2012.

TERRAZA, Horacio y WILLUMSEN, Hans. Guidance note on landfill gas capture and utilization. 2009.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. An overview of landfill gas energy in the United States. July. 2013.

URIBE, José Darío, y BUSTAMANTE, Jorge Raúl. Informe de coyuntura económica regional del Departamento de Santander. 2012.

VELÁZQUEZ, Ana. Tesis: Gestión ambiental y tratamiento de los residuos urbanos. Madrid. 2006.

WIKIPEDIA. Depósito controlado. [En línea]. [Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Dep%C3%B3sito_controlado][5 de noviembre].

WILLUMSEN, Hans. Energy recovery from landfill gas in denmark and worldwide. 2008.

WISEMAN, John. Puente Hills Landfill. [En línea]. [Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/wallofhair/2726048885/>][5 de noviembre de 2014].

ZEGARRA, Jorge. De la Basura a la Electricidad: La primera experiencia peruana. 2012.

ANEXO A. TIPOS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN PARA BIOGÁS

Motores de ciclo Otto

La compresión se realiza sobre la mezcla aire-combustible y el encendido se provoca con una chispa eléctrica producida en la bujía. Cuando se utiliza biogás, el rendimiento es muy adecuado ya que su potencia máxima solo disminuye entre un 20% y un 30%. Estos motores requieren ser encendidos con nafta o gasolina, para después ser reemplazados hasta un 100% por biogás, además se deben adecuar reemplazando el carburador convencional por un mezclador de gases a alta presión [12].

Motores de ciclo Diésel

El aire es comprimido a presión y temperaturas altas haciendo que la combustión ocurra espontáneamente cuando se inyecta el combustible. Estos motores no permiten el cambio total a biogás, debido a que la mezcla biogás-aire comprimida no detona y necesita de la inyección de otro combustible. Además de ser los más utilizados para generar electricidad, también pueden ser utilizados en otras aplicaciones como el bombeo de agua, entre otros.

Motores de gas

Estos motores han sido desarrollados para funcionar de acuerdo al principio de Otto. Estos motores no necesitan de grandes cambios para su operación con biogás y además el gas natural puede ser 100% sustituido.

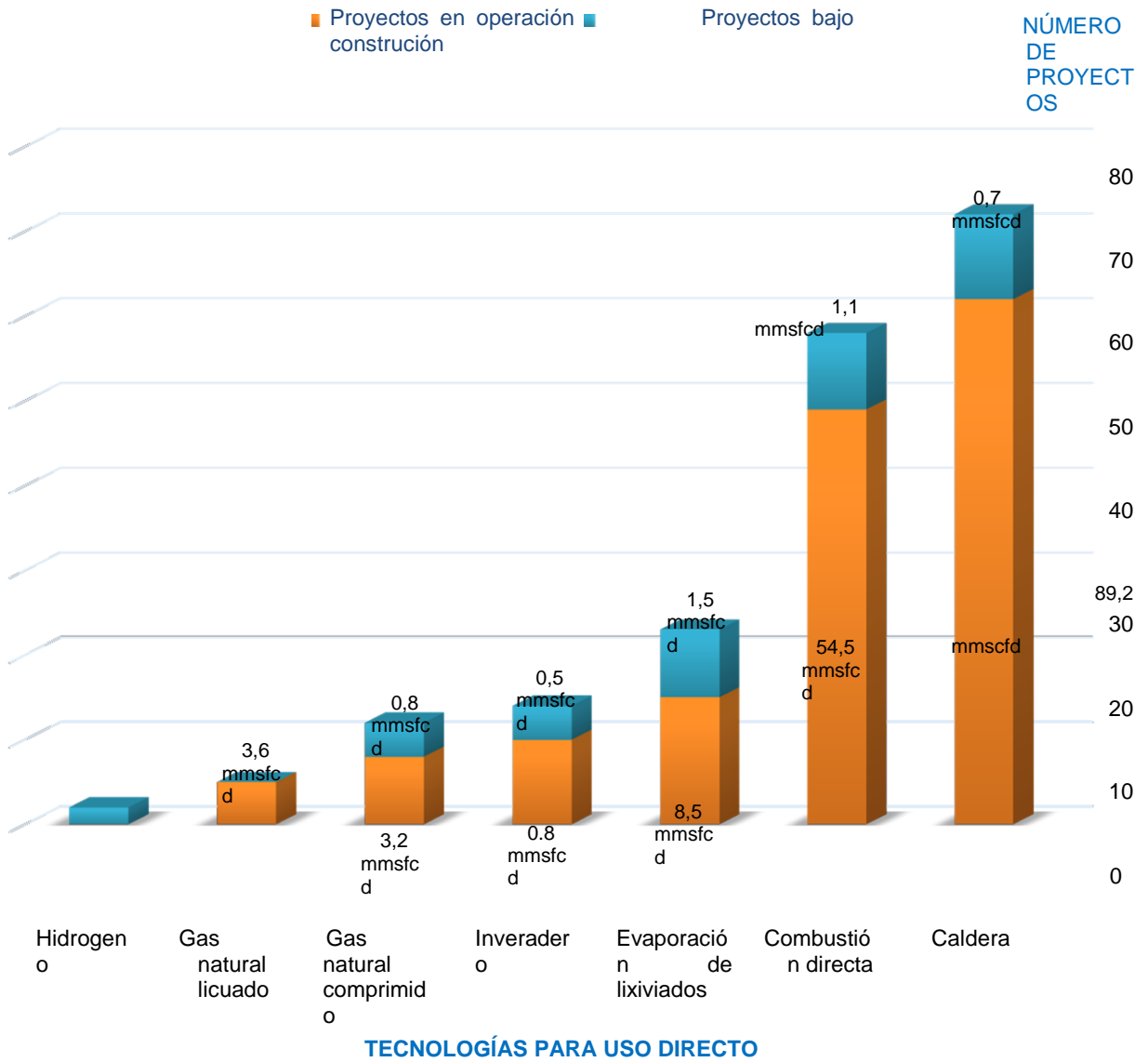
ANEXO B. APLICACIONES DE BIOGÁS DE VERTEDERO EN ESTADOS UNIDOS

UNIDOS

Figura 1. Capacidad de generación de energía eléctrica y número de plantas en Estados Unidos.



Figura 2. Capacidad para uso directo y número de plantas en Estados Unidos.



ANEXO C. PLANTAS DE TRATAMIENTO DEL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”

El proceso de producción de abono orgánico a partir de residuos sólidos en “El Carrasco”, puede describirse en cinco etapas:

- ✓ Recepción.
- ✓ Adecuación.
- ✓ Compostaje.
- ✓ Acondicionamiento.
- ✓ Almacenamiento.

El proceso inicia con la recepción de los materiales a compostar, provenientes de sectores residenciales y las plazas de mercado, tales como vegetales, y material verde (ramas, troncos, corte de césped, entre otros), los cuales, serán seleccionados en el origen del residuo, y transportados hasta la planta de compostaje (área dispuesta para el proceso de maduración, fermentación y eliminación del exceso de humedad) en el cual, se reduce la presencia de patógenos durante 30 días y se obtiene un material estable y orgánico para ser triturados hasta alcanzar un tamaño adecuado y óptimo de compost. Las operaciones de compostaje no presentan grandes problemas en cuanto a producción de lixiviados.

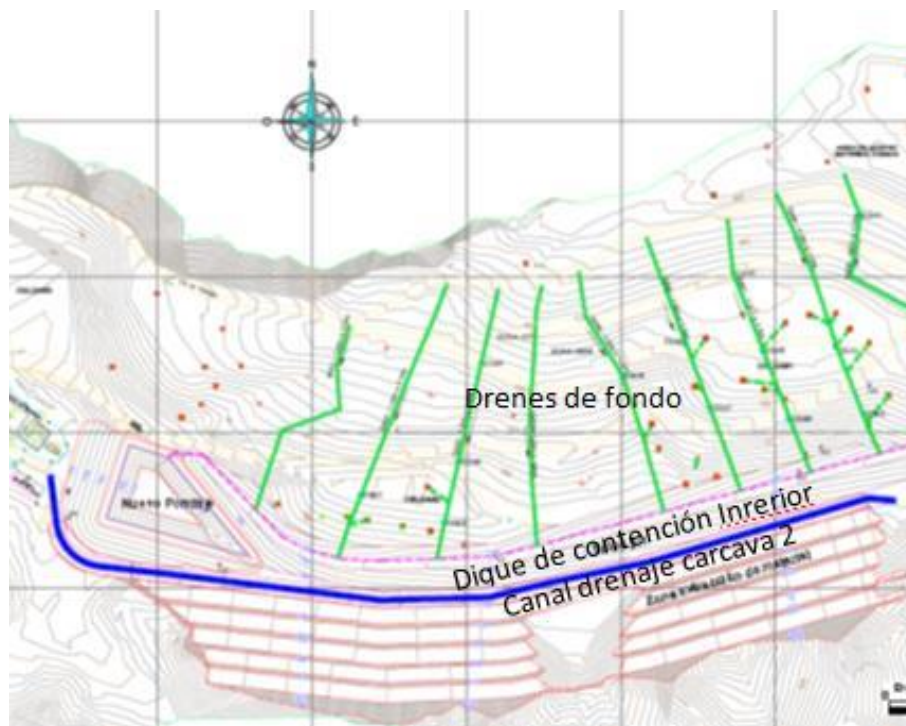
Planta de lixiviados.

La planta de lixiviados del relleno sanitario “El Carrasco”, actualmente está en total funcionamiento ya que la EMAB consideró que debe realizarse un tratamiento especial a los líquidos vertidos por la compactación de los residuos en la cárcava debido a dos características principales que presentan: calidad del lixiviado (alto contenido de sales disueltas, metales pesados, fósforo y amoníaco) y cantidad o caudal de líquido generado (2.6 litros por segundo para la Cárcava I para los días

más lluviosos del año) debido a su nivel tóxico y su alto impacto ambiental [32].

