

**EVALUACION DE LA GENERACION DE BIOGAS EN RELLENOS
SANITARIOS EN COLOMBIA EN EL MARCO DEL PROTOCOLO DE
KYOTO**

MARÍA DEL CARMEN ORDOÑEZ ORDOÑEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍAS

PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL

PEREIRA, 2011



**EVALUACION DE LA GENERACION DE BIOGAS EN RELLENOS
SANITARIOS EN COLOMBIA EN EL MARCO DEL PROTOCOLO DE
KYOTO**

MARÍA DEL CARMEN ORDOÑEZ ORDOÑEZ

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Química Industrial**

Director:

M.Sc. Darwin Hernández Sepúlveda

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍAS

PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL

PEREIRA, 2011



Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira, Marzo de 2011

Dedicatoria

*A Dios por permitirme terminar
una etapa más de mi vida,
por todas las bendiciones
entregadas en este proceso.
A mi familia por su apoyo incondicional,
a mis compañeros por su amistad
y respaldo en este largo camino.*

Gracias

Agradecimientos

Agradecerle a Dios por darme la sabiduría para encaminarme en este proceso y darme la voluntad y herramientas para terminarlo; a mi esposo e hija por todo su apoyo, respaldo y motivación; a mis profesores por el conocimiento entregado; a la universidad por darme el bienestar y los medios que contribuyeron a mi formación académica y personal; a mis compañeros por su colaboración, apoyo y amistad; a mi director por la paciencia y acompañamiento en la culminación de esta etapa. Y a todos aquellos que aportaron de una u otra forma en este recorrido, muchas gracias.

Resumen

Los rellenos sanitarios son el resultado de la acumulación de desechos o residuos generados por las actividades de los seres humanos, los rellenos constituyen la segunda fuente más importante generadora de Gases de Efecto Invernadero, los cuales surgen como resultado del proceso de descomposición biológica de residuos sólidos de origen orgánico. Al conjunto de estos gases se le conoce con el nombre de biogás.

Estos lugares de depósito de residuos se han convertido en un problema para países desarrollados y una alternativa de desarrollo para países subdesarrollados; que están convirtiendo esta amenaza en una oportunidad de aprovechamiento energético usándolo como una producción de energía alternativa no convencional, por medio de la transformación de los GEI allí generados, el desarrollo de estos proyectos se dieron a conocer como proyectos MDL, los cuales traen consigo cantidad de beneficios económicos, tecnológicos, sociales, innovadores y principalmente ambientales, gracias a la transformación de uno de los GEI más dañinos para la atmósfera, a través del cambio del CH_4 a CO_2 desprendiendo como resultado de este proceso energía.

Aunque este proceso y adecuación no es fácil y muy costoso, para hacer una inversión confiable se dispone de diferentes métodos para estimar que cantidad de biogás que se produce en cualquier relleno, en que composición y por cuánto tiempo según las diferentes condiciones de la región, dándonos una herramienta importante para estimar el potencial energético y económico, permitiéndonos visionar a futuro y proyectar así cual puede ser la viabilidad que cada proyecto estudiado tiene.

En este documento realizamos el estudio de un relleno en particular y también se muestran algunos de los proyectos más exitosos y otros potencialmente exitoso en Colombia, como lo es relleno sanitario LA GLORITA, se encuentra el estudio y desarrollo de uno de los métodos para la estimación de biogás, con un análisis de viabilidad según los resultados obtenidos con el método escogido, también se destacan los beneficios y la importancia que tiene ambiental y socialmente y, en general el aporte significativo que entrega para el país el desarrollo de un proyecto de esta categoría, además de ser un ejemplo a seguir por los otros municipios y departamentos de nuestro país y como también a nivel internacional.

Y como valor agregado se muestran algunas bases y requisitos que deben de cumplir estos proyectos MDL, cuales son los componentes más importantes que debe tener estos proyectos y quien puede brindar asesoría, las instituciones encargadas de evaluar, opinar y generar cambios para que sean proyectos sostenibles.

Tabla de Contenido

	pág.
Agradecimientos	iv
Resumen	v
Tabla de Contenido.....	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas.....	ix
Lista de Símbolos y Abreviaturas.....	x
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes para los Proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio	3
2.1. Protocolo de Kyoto	3
2.1.1. <i>Compromisos Jurídicamente Vinculantes para los Países</i>	3
2.2. Colombia Frente a los Proyectos MDL (Potencial y Ventajas).....	4
2.3. Implementación de Mecanismos de Desarrollo Limpio en Colombia	6
2.4. Algunos Ejemplos de Proyectos Desarrollados en Colombia	9
2.4.1. <i>Proyectos existentes y en desarrollo</i>	9
2.5. Características de Algunos de los Proyectos de Rellenos Sanitarios más Exitosos Desarrollados en Colombia	10
2.5.1. <i>En el relleno sanitario la esmeralda de Manizales</i>	10
2.5.2. <i>Proyecto de aprovechamiento energético de biogás del relleno sanitario doña Juana en Bogotá D.C.</i>	10
2.6. Los Rellenos Sanitarios	11
2.7. Relleno Sanitario La Glorita.....	12
2.7.1. <i>Ubicación</i>	12
2.7.2. <i>Antecedentes</i>	13
2.7.3. <i>Cantidad de Residuos a Disponer</i>	14
3. Aspectos Teóricos Básicos	15
3.1 Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	15
3.1.1. <i>Vapor De Agua (H₂Og)</i>	15
3.1.2. <i>Dióxido De Carbono (CO₂)</i>	15
3.1.3. <i>Metano (CH₄)</i>	15
3.1.4. <i>Dióxido De Nitrógeno (NO₂)</i>	16
3.1.5. <i>Ozono Troposférico Y Estratosférico (O₃)</i>	16
3.1.6. <i>Halocarbonos</i>	16
3.1.7. <i>Clorofluorocarbonos (CFC)</i>	16
3.2. Ciclo de cualquier Proyecto MDL en Colombia	16
3.3. Principales Objetivos del Mecanismo de Desarrollo Limpio	19
3.4. Procesos Biológicos de Digestión	20
3.4.1. <i>Proceso de Digestión Aeróbica</i>	21
3.4.2. <i>Proceso de Digestión Anaeróbica</i>	21
3.5. Condiciones y Variables de las que Depende la Generación de Biogás	28
3.5.1. <i>Temperatura de Operación</i>	28
3.5.2. <i>Efectos del pH sobre la Oxidación del Metano</i>	28
3.5.3. <i>Efectos del Contenido de Humedad sobre la Oxidación del Metano</i>	29

4. Objetivos.....	30
4.1. Objetivo General.....	30
4.2. Objetivos Específicos	30
5. Metodología.....	31
5.1 Estimación del potencial energético del biogás generado en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira.....	31
5.1.1. <i>Métodos Indirectos de Estimación</i>	31
5.1.2. <i>Modelos Predictivos para la Producción de Biogás</i>	33
5.1.3. <i>Selección del Modelo a Aplicar</i>	34
5.2 Comportamiento histórico frente al desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira.....	37
5.3 Perspectivas de desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira.....	37
6. Análisis de Resultados.....	39
6.1. Estimación del potencial energético del biogás generado en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira.....	39
6.2 Comportamiento histórico frente al desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira.....	44
6.3 Perspectivas de desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira.....	45
7. Conclusiones y Recomendaciones.....	49
Bibliografía.....	51

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Portafolio de proyectos MDL en Colombia.	7
Figura 2. Vista desde el aire del relleno sanitario La Glorita.	14
Figura 3. Ciclo de aprobación de un proyecto MDL.	19
Figura 4. Balance de los procesos biológicos aeróbico y anaeróbico	21
Figura 5. Principales grupos de microorganismos anaeróbicos	22
Figura 6. Etapas de degradación anaeróbica de los RSU	27
Figura 7. Producción de los gases durante las fases de descomposición de los RSU.	27
Figura 8. Factores que determinan la generación de biogás.	28
Figura 9. Comportamiento de producción de biogás en el Relleno Sanitario “la Glorita”. ..	48

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. GEI incluidos en el Protocolo de Kyoto y su potencial de calentamiento..	20
Tabla 2. Identificación de barreras para proyectos MDL en Colombia.	20
Tabla 3. Rango de composición de biogás en un relleno sanitario.	29
Tabla 4. Índices de generación de metano k y L_0 .	36
Tabla 5. Composición del biogás. Relleno Sanitario "La Glorita".	39
Tabla 6. Composición de RSU de relleno sanitario de Pereira.	40
Tabla 7. Estimaciones frente al potencial de venta de CER según resultados de monitoreo de biogás de Relleno Sanitario "La Glorita" de Pereira.	43
Tabla 8. Estimaciones del consumo del potencial energético para la alimentación de viviendas a partir del biogás producido en el Relleno Sanitario "La Glorita" de Pereira.	47