El lixiviado se recoge mediante un dren longitudinal con drenes transversales como se observa en la Figura 25; después de ser recogido se deberá llevar a una piscina o tanque de almacenamiento con un tiempo de retención de 48 horas, al cabo de las cuales se retira el líquido para darle un tratamiento adecuado.

Figura 1. Red de drenajes de fondo para la extracción del lixiviado



Chimeneas de gas.

El control y desgasificación en el relleno sanitario “El Carrasco” se hace por medio de una chimenea de antorcha. Se hace la perforación de las cárcavas clausuradas por medio de taladros helicoidales de 10 metros, posteriormente se introducen tubos de extracción de biogás de aproximadamente 160 mm de diámetro con el objetivo de extraer y quemar en forma local el biogás producido por el relleno y evitar la contaminación del medio ambiente.

Idealmente el biogás producido debe tener una inspección y control constante;

debe ser transportado, monitoreado, descontaminado, regulado y utilizado según sea su composición energética, de esta manera se logra controlar las emisiones de gases de efecto invernadero y se le da un uso adecuado a este recurso renovable. Actualmente el relleno sanitario “El Carrasco” no cuenta con infraestructura adecuada para una desgasificación controlada y las chimeneas que actualmente están en funcionamiento no son suficientes ni adecuadas para evitar la contaminación que se está generando en la ciudad.

ANEXO D. CUESTIONARIO PRESENTADO A TRABAJADORES DEL RELLENO
SANITARIO “EL CARRASCO”

Cuestionario para estudio de biogás del relleno sanitario “El Carrasco”

Datos generales del relleno

1. Dirección y ubicación.
2. Empresa explotadora del relleno.
3. Empresa propietaria del relleno.
4. Persona y forma de contacto con el relleno.
5. Fecha de apertura del depósito controlado.
6. Superficie total del depósito controlado (Ha).
7. Superficie total de disposición de residuos (Ha).
8. Volumen de la zona de disposición total (m³).
9. Capacidad total del vertido (Diseño) (Tn).
10. Estado actual del depósito controlado.
 - Si está abierto. ¿Cuántos años se estiman aun de explotación?
 - Si está cerrado. ¿Cuántos años hace que se cerró? ¿Cuál es el cubrimiento de sellado del vertedero?
11. Forma de disponer los desechos: Sin cubrimiento, con cubrimiento regular, en
pacas, residuo directo, residuo triturado,
etc.
12. ¿Ha habido incendios en el vertedero?
13. ¿Existen celdas de disposición separadas?

Si: ¿Cuántas celdas
 existen?

 ¿Cuáles son sus
 dimensiones?

 ¿Cuál es su configuración?

No: ¿Cuál es su dimensión y configuración?

14. ¿Cuál es la pluviosidad anual neta de la zona (L/m²)?
15. ¿Cuál es la temperatura mínima, máxima y media de la zona?
16. ¿Existen pozos de biogas, líneas de conducción del biogás, antorcha o ERM?
17. ¿Cuentan con planos de situación, emplazamiento y topográfico en formato Autocad o similar?
18. ¿Cuál es la altura del sitio sobre el nivel del mar.

Datos generales del residuo

19. ¿Qué cantidad de residuos hay dispuestos actualmente? (Tn hasta el año 2013)
20. ¿Cuántos más se prevee disponer en el futuro?
21. Incluir, si es posible el listado de relacion entre el año y las toneladas de residuos dispuestos.
22. ¿Cuál es la humedad media de los residuos dispuestos?
23. Tipos de residuos dispuesto en porcentaje: Municipal, Industrial, Construcción y Otros.
24. Porcentaje de composición de los residuos dispuestos: % materia orgánica, % papel, %vidrio, etc
25. Profundidad actual de los residuos (m).
26. Profundidad prevista final.
27. Densidad estimada de la zona de disposición (Tn/m³).
28. Cantidad de residuos aceptada anualmente (Tn).
29. Cantidad estimada de residuos que se dispondran hasta la clausura (Tn).
30. Area total de disposición rellena con residuos (m²).
31. ¿El residuo de tierras y escombros está mezclado con RSU?
32. ¿Qué porcentaje representa, respecto al total de residuos depositados, el residuo de tierra y escombros?
33. ¿Cómo se hace el cubriemiento de residuos?
34. ¿Cuál es la profundidad media entre capaz del cubrimiento? (m)

Datos generales sobre el biogas producido

35. ¿Existen pozos de captación y evacuación del biogás?

Si: Describa los pozos y la cantidad que hay.

¿Ocupan toda el area de disposición de los residuos?

¿Cuál es la profundidad del pozo de captación?

¿Cuál es la distancia media entre pozos?

¿Existe tratamiento del biogás al ser captado? ¿Cuál?

No: ¿Se prevee algún sistema de captación?

36. ¿Disponen de un sistema de medida del caudal de gas captado?

37. ¿Cuál es el caudal de biogás captado previsto o real? (m³/hora)

38. ¿Cuál es el porcentaje de metano, oxígeno, carbono, etc. Presentes en el biogás?

Datos generales de energía

39. Nombre la compañía eléctrica de la zona.

40. Potencia instalada en el relleno.

41. Potencia media consumida en el relleno.

42. ¿Requieren calor en el vertedero?

43. ¿A qué distancia del relleno está ubicado el punto de interconexión con la red?

44. ¿Cuál es el voltaje de este punto de conexión?

Agradecemos el completo diligenciamiento de este formato, el cual nos ayudará a simular el potencial de generación y captación de biogás con el que cuenta el relleno sanitario. Esta información se utilizará en el desarrollo del proyecto de grado denominado “Estudio de viabilidad para el aprovechamiento del biogás que se produce en el relleno sanitario “El Carrasco” y su adaptabilidad en un entorno de una microred eléctrica”, el cual es realizado por los estudiantes de ingeniería eléctrica, Yohana Carolina Galvis Silva y Leonardo Gómez Ariza, dirigido por el ingeniero Gabriel Ordoñez Plata y Co-dirigido por el ingeniero Alvaro Alyamani Triana.

ANEXO E. GLOSARIO DEL MODELO DE BIOGÁS COLOMBIANO

- ✓ *Año de Clausura*: El año en el cual el relleno sanitario dejó o proyecta dejar de recibir residuos.
- ✓ *Capacidad de Diseño del Relleno Sanitario*: La cantidad total de residuos que pueden depositarse en el relleno sanitario, calculada en términos de volumen (m³) o masa (Toneladas o Mega-gramos Mg).
- ✓ *Cobertura del Sistema de Captura*: El porcentaje estimado de la masa de residuos que está potencialmente bajo la influencia de los pozos de extracción del sistema de captura.
- ✓ *Eficiencia de Recuperación del Sistema*: El porcentaje de la generación de biogás que se estima puede ser recuperado por el sistema de recolección. La eficiencia de recuperación está en función de la cobertura del sistema y la eficiencia de operación del sistema de captura.
- ✓ *Estimaciones de Disposición de Residuos*: Cantidad de residuos totales registradas anualmente en la báscula o estimadas usando otros métodos. Unidades: Toneladas o Mega-gramos (Mg).
- ✓ *Factor de Corrección de Metano (MCF)*: Es un ajuste a las estimaciones de generación de biogás del modelo que toma en cuenta el grado de descomposición anaeróbica de los residuos.
- ✓ *Generación de Biogás*: La cantidad de biogás producido por la descomposición de los residuos orgánicos presentes en el relleno sanitario.
- ✓ *Generación Potencial de Metano (Lo)*: Es la constante del modelo que

representa la capacidad potencial para generar metano (componente principal del biogás) del relleno sanitario. Lo depende de la cantidad de celulosa disponible en los residuos. Su unidad es m³/Mg.

- ✓ *Índice de Generación de Metano (k)*: está relacionado con el periodo de vida ($t_{1/2}$).

La k está en función del contenido de humedad en los residuos, la disponibilidad de nutrientes para los metanógenos, el pH, y la temperatura. Su unidad es 1/año.

- ✓ *Línea Base de la Recuperación de Biogás (m³/h a 50% CH₄)*: Este término es utilizado en proyectos que buscan créditos de carbono y está definido como la cantidad de biogás recuperado, ocurrido antes y después del inicio del proyecto.

- ✓ *Recuperación de Biogás*: La fracción de la generación de biogás que es o puede ser recuperada por el sistema de captura de biogás. Se calcula multiplicando el índice de generación por la eficiencia de recuperación del sistema de captura.

- ✓ *Recuperación de Biogás Promedio Anual*: es el registro en la estación de succión/combustión en metros cúbicos por hora normalizados a 50% metano en un año.

- ✓ *Sitio de Disposición Semi-anaeróbico*: Este tipo de sitio cuenta con una colocación controlada de residuos y todas las siguientes estructuras que permiten la introducción de aire en los residuos: material de cobertura permeable, sistema de drenaje de lixiviados, y sistema de venteo de biogás.

- ✓ *Sitio de Disposición No Manejado*: Es el sitio que opera como tiradero a

cielo abierto y no cumple con la definición de sitio de disposición con manejo.

- ✓ *Prácticas de operación del sitio:* Rellenos sanitarios propiamente operados tendrán características como recubrimiento diario en tierra, compactación de residuos y control de la disposición de residuos, control de los pepenadores, control de fuegos y sistema de captura de lixiviados que permitan mejorar la eficiencia de captura del sistema de captura de biogás. El modelo le pide al usuario que escoja un valor del menú de opciones la cual indica un 1 si es un sitio de disposición sin control, 2 relleno sanitario controlado y 3 no se sabe.
- ✓ *Cobertura del sistema de captura:* La eficiencia de captura está directamente relacionada con la extensión del sistema de pozos en la masa de los residuos.
- ✓ *Profundidad de los residuos:* Rellenos sanitarios con profundidades someras requiere pozos que son menos eficientes y más propensos a la infiltración de aire. A pesar de que los rellenos sanitarios con una densa red de pozos pueden capturar más biogás, rellenos sanitarios con menor número de pozos espaciados apropiadamente capturan más biogás por pozo (debido a la disponibilidad de biogás y la influencia que tiene el pozo en los residuos) que rellenos sanitarios con una densidad mayor de pozos.
- ✓ *Tipo de cobertura y extensión:* Las eficiencias de captura serán más altas para rellenos sanitarios con material de cobertura menos permeables sobre áreas con residuos, coberturas poco permeables limitan las emisiones de biogás a la atmosfera, la infiltración de aire en el sistema de captura y la infiltración de lluvia en los residuos.
- ✓ *Recubrimiento inferior:* Los rellenos sanitarios con recubrimiento inferior de arcilla o sintético tendrán baja incidencia de migración de biogás en los

suelos aledaños, resultando en una eficiencia de captura mayor.

- ✓ *Compactación de residuos:* Residuos sin compactar tendrán una infiltración mayor de aire y una calidad de biogás menor, y por lo tanto una eficiencia de captura menor.
- ✓ *Tamaño de área de disposición activa:* Sitios sin manejo con áreas de disposición grandes tienden a tener eficiencias de captura menores que sitios con manejo donde la disposición es dirigida a un área específica.
- ✓ *Manejo de lixiviados:* Niveles de lixiviados altos pueden limitar dramáticamente las eficiencias de captura, particularmente en rellenos con alta precipitación, drenaje pobre y cobertura limitada.

ESPECÍFICOS AL SITIO.

Fecha: Septiembre 2010



Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de los EE.UU.

TABLA DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS EN LOS DIFERENTES DEPARTAMENTOS DE COLOMBIA Y ESPECÍFICOS AL SITIO

Categoría de Residuo	Datos Específicos al Sitio	Santander	Amazonas	Antioquia	Arauca
Comida		45.7%	69.8%	52.4%	52.0%
Papel y Cartón		5.7%	3.6%	8.6%	7.2%
Poda (jardines)		5.2%	7.8%	6.2%	5.5%
Madera		6.4%	0.6%	3.2%	1.4%
Caucho, Piel, Huesos y Paja		3.1%	1.1%	0.2%	1.2%
Textiles		7.0%	1.7%	2.6%	2.5%
Papel Higiénico		2.3%	0.0%	0.0%	2.5%
Otros Orgánicos		0.2%	0.0%	0.5%	3.0%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)		2.1%	0.0%	0.0%	3.5%
Metales		1.0%	1.5%	1.3%	1.0%
Construcción y Demolición		4.9%	0.0%	0.0%	3.0%
Vidrio y Cerámica		1.1%	3.3%	3.1%	2.0%
Plásticos		11.9%	10.4%	14.8%	10.4%
Otros Inorgánicos		3.5%	0.4%	7.1%	5.0%
TOTAL	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	0.0%	46.3%	69.8%	52.9%	55.7%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	0.0%	7.4%	7.8%	6.2%	7.9%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	0.0%	12.7%	5.3%	11.2%	9.7%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	0.0%	9.5%	1.6%	3.4%	2.6%
Total Orgánicos	0.0%	75.9%	84.5%	73.7%	75.9%
Total Inorgánicos	100.0%	24.1%	15.5%	26.3%	24.1%
Lo de degradación rápida calculado	70	70	70	70	70
Lo de degradación moderadamente rápida calculado	121	121	93	103	99
Lo de degradación moderadamente lenta calculado	145	145	161	169	167
Lo de degradación lenta calculado	200	200	200	200	200

ANEXO G. PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS PARA EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”.

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de los EE.UU.

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS													
Relleno sanitario "El Carrasco"													
Bucaramanga, Santander, Colombia													
Año	Disposición (Mg/ir)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Línea Base del Flujo de Biogás (m3/hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)		(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ eq/yr)
1997	192,214	192,214	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1998	201,392	393,606	283	166	5.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1999	201,392	594,998	540	318	9.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2000	202,854	797,852	764	449	13.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2001	202,158	1,000,010	960	565	17.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2002	227,171	1,227,181	1,130	665	20.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2003	240,171	1,467,352	1,317	775	23.5	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2004	252,679	1,720,031	1,499	882	26.8	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2005	228,762	1,948,793	1,678	988	30.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2006	240,802	2,189,595	1,801	1,060	32.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2007	0	2,189,595	1,927	1,134	34.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2008	0	2,189,595	1,686	993	30.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2009	0	2,189,595	1,482	872	26.5	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2010	0	2,189,595	1,308	770	23.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2011	0	2,189,595	1,160	683	20.7	28%	325	191	5.8	0.5	0	1,018	21,383
2012	0	2,189,595	1,033	608	18.5	28%	289	170	5.2	0.5	0	907	19,048
2013	0	2,189,595	925	544	16.5	28%	259	152	4.6	0.4	0	812	17,050
2014	0	2,189,595	832	489	14.9	28%	233	137	4.2	0.4	0	730	15,335
2015	0	2,189,595	752	442	13.4	28%	210	124	3.8	0.3	0	660	13,859
2016	0	2,189,595	683	402	12.2	28%	191	112	3.4	0.3	0	599	12,586
2017	0	2,189,595	623	367	11.1	28%	174	103	3.1	0.3	0	547	11,484
2018	0	2,189,595	571	336	10.2	28%	160	94	2.9	0.3	0	501	10,527
2019	0	2,189,595	526	309	9.4	28%	147	87	2.6	0.2	0	462	9,693
2020	0	2,189,595	486	286	8.7	28%	136	80	2.4	0.2	0	427	8,964
2021	0	2,189,595	451	266	8.1	28%	126	74	2.3	0.2	0	396	8,324
2022	0	2,189,595	421	248	7.5	28%	118	69	2.1	0.2	0	369	7,759
2023	0	2,189,595	394	232	7.0	28%	110	65	2.0	0.2	0	346	7,259
2024	0	2,189,595	370	218	6.6	28%	103	61	1.8	0.2	0	325	6,815
2025	0	2,189,595	348	205	6.2	28%	97	57	1.7	0.2	0	306	6,418
2026	0	2,189,595	329	194	5.9	28%	92	54	1.6	0.2	0	289	6,062
2027	0	2,189,595	311	183	5.6	28%	87	51	1.6	0.1	0	273	5,742
2028	0	2,189,595	296	174	5.3	28%	83	49	1.5	0.1	0	260	5,452
2029	0	2,189,595	281	166	5.0	28%	79	46	1.4	0.1	0	247	5,188
2030	0	2,189,595	268	158	4.8	28%	75	44	1.3	0.1	0	236	4,948

PARÁMETROS del MODELO				
Contenido de Metano en el Biogás:	50%			
Factor de Corrección de Metano (MCF):	1.0			
Categoría de Residuos:	Degradación Rápida	Degradación Moderadamente Rápida	Degradación Moderadamente Lenta	Degradación Lenta
Índice de generación de CH ₄ (k):	0.180	0.090	0.036	0.018
Potencial de generación de CH ₄ (Lo) (m3/Mg):	68	117	140	193

NOTAS	
* La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto es de 10,800 Btus por kW-hr (hhv).	
**Reducción de emisiones no toman en cuenta la generación de electricidad o las emisiones del proyecto. La reducción de emisiones es calculada usando una densidad de metano de 0.0007168 Mg/m3 a temperatura estándar.	

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS													
Relleno sanitario "El Carrasco"													
Bucaramanga, Santander, Colombia													
Año	Disposición (Mg/ir)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Línea Base del Flujo de Biogás (m3/hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)		(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ eq/yr)
2007	253,476	253,476	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2008	253,476	506,952	386	227	6.9	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2009	266,817	773,770	719	423	12.8	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2010	280,868	1,054,638	1,028	605	18.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2011	274,561	1,329,199	1,318	776	23.5	43%	567	333	10.1	0.9	0	1,777	37,314
2012	0	1,329,199	1,561	919	27.9	43%	671	395	12.0	1.1	0	2,105	44,209
2013	0	1,329,199	1,357	799	24.2	43%	583	343	10.4	1.0	0	1,830	38,427
2014	0	1,329,199	1,184	697	21.2	43%	509	300	9.1	0.8	0	1,597	33,530
2015	0	1,329,199	1,037	611	18.5	43%	446	263	8.0	0.7	0	1,399	29,376
2016	0	1,329,199	913	537	16.3	43%	392	231	7.0	0.6	0	1,231	25,847
2017	0	1,329,199	807	475	14.4	43%	347	204	6.2	0.6	0	1,088	22,843
2018	0	1,329,199	716	422	12.8	43%	308	181	5.5	0.5	0	966	20,282
2019	0	1,329,199	639	376	11.4	43%	275	162	4.9	0.5	0	862	18,093
2020	0	1,329,199	573	337	10.2	43%	246	145	4.4	0.4	0	772	16,218
2021	0	1,329,199	516	304	9.2	43%	222	131	4.0	0.4	0	696	14,607
2022	0	1,329,199	467	275	8.3	43%	201	118	3.6	0.3	0	630	13,220
2023	0	1,329,199	425	250	7.6	43%	183	107	3.3	0.3	0	572	12,022
2024	0	1,329,199	388	228	6.9	43%	167	98	3.0	0.3	0	523	10,984
2025	0	1,329,199	356	210	6.4	43%	153	90	2.7	0.3	0	480	10,082
2026	0	1,329,199	328	193	5.9	43%	141	83	2.5	0.2	0	443	9,294
2027	0	1,329,199	304	179	5.4	43%	131	77	2.3	0.2	0	410	8,605
2028	0	1,329,199	282	166	5.0	43%	121	71	2.2	0.2	0	381	7,999
2029	0	1,329,199	264	155	4.7	43%	113	67	2.0	0.2	0	355	7,464
2030	0	1,329,199	247	145	4.4	43%	106	62	1.9	0.2	0	333	6,989