Lista de Símbolos y Abreviaturas

<i>AND</i>	→ Autoridad Nacional Designada.
<i>ATESA</i>	→ Aseo Técnico de la Sabana SA ESP (ATESA de Occidente SA).
<i>ATP</i>	→ Adenosín Trifosfato.
<i>Br</i>	→ Bromo.
<i>C₆H₁₂O₆</i>	→ Glucosa.
<i>C₆H₅COOH</i>	→ Ácido benzoico.
<i>CARDER</i>	→ Corporación Autónoma Regional del Risaralda.
<i>CER</i>	→ Certificado de Reducción de Emisiones.
<i>CFC</i>	→ Clorofluorocarbonos.
<i>CH₃C₂H₄COOH</i>	→ Ácido burítico.
<i>CH₃CH₂COOH</i>	→ Ácido propiónico.
<i>CH₃CH₂OH</i>	→ Etanol.
<i>CH₃COOH</i>	→ Ácido acético.
<i>CH₃OH</i>	→ Metanol.
<i>CH₄</i>	→ Metano.
<i>CHO₃⁻</i>	→ Carbonato de hidrógeno.
<i>Cl</i>	→ Cloro.
<i>CO₂</i>	→ Dióxido de carbono.
<i>COV</i>	→ Compuestos Orgánicos Volátiles.
<i>e⁻</i>	→ Electrón.
<i>EPA</i>	→ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA).
<i>GEI</i>	→ Gases de Efecto Invernadero.
<i>GMCC</i>	→ Grupo de Mitigación de Cambio Climático.
<i>H⁺</i>	→ Protón.
<i>H₂</i>	→ Hidrógeno.
<i>H₂O</i>	→ Agua.
<i>H₂Og</i>	→ Vapor de Agua.
<i>HCOOH</i>	→ Ácido fórnico.
<i>HFC</i>	→ Hidrofluorocarbonos.
<i>HS⁻</i>	→ Sulfuro de hidrogeno.
<i>IPCC</i>	→ Intergovernmental Panel on Climate Change.
<i>MAVDT</i>	→ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
<i>MDL</i>	→ Mecanismos de Desarrollo Limpio.
<i>N₂O</i>	→ Óxido nitroso.
<i>NMOC</i>	→ Non-Methane Organic Compounds.
<i>Nox</i>	→ Óxido de nitrógeno.
<i>O₃</i>	→ Ozono.
<i>PFC</i>	→ Perfluorocarbonos.
<i>PMA</i>	→ Plan de Manejo Ambiental.
<i>RSU</i>	→ Residuos Sólidos Urbanos.

SF_6 → Hexafluoruro de azufre.
 SO_4^{-2} → Sulfato.
ZME → Zona de Manejo Especial.

1. Introducción

Gracias a los Gases de Efecto Invernadero (GEI) la Tierra tiene la temperatura adecuada para la supervivencia y el desarrollo de los seres vivos y plantas; nuestro planeta, se asemeja a un enorme invernadero el cual usa una fibra transparente para mantener el calor en su interior, esta fibra es una capa llamada atmosfera, la cual atrapa el calor que irradian los rayos del Sol sobre la superficie de la Tierra de la misma forma en la que la fibra de los invernaderos lo hacen.

De no ser por estos gases, el calor del Sol escaparía y la temperatura promedio de la Tierra disminuiría sustancialmente, adquiriendo una temperatura de 20°C bajo cero en lugar de los 20°C sobre cero que disfrutamos. Esto se conoce como **efecto invernadero**, y es efectuado por gases como el vapor de agua (H₂Og), el metano (CH₄), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O) y el ozono (O₃), los principales GEI presentes en la atmosfera. También hay en la atmosfera otros tipos de GEI producidos totalmente por los humanos, como son los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro (Cl) y bromo (Br), además de otros gases como el hexafloruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonados (HFC) y los perfluorocarbonados (PFC).

Todos estos gases si se conservan en una proporción adecuada cumplen su función, mantener una temperatura y un medio habitable para los diferentes ecosistemas, pero en la actualidad se está presentando problemas para mantener este balance, dado que el hombre al usar combustibles fósiles para calentar sus hogares, poner a funcionar sus carros, producir electricidad, cultivar alimentos y para los procesos de manufactura de todo tipo de bienes añade una producción sobrelimitada de GEI a la atmosfera; estas actividades humanas aumentan su concentración creando una capa demasiado densa en la atmosfera que no permite que la cantidad de calor producida por los rayos salga y se concentre todo el calor en la Tierra.

El incremento en la concentración de GEI en la atmosfera genera un desequilibrio en el balance térmico del planeta, que se traduce en el aumento en la temperatura a un ritmo cada vez mayor. Si se continúa así, la temperatura media de la superficie terrestre aumentara 0,3°C por década, lo que según los expertos, puede ocasionar grandes cambios climáticos en todas las regiones terrestres. Los científicos están de acuerdo en prever que, para el año 2020, la temperatura haya aumentado en 1,8°C. En la actualidad el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) predice un calentamiento entre 1,0 y 3,5°C para el año 2100 [1].