PARÁMETROS del MODELO					NOTAS
Contenido de Metano en el Biogás:		50%			* La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto es de 10,800 Btus por kW-hr (hhv).
Factor de Corrección de Metano (MCF):		1.0			
Categoría de Residuos:	Degradación Rápida	Degradación Moderadamente Rápida	Degradación Moderadamente Lenta	Degradación Lenta	**Reducción de emisiones no toman en cuenta la generación de electricidad o las emisiones del proyecto. La reducción de emisiones es calculada usando una densidad de metano de 0.0007168 Mg/m3 a temperatura estándar.
Índice de generación de CH ₄ (k):	0.180	0.090	0.036	0.018	
Potencial de generación de CH ₄ (Lo) (m3/Mg):	70	121	145	200	

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS													
<Relleno sanitario "El Carrasco">													
<Bucaramanga>, Santander, Colombia													
Año	Disposición (Mg/ir)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Línea Base del Flujo de Biogas (m3/hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)		(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ eq/yr)
2012	292,617	292,617	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2013	318,813	611,430	445	262	8.0	69%	307	181	5.5	0.5	0	963	20,223
2014	0	611,430	869	512	15.5	69%	600	353	10.7	1.0	0	1,881	39,505
2015	0	611,430	752	443	13.4	69%	519	305	9.3	0.9	0	1,628	34,180
2016	0	611,430	653	384	11.7	69%	451	265	8.1	0.7	0	1,413	29,679
2017	0	611,430	569	335	10.2	69%	393	231	7.0	0.6	0	1,232	25,867
2018	0	611,430	498	293	8.9	69%	344	202	6.1	0.6	0	1,078	22,636
2019	0	611,430	438	258	7.8	69%	302	178	5.4	0.5	0	947	19,892
2020	0	611,430	386	227	6.9	69%	267	157	4.8	0.4	0	836	17,558
2021	0	611,430	343	202	6.1	69%	236	139	4.2	0.4	0	741	15,569
2022	0	611,430	305	180	5.5	69%	211	124	3.8	0.3	0	660	13,870
2023	0	611,430	273	161	4.9	69%	189	111	3.4	0.3	0	591	12,415
2024	0	611,430	246	145	4.4	69%	170	100	3.0	0.3	0	532	11,166
2025	0	611,430	222	131	4.0	69%	153	90	2.7	0.3	0	481	10,092
2026	0	611,430	202	119	3.6	69%	139	82	2.5	0.2	0	436	9,165
2027	0	611,430	184	108	3.3	69%	127	75	2.3	0.2	0	398	8,362
2028	0	611,430	169	99	3.0	69%	116	69	2.1	0.2	0	365	7,665
2029	0	611,430	155	91	2.8	69%	107	63	1.9	0.2	0	336	7,057
2030	0	611,430	144	85	2.6	69%	99	58	1.8	0.2	0	311	6,526

PARÁMETROS del MODELO					NOTAS				
Contenido de Metano en el Biogás:		50%			* La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto es de 10,800 Btus por kW-hr (hhv).				
Factor de Corrección de Metano (MCF):		1.0							
Categoría de Residuos:		Degradación Rápida	Degradación Moderadamente Rápida	Degradación Moderadamente Lenta	Degradación Lenta				
Índice de generación de CH ₄ (k):		0.180	0.090	0.036	0.018				
Potencial de generación de CH ₄ (Lo) (m3/Mg):		70	121	145	200	**Reducción de emisiones no toman en cuenta la generación de electricidad o las emisiones del proyecto. La reducción de emisiones es calculada usando una densidad de metano de 0.0007168 Mg/m3 a temperatura estándar.			

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de los EE.UU.

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS													
<Relleno sanitario "El Carrasco">													
<Bucaramanga>, Santander, Colombia													
Año	Disposición (Mg/ir)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Línea Base del Flujo de Biogás (m3/hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)		(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ eq/yr)
2014	546,013	546,013	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2015	574,750	1,120,763	830	489	14.8	73%	606	357	10.8	1.0	0	1,901	39,923
2016	605,000	1,725,763	1,592	937	28.4	73%	1,162	684	20.8	1.9	0	3,644	76,515
2017	0	1,725,763	2,297	1,352	41.0	73%	1,677	987	30.0	2.8	0	5,259	110,441
2018	0	1,725,763	1,991	1,172	35.6	73%	1,453	855	26.0	2.4	0	4,557	95,703
2019	0	1,725,763	1,731	1,019	30.9	73%	1,264	744	22.6	2.1	0	3,964	83,235
2020	0	1,725,763	1,512	890	27.0	73%	1,103	649	19.7	1.8	0	3,461	72,673
2021	0	1,725,763	1,325	780	23.7	73%	967	569	17.3	1.6	0	3,034	63,713
2022	0	1,725,763	1,167	687	20.9	73%	852	501	15.2	1.4	0	2,671	56,098
2023	0	1,725,763	1,032	607	18.4	73%	753	443	13.5	1.2	0	2,363	49,614
2024	0	1,725,763	917	540	16.4	73%	669	394	12.0	1.1	0	2,099	44,084
2025	0	1,725,763	819	482	14.6	73%	598	352	10.7	1.0	0	1,874	39,355
2026	0	1,725,763	734	432	13.1	73%	536	316	9.6	0.9	0	1,681	35,302
2027	0	1,725,763	662	390	11.8	73%	483	284	8.6	0.8	0	1,515	31,820
2028	0	1,725,763	599	353	10.7	73%	438	258	7.8	0.7	0	1,372	28,820
2029	0	1,725,763	546	321	9.7	73%	398	234	7.1	0.7	0	1,249	26,228
2030	0	1,725,763	499	294	8.9	73%	364	214	6.5	0.6	0	1,142	23,980

PARÁMETROS del MODELO				
Contenido de Metano en el Biogás:	50%			
Factor de Corrección de Metano (MCF):	1.0			
Categoría de Residuos:	Degradación Rápida	Degradación Moderadamente Rápida	Degradación Moderadamente Lenta	Degradación Lenta
Índice de generación de CH ₄ (k):	0.180	0.090	0.036	0.018
Potencial de generación de CH ₄ (Lo) (m3/Mg):	70	121	145	200

NOTAS	
* La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto es de 10,800 Btus por kW-hr (hhv).	
**Reducción de emisiones no toman en cuenta la generación de electricidad o las emisiones del proyecto. La reducción de emisiones es calculada usando una densidad de metano de 0.0007168 Mg/m3 a temperatura estándar.	

ANEXO H. CATÁLOGOS DE MICROTURBINAS CAPSTONE

ESPECIALIZADAS EN BIOGÁS DE VERTEDERO.

CR30 MicroTurbine Renewable Fuels



Achieve ultra-low emissions and reliable electrical generation from waste gas.

- Years of renewable experience
- Ultra-low emissions
- Operates on landfill or digester gas
- One moving part – minimal maintenance and downtime
- Patented air bearing – no lubricating oil or coolant
- 5 and 9 year Factory Protection Plans available
- Remote monitoring and diagnostic capabilities
- Integrated utility synchronization and protection⁽¹⁾
- Small, modular design allows for easy, low-cost installation
- Reliable – tens of millions of run hours and counting



CR30 MicroTurbine

Electrical Performance⁽²⁾

Electrical Power Output	30kW
Voltage	400–480 VAC
Electrical Service	3-Phase, 4 wire
Frequency	50/60 Hz
Maximum Output Current	36A, grid connect operation
Electrical Efficiency LHV	26%

Fuel/Engine Characteristics⁽²⁾

Digester / Landfill Gas HHV	13.0–32.6 MJ/m ³ (350–875 BTU/scf)
H ₂ S Content	< 70,000 ppmv
Inlet Pressure – HHV dependent	414–483 kPa gauge (60–70 psig)
Fuel Flow HHV	457 MJ/hr (433,000 BTU/hr)
Net Heat Rate LHV	13.8 MJ/kWh (13,100 BTU/kWh)

Exhaust Characteristics⁽²⁾

NO _x Emissions @ 15% O ₂ ⁽³⁾	< 9 ppmvd (18 mg/m ³)
NO _x / Electrical Output ⁽³⁾	0.22 g/bhp-hr (0.64 lb/MWhe)
Exhaust Gas Flow	0.31 kg/s (0.68 lbm/s)
Exhaust Gas Temperature	275°C (530°F)



Dimensions & Weight⁽⁴⁾⁽⁵⁾

Width x Depth x Height	0.76 x 1.5 x 1.8 m (30 x 60 x 70 in)
Weight	405 kg (891 lb)

Minimum Clearance Requirements⁽⁶⁾

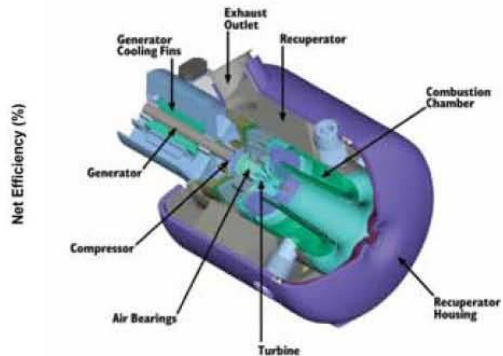
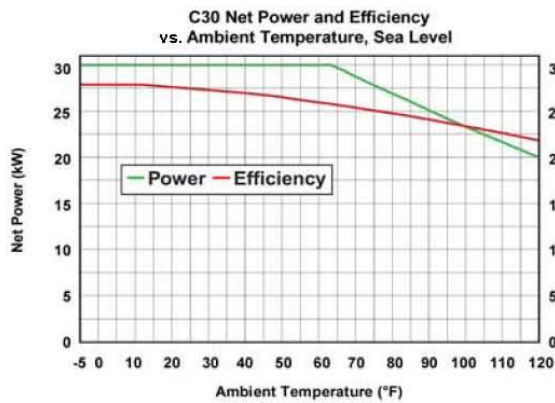
Vertical Clearance	0.61 m (24 in)
Horizontal Clearance	
Left & Right	0.76 m (30 in)
Front	0.93 m (37 in)
Rear	0.90 m (35 in)

Sound Levels

Acoustic Emissions at Full Load Power	
Nominal at 10 m (33 ft)	65 dBA

Certifications

- Models available with optional equipment for CE Marking



(1) Some utilities may require additional equipment for grid interconnectivity
 (2) Nominal full power performance at ISO conditions: 59°F, 14.696 psia, 60% RH
 (3) For surrogate landfill and digester gases. Please contact Capstone for additional details
 (4) Approximate dimensions and weights
 (5) Height dimensions are to the roof line. Exhaust outlet extends at least 7 in above the roof line
 (6) Clearance requirements may increase due to local code considerations
 Specifications are not warranted and are subject to change without notice.



CR65 & CR65 ICHP MicroTurbine Renewable



Robust power system achieves ultra-low emissions and reliable electrical/thermal generation from waste gas.

- Years of renewable experience
- Ultra-low emissions
- Operates on landfill or digester gas
- One moving part – minimal maintenance and downtime
- Patented air bearing – no lubricating oil or coolant
- 5 and 9 year Factory Protection Plans available
- Remote monitoring and diagnostic capabilities
- Integrated utility synchronization and protection
- Small, modular design allows for easy, low-cost installation
- Reliable – tens of millions of run hours and counting
- Dual Mode option available for digester gas operation



C65 MicroTurbine

Electrical Performance⁽¹⁾

Electrical Power Output	65kW
Voltage	400–480 VAC
Electrical Service	3-Phase, 4 wire
Frequency	50/60 Hz, grid connect operation
Maximum Output Current	100A, grid connect operation 100A, stand alone operation ⁽²⁾⁽³⁾
Electrical Efficiency LHV	29%



C65 ICHP MicroTurbine

Fuel/Engine Characteristics⁽¹⁾

Landfill Gas HHV	13.0–22.3 MJ/m ³ (350–600 BTU/scf)
Digester Gas HHV	20.5–32.6 MJ/m ³ (550–875 BTU/scf)
H ₂ S Content	< 5,000 ppmv
Inlet Pressure	517–552 kPa gauge (75–80 psig)
Fuel Flow HHV	888 MJ/hr (842,000 BTU/hr)
Net Heat Rate LHV	12.4 MJ/KWh (11,800 BTU/kWh)

Exhaust Characteristics⁽¹⁾

NO _x Emissions @ 15% O ₂ ⁽⁴⁾	< 9 ppmvd (18 mg/m ³)
NO _x / Electrical Output ⁽⁴⁾	0.16 g/bhp-hr (0.46 lb/MWhe)
Exhaust Gas Flow	0.49 kg/s (1.08 lbm/s)
Exhaust Gas Temperature	309°C (588°F)

Reliable power when and where you need it. Clean and simple.

Dimensions & Weight⁽⁴⁾

Width x Depth x Height ⁽⁵⁾	1.7 x 3.8 x 2.5 m (67 x 150 x 98 in)
Weight	2776 kg (6,120 lb)

Minimum Clearance Requirements⁽⁶⁾

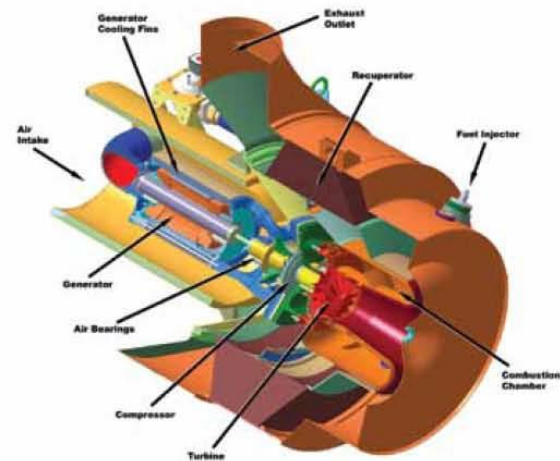
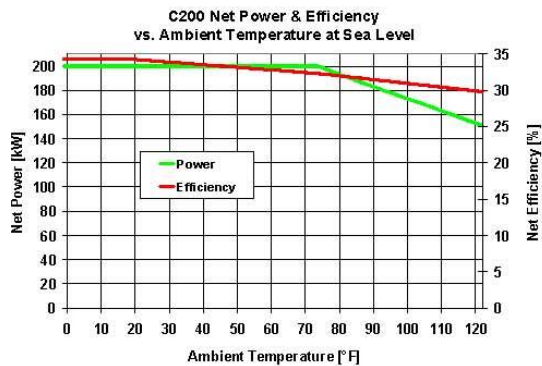
Vertical Clearance	0.6 m (24 in)
Horizontal Clearance	
Left & Right	1.1 m (42 in)
Front	1.1 m (42 in)
Rear	1.8 m (70 in)

Sound Levels

Acoustic Emissions at Full Load Power	
Nominal at 10 m (33 ft)	65 dBA

Planned Certifications

- Will comply with UL 2200 and UL 1741 for raw natural gas and biogas operation under existing UL files⁽⁷⁾
- Will comply with IEEE 1547 and will meet statewide utility interconnection requirements for California Rule 21 and the New York State Public Service Commission
- Models will be available with optional equipment for CE marking
- Models will be available with optional 2008 CARB certification for waste gas



(1) Nominal full power performance at ISO conditions: 59°F, 14.696 psia, 60% RH
 (2) Minimum power output is 100kW for these fuels. Additional fuel gas conditioning required. Contact Capstone for specific application guidance
 (3) For surrogate landfill and digester gases. Please contact Capstone for additional details
 (4) Approximate dimensions and weights
 (5) Height dimensions are to the roof line. Exhaust outlet extends at least 8 inches above the roof line
 (6) Clearance requirements may increase due to local code considerations
 (7) All models are planned to be UL Listed or available with optional equipment for CE marking
 Specifications are not warranted and are subject to change without notice.



CR200 MicroTurbine Renewable Fuels



World's largest air-bearing microturbine produces 200kW of clean, green, and reliable power.

- Ultra-low emissions
- Accepts renewable fuels with up to 5,000 ppm H₂S content
- One moving part – minimal maintenance and downtime
- Patented air bearing – no lubricating oil or coolant
- 5 and 9 year Factory Protection Plans available
- Remote monitoring and diagnostic capabilities
- Integrated utility synchronization and protection
- Small, modular design allows for easy, low-cost installation
- Proven technology with tens of millions of run hours and counting



C200 MicroTurbine

Electrical Performance⁽¹⁾

Electrical Power Output ⁽²⁾	200kW
Voltage	400–480 VAC
Electrical Service	3-Phase, 4 wire
Frequency	50/60 Hz
Maximum Output Current	290A RMS @ 400V, grid connect operation 240A RMS @ 480V, grid connect operation
Electrical Efficiency LHV	33%

Fuel/Engine Characteristics⁽¹⁾

Landfill Gas HHV	13.0–22.3 MJ/m ³ (350–600 BTU/scf)
Digester Gas HHV	20.5–32.6 MJ/m ³ (550–875 BTU/scf)
Inlet Pressure	517–552 kPa gauge (75–80 psig)
Fuel Flow HHV	2,400 MJ/hr (2,280,000 BTU/hr)
Net Heat Rate LHV	10.9 MJ/kWh (10,300 BTU/kWh)
H ₂ S content	< 5,000 ppmv

Exhaust Characteristics⁽¹⁾

NO _x Emissions @ 15% O ₂ ⁽³⁾	< 9 ppmvd (18 mg/m ³)
NO _x / Electrical Output ⁽³⁾	0.14 g/bhp-hr (0.40 lb/MWhe)
Exhaust Gas Flow	1.3 kg/s (2.9 lbm/s)
Exhaust Gas Temperature	280°C (535°F)
Exhaust Energy	1,420 MJ/hr (1,350,000 BTU/hr)

Reliable power when and where you need it. Clean and simple.

CR600 600kW Power Package Renewable Fuels



World's largest air-bearing turbine system produces 600kW of clean, green, and reliable power.

- High electrical efficiency over a very wide operating range
- Low-maintenance air bearings require no lube oil or coolant
- Ultra-low emissions
- High availability – part load redundancy
- Proven technology with tens of millions of operating hours
- Integrated utility synchronization and protection with a modular design
- 5 and 9 year Factory Protection Plans available
- Upgradable to 800kW and 1MW with field installed Capstone 200kW power modules
- Remote monitoring and diagnostic capabilities



CR600 Power Package

Electrical Performance⁽¹⁾

Electrical Power Output	600kW
Voltage	400–480 VAC
Electrical Service	3-Phase, 4 wire
Frequency	50/60 Hz, grid connect operation
Maximum Output Current	870A RMS @ 400V, grid connect operation 720A RMS @ 480V, grid connect operation
Electrical Efficiency LHV	33%

Fuel/Engine Characteristics⁽¹⁾

Landfill Gas HHV	13.0–22.3 MJ/m ³ (350–600 BTU/scf)
Digester Gas HHV	20.5–32.6 MJ/m ³ (550–875 BTU/scf)
Inlet Pressure	517–552 kPa gauge (75–80 psig)
Fuel Flow HHV	7,200 MJ/hr (6,840,000 BTU/hr)
Net Heat Rate LHV	10.9 MJ/kWh (10,300 BTU/kWh)
H ₂ S Content	< 5,000 ppm

Exhaust Characteristics⁽¹⁾

NOx Emissions @ 15% O ₂ ⁽²⁾	< 9 ppmvd (18 mg/m ³)
NOx / Electrical Output ⁽²⁾	0.14 g/bhp-hr (0.4 lb/MWhe)
Exhaust Gas Flow	4.0 kg/s (8.8 lbm/s)
Exhaust Gas Temperature	280°C (535°F)
Exhaust Energy	4,260 MJ/hr (4,050,000 BTU/hr)

Reliable power when and where you need it. Clean and simple.

CR1000 Megawatt Power Package Renewable Fuels



World's largest air-bearing turbine system produces 1000kW of clean, green, and reliable power.

- High electrical efficiency over a very wide operating range
- Low-maintenance air bearings require no lube oil or coolant
- Ultra-low emissions
- High availability – part load redundancy
- Proven technology with tens of millions of operating hours
- Integrated utility synchronization and protection with a modular design
- 5 and 9 year Factory Protection Plans available
- Remote monitoring and diagnostic capabilities



C1000 Power Package

Electrical Performance⁽¹⁾

Electrical Power Output	1000kW
Voltage	400–480 VAC
Electrical Service	3-Phase, 4 wire
Frequency	50/60 Hz, grid connect operation
Maximum Output Current	1,450A RMS @ 400V, grid connect operation 1,200A RMS @ 480V, grid connect operation
Electrical Efficiency LHV	33%

Fuel/Engine Characteristics⁽¹⁾

Landfill Gas HHV	13.0–22.3 MJ/m ³ (350–600 BTU/scf)
Digester Gas HHV	20.5–32.6 MJ/m ³ (550–875 BTU/scf)
Inlet Pressure	517–552 kPa gauge (75–80 psig)
Fuel Flow HHV	12,000 MJ/hr (11,400,000 BTU/hr)
Net Heat Rate LHV	10.9 MJ/kWh (10,300 BTU/kWh)
H ₂ S Content	<5,000 ppm

Exhaust Characteristics⁽¹⁾

NO _x Emissions @ 15% O ₂ ⁽²⁾	< 9 ppmvd (18 mg/m ³)
NO _x / Electrical Output ⁽²⁾	0.14 g/bhp-hr (0.4 lb/MWhe)
Exhaust Gas Flow	6.7 kg/s (14.7 lbm/s)
Exhaust Gas Temperature	280°C (535°F)
Exhaust Energy	7,100 MJ/hr (6,750,000 BTU/hr)

Reliable power when and where you need it. Clean and simple.

Dimensions & Weight⁽³⁾

Width x Depth x Height	2.4 x 9.1 x 2.9 m (96 x 360 x 114 in)
Weight - Grid Connect Model	16874 kg (37,200 lbs)

Minimum Clearance Requirements⁽⁴⁾

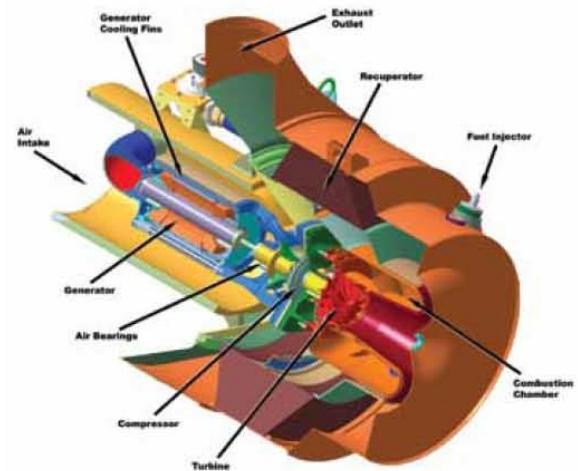
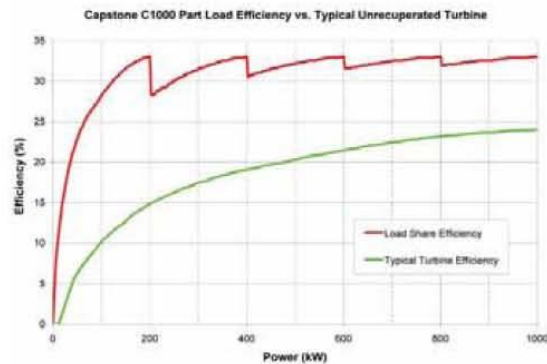
Vertical Clearance	0.6 m (24 in)
Horizontal Clearance	
Left	1.5 m (60 in)
Right	0.0 m (0 in)
Front	1.5 m (60 in)
Rear	2.0 m (80 in)

Sound Levels

Acoustic Emissions at Full Load Power	
Nominal at 10 m (33 ft)	65 dBA

Planned Certifications

- Will comply with UL 2200 and UL 1741 for raw natural gas and biogas operation under existing UL files⁽⁵⁾
- Will comply with IEEE 1547 and will meet statewide utility interconnection requirements for California Rule 21 and the New York State Public Service Commission
- Models will be available with optional equipment for CE marking
- Models will be available with optional 2008 CARB certification for waste gas

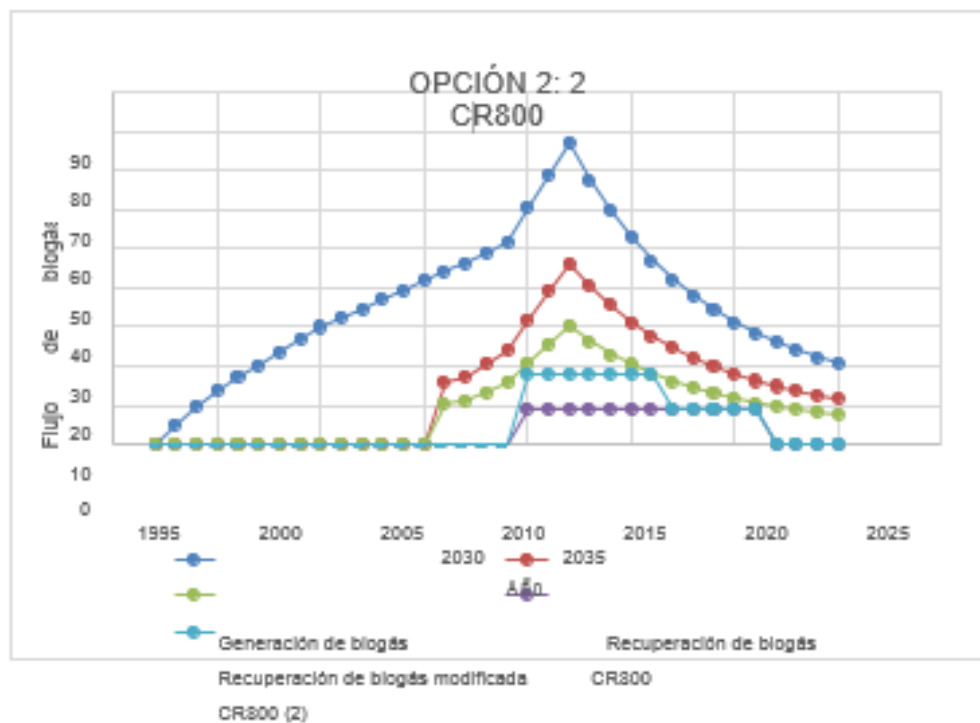
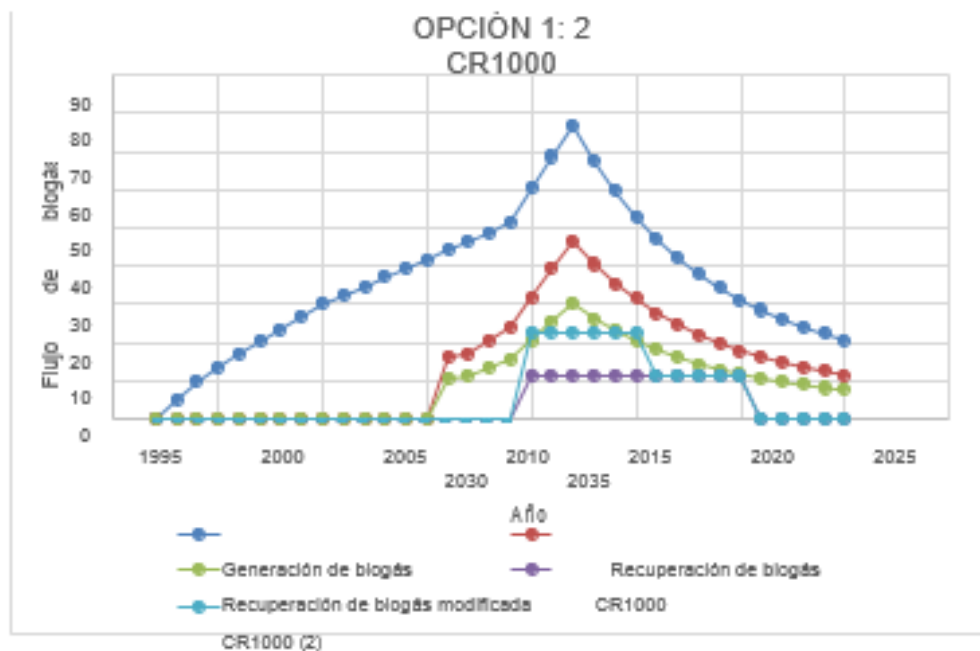


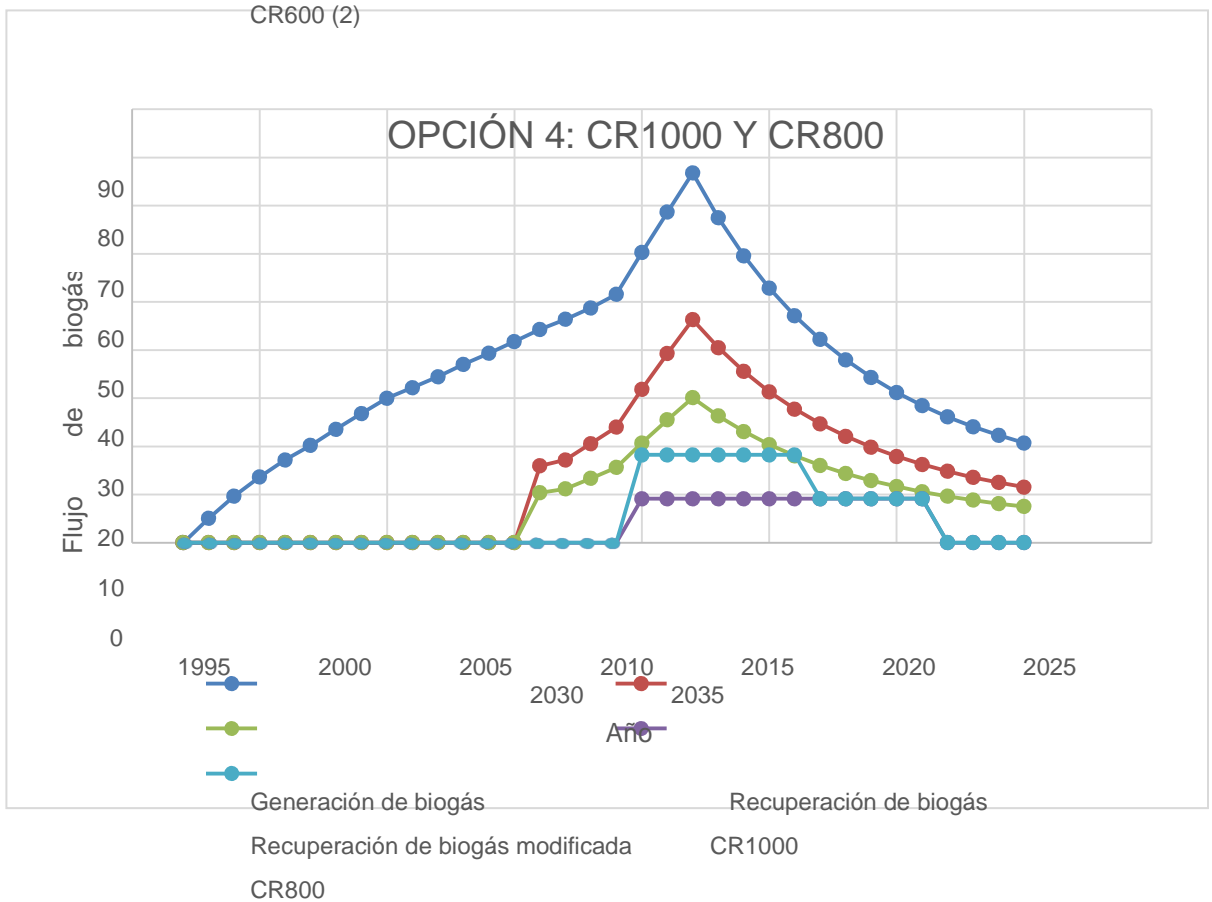
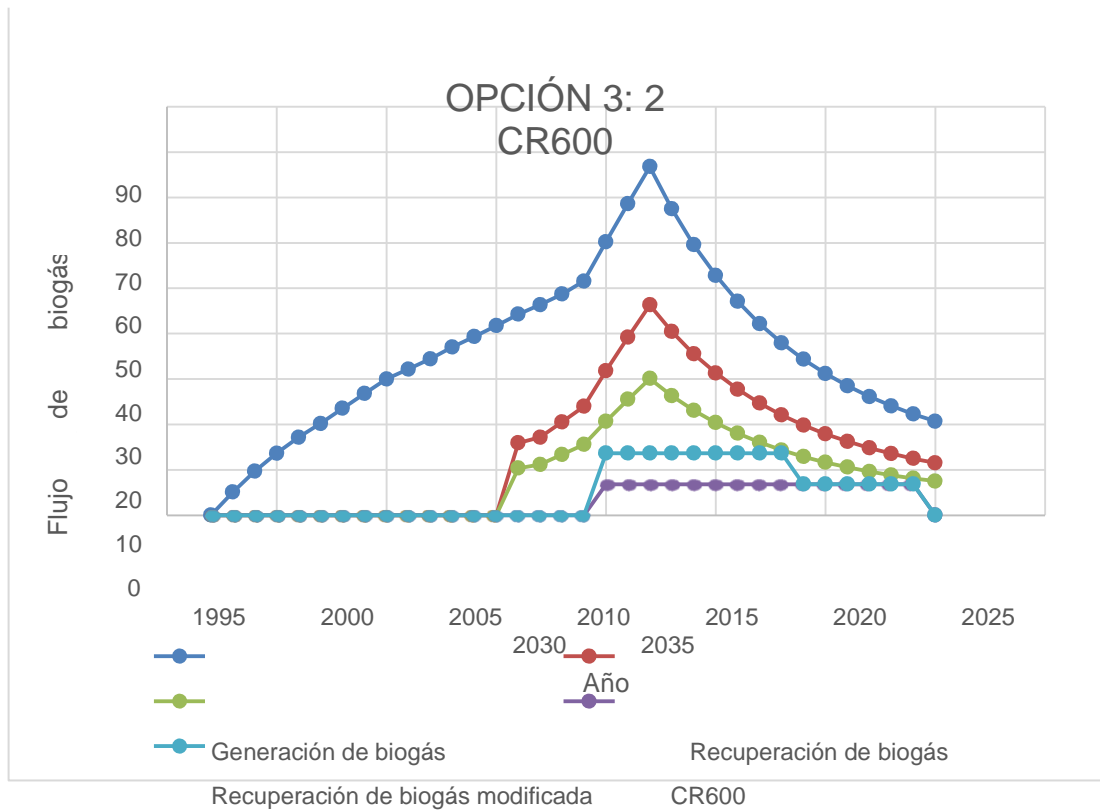
C200 Engine

(1) Nominal full power performance at ISO conditions: 59°F, 14.696 psia, 60% RH
 (2) For surrogate landfill and digester gases. Please contact Capstone for additional details
 (3) Approximate dimensions and weights
 (4) Clearance requirements may increase due to local code considerations
 (5) All models are planned to be UL Listed or available with optional equipment for CE marking
 Specifications are not warranted and are subject to change without notice.

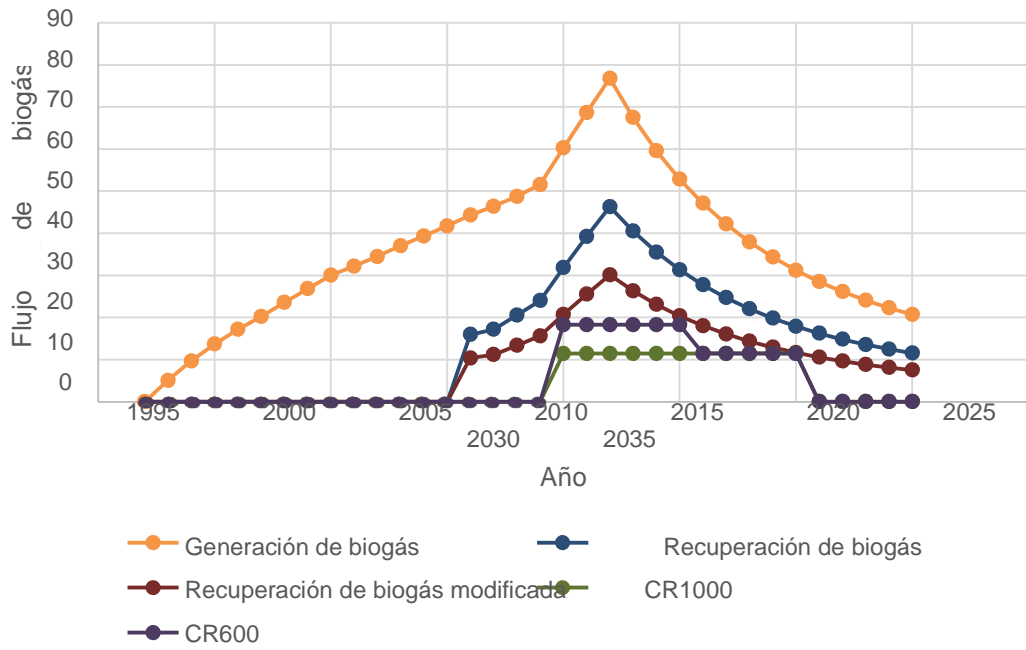


ANEXO I. GRÁFICAS DE LAS OPCIONES DE MICROTURBINAS CONSIDERADAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DEL BIOGÁS PRODUCIDO POR EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”.





OPCIÓN 5: CR1000 Y CR600



OPCIÓN 6: CR800 Y CR600

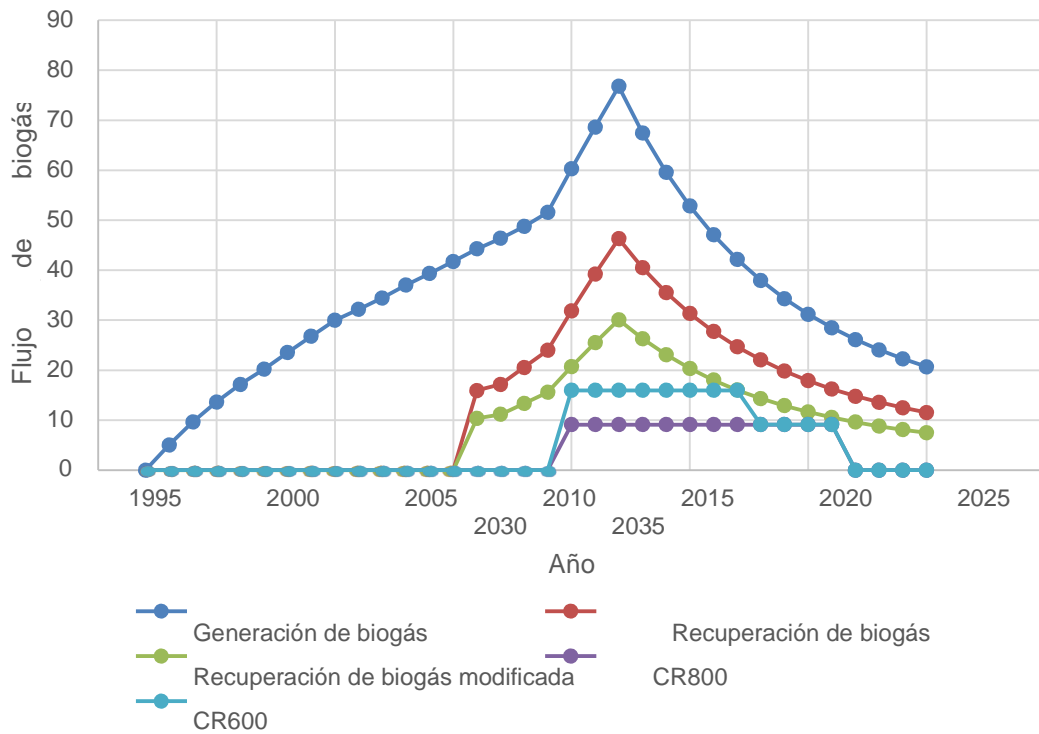


Tabla resumen de las alternativas consideradas de las microturbinas

	Referencia	Años útiles	Años útiles totales	Capacidad instalada KW
OPCION 1	CR1000	3	13	2000
	CR1000	10		
OPCION 2	CR800	6	17	1600
	CR800	11		
OPCION 3	CR600	8	22	1200
	CR600	14		
OPCION 4	CR1000	10	15	1800
	CR800	5		
OPCION 5	CR1000	9	14	1600
	CR600	5		
OPCION 6	CR800	7	18	1400
	CR600	11		

ANEXO J. MATRIZ DE PRIORIZACIÓN

alto		5
medio		3
bajo		1

factores	Actualidad	Se ha utilizado en casos exitosos	Caracterización del sitio de disposición	Caracterización de residuos sólidos	Presenta manual de usuario	Se especializa en biogás de	total	ponderacion
Actualidad		5	3	3	5	5	24	13.6%
Se ha utilizado en casos exitosos de generación	5		3	3	3	5	22	12.4%
Caracterización del sitio de disposición	5	5		5	3	3	24	13.6%
Estimados de eficiencia de captura	5	5	3		3	3	24	13.6%
Caracterización de residuos sólidos	5	5	5	5		5	30	16.9%
Presenta manual de usuario	5	1	5	5	5		26	14.7%
Se especializa en biogás de vertedero	5	5	3	3	3	5	27	15.3%
total	26	26	22	24	22	26	177	100%

factores	Modelo estadounidense	Modelo canadiense		
Actualidad	0.136	0.136	100%	5
Se ha utilizado en casos exitosos de generación	0.075	0.025	60%	3
Caracterización del sitio de disposición	0.136	0.136	20%	1
Estimados de eficiencia de captura	0.136	0.136		
Caracterización de residuos sólidos	0.169	0.034		
Presenta manual de usuario	0.147	0.147		
Se especializa en biogás de vertederos	0.153	0.031		
total	0.950	0.643		

ANEXO K. FORMATO VISITAS TÉCNICAS

FORMATO DE VISITAS TÉCNICAS									
1.	INFORMACIÓN GENERAL								
	FECHA	DÍA	MES	AÑO	LUGAR	Desde:	Hasta:		
		10	03	2014	Sitio Disposición Final El Carrasco	9:00	10:00		
2.	PARTICIPANTES								
	ESTUDIANTES						FIRMA		
	Yohana Carolina Galvis Silva						<i>Yohana C. Galvis</i>		
	Leonardo Gomes Ariza						<i>Leonardo</i>		
	ACOMPAÑANTES				CARGO				
	<i>Ing Oscar Soto</i>				<i>Jefe Disposición Final</i>		<i>[Firma]</i>		
3.	ACTIVIDADES REALIZADAS								
	<p>1. Presentación con el ingeniero Oscar Soto.</p> <p>2. Solicitud de visitas técnicas al relleno sanitario "El Carrasco", por medio de una carta de petición firmada por el Director de la escuela de eléctrica y electrónica de la UIS Johann Petit y el codirector del proyecto Alvaro Alyamani Triana.</p>								
4.	OBSERVACIONES								
	<p>Este día se acordó que la información que nos sería brindada, no podría ser dada completamente a terceros.</p>								

FORMATO DE VISITAS TÉCNICAS

1.	INFORMACIÓN GENERAL								
	FECHA	DÍA	MES	AÑO	LUGAR	" El Carrasco "			
		08	04	2014	HORA	Desde:	3:00 pm	Hasta:	4:00 pm
2.	PARTICIPANTES								
	ESTUDIANTES						FIRMA		
	Yohana Carolina Galvis Silva						Yohana C. Galvis		
	Leonardo Gomes Ariza						R. G. Ariza		
	ACOMPañANTES				CARGO				
	Ing. Oscar Soto				Jefe disposición final		[Firma]		
3.	ACTIVIDADES REALIZADAS								
	<p>1. Presentación con el técnico Ruben Amaya, encargado para llevarnos a las celdas de disposición.</p> <p>2. Entrega de documentación relacionada con el relleno.</p>								
4.	OBSERVACIONES								
	<p>No se pudo subir a las celdas de disposición debido a que no contabamos con la indumentaria necesaria.</p>								

FORMATO DE VISITAS TÉCNICAS

1.	INFORMACIÓN GENERAL								
	FECHA	DÍA	MES	AÑO	LUGAR	" El Carrasco "			
		12	05	2014	HORA	Desde:		Hasta:	
2.	PARTICIPANTES								
	ESTUDIANTES						FIRMA		
	Yohana Carolina Galvis Silva						<i>Yohana C. Galvis</i>		
	Leonardo Gomes Ariza						<i>Ariza</i>		
	ACOMPAÑANTES				CARGO				
	Ing. Oscar Soto				Jefe de disposicion		<i>[Signature]</i>		
3.	ACTIVIDADES REALIZADAS								
	<p>1. Entrega de una encuesta que realizamos al ingeniero Oscar Soto y al técnico Ruben Amaya.</p>								
4.	OBSERVACIONES								
	<p>Se hizo el compromiso de entregar las encuestas resueltas en la proxima visita prevista para el 10 de Junio de 2014</p>								

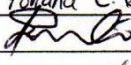

FORMATO DE VISITAS TÉCNICAS

1.	INFORMACIÓN GENERAL							
FECHA	DÍA	MES	AÑO	LUGAR	"El Carrasco"			
	10	06	2014	HORA	Desde:	9:00	Hasta:	11:00
2.	PARTICIPANTES							
ESTUDIANTES				FIRMA				
Yohana Carolina Galvis Silva				<i>Yohana C. Galvis</i>				
Leonardo Gomes Ariza				<i>Ariza</i>				
ACOMPañANTES				CARGO				
Ing. Oscar Soto				Jefe de disposición final				
				<i>[Firma]</i>				
3.	ACTIVIDADES REALIZADAS							
<p>1. Entrega por parte del ingeniero Oscar Soto de las encuestas resueltas.</p> <p>2. Visita acompañada por el técnico Rúben Amaya a las instalaciones dejadas por la empresa BIONERSIS en "el Carrasco".</p> <p>3. Registro fotografico de la planta.</p>								
4.	OBSERVACIONES							
<p>Explicación por parte del ingeniero Oscar Soto de porque no se habia podido responder la encuesta en su totalidad (falta de información a causa de una perdida de discos duros y otra porque no existia).</p>								

FORMATO DE VISITAS TÉCNICAS

1.	INFORMACIÓN GENERAL								
	FECHA	DÍA	MES	AÑO	LUGAR	"El Carrasco"			
		09	07	2014	HORA	Desde:	9:00	Hasta:	11:30
2.	PARTICIPANTES								
	ESTUDIANTES						FIRMA		
	Yohana Carolina Galvis Silva						<i>Yohana C. Galvis</i>		
	Leonardo Gomes Ariza						<i>[Firma]</i>		
	ACOMPañANTES				CARGO				
	Ing. Oscar Soto				Jefe de disposición final		<i>[Firma]</i>		
3.	ACTIVIDADES REALIZADAS								
	<p>1. Ida a las celdas de disposición de residuos sólidos Urbanos.</p> <p>2. Visita a la planta de compostaje.</p> <p>3. Solución de inquietudes respecto a información proporcionada anteriormente.</p> <p>4. Petición de la información que dejó la empresa BIONERSIS.</p>								
4.	OBSERVACIONES								
	<p>El ingeniero Oscar Soto queda de proporcionarnos la información que dejó BIONERSIS el día 11 de agosto de 2014.</p>								

FORMATO DE VISITAS TÉCNICAS

1.	INFORMACIÓN GENERAL								
	FECHA	DÍA	MES	AÑO	LUGAR	" El Carrasco "			
		11	08	2014	HORA	Desde:	10:00	Hasta:	10:30
2.	PARTICIPANTES								
	ESTUDIANTES						FIRMA		
	Yohana Carolina Galvis Silva						Yohana C. Galvis		
	Leonardo Gomes Ariza								
	ACOMPAÑANTES				CARGO				
	Ing. Oscar Soto				Jefe de disposición final				
3.	ACTIVIDADES REALIZADAS								
	<p style="font-size: 1.2em;">Recibimos la información de BIONERSIS</p>								
4.	OBSERVACIONES								

FORMATO DE VISITAS TÉCNICAS

FORMATO DE VISITAS TÉCNICAS									
1.	INFORMACIÓN GENERAL								
	FECHA	DÍA	MES	AÑO	LUGAR	Oficinas EMAB			
		01	09	2014	HORA	Desde:	9:00	Hasta:	10:00
2.	PARTICIPANTES								
	ESTUDIANTES							FIRMA	
	Yohana Carolina Galvis Silva							<i>Yohana C. Galvis</i>	
	Leonardo Gomes Ariza							<i>LG Ariza</i>	
	ACOMPAÑANTES				CARGO				
	Ing. Oscar Soto				Jefe disposición final		<i>[Signature]</i>		
	Ing. Alvaro Alyamani Triana				Co-director Proyecto				
3.	ACTIVIDADES REALIZADAS								
	<p>1. Presentación con el ingeniero Oscar Soto.</p> <p>2. Solicitud de visitas técnicas al relleno Sanitario "El Carrasco", por medio de una carta de Petición firmada por el Director de escuela Johann Petity el Codirector del proyecto Alvaro Alyamani Triana.</p>								
4.	OBSERVACIONES								