El tema es de vital importancia, porque no estamos hablando sólo de un aumento de la temperatura, sino de un cambio global severo que puede llegar a ser muy peligroso. Una primera consecuencia, muy posible, es el aumento de las sequías en algunos lugares, disminuirá la cantidad de lluvias, en cambio, en otros la lluvia aumentará provocando inundaciones. Pero no todo es tan malo, la causa de este calentamiento es la propia actividad humana, por lo tanto, del mismo ser humano depende detenerlo.

Una atmósfera más calurosa podría provocar que el hielo cerca de los polos se derritiera. La cantidad de agua resultante elevaría el nivel del mar. Un aumento de sólo 60 centímetros podría inundar las tierras fértiles de Bangladesh, en India, de las cuales dependen cientos de

miles de personas para obtener alimentos. Las tormentas tropicales podrían suceder con mayor frecuencia [2] [6].

Si bien todos estos GEI son naturales (salvo los compuestos del flúor), en tanto que existen en la atmósfera desde antes de la aparición del hombre, a partir de la Revolución industrial, y debido principalmente al uso intensivo de combustibles fósiles en las actividades industriales y el transporte, se han producido sensibles incrementos en las cantidades de óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono emitidas a la atmósfera. Se estima que también el metano está aumentando su presencia por razones antropogénicas (debidas a la actividad humana). Además, a este incremento de emisiones se suman otros problemas, como la deforestación, que han reducido la cantidad de dióxido de carbono retenida, contribuyendo así indirectamente al aumento antropogénico del efecto invernadero [6].

Como se mencionó anteriormente, la causa de que estos gases promotores del efecto invernadero se vean en un constante incremento se debe principalmente a tres factores: la quema de combustibles fósiles, la tala de árboles (deforestación), y el aumento de la población [2].

Realizando una evolución desde tiempos atrás hasta hoy, se observa que el crecimiento de la población mundial se ha incrementado rápidamente llevando al hombre a un consumo mayor de recursos naturales (como el agua), también a disponer de áreas naturales como bosques para abastecer la necesidad de la humanidad de expandirse, construir un lugar donde habitar, adquirir comodidades las cuales usan como abastecimiento de materia prima la naturaleza entre muchas más necesidades que están acabando con todo el medio ambiente. Gracias a este factor, uno de los recursos naturales más afectados son los árboles, por la tala de bosques, siendo éste medio es uno de las pocas fuentes importantes encargadas de absorber grandes porcentajes de CO₂, motivo por el que los bosques son conocidos como los pulmones de nuestro planeta, su proceso de absorción y transformación de gases aporta en mantener una concentración constante de estos GEI en la atmósfera y conservar de esta manera el equilibrio térmico que se está perdiendo porque la relación entre el número de árboles y la generación de gases es inversamente proporcional, por lo que nuestro planeta se calentará cada día más, gracias al incremento en la concentración de los GEI en la atmósfera.

Sumado a lo anterior hay que tener en cuenta también que el ser humano, en su afán de ir a la vanguardia del progreso industrial y desarrollo de actividades con plantas a base de carbono para producir energía, genera 2.500 millones de toneladas de CO₂ al año, el uso excesivo de automóviles produce 1.500 millones de toneladas de CO₂ al año, y todo esto es expulsado a la atmósfera. En general, el agravante de todas las actividades humanas es que han limitado la capacidad regenerativa de la atmósfera para eliminar el dióxido de carbono, principal responsable del efecto invernadero [2].

En la actualidad apenas se está adquiriendo conciencia del daño que se le está generando al planeta por la producción indiscriminada de estos gases y su expulsión a la atmósfera, esta situación aumentó el interés de todos los países en reducir emisiones de GEI; por parte de Colombia este es un tema poco explorado, por lo que el objetivo de este documento es precisamente diagnosticar el potencial y las innumerables ventajas que tiene desarrollar este tipo de proyectos MDL según el tratado de Kyoto, fortaleciendo a Colombia con su compromiso con el medio ambiente, y sus ganas de seguir a la vanguardia del progreso.

2. Antecedentes para los Proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio

2.1. Protocolo de Kyoto

Los primeros pasos para detener el fenómeno del cambio climático en la década de los 70, se debe a muchas personas que comenzaron a darse cuenta de los cambios que estaba sufriendo la Tierra. Al estudiarlos, pudieron observar cuán frágil es el medio ambiente, y lo mucho que los seres humanos dependen de él. Poco a poco, todos se dieron cuenta de que no era posible seguir contaminando el agua, la tierra y el aire, la contaminación no iba a desaparecer por sí sola. Además, muchas actividades humanas estaban afectando al clima de una manera muy peligrosa [6].

La Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, fue firmada por 155 estados en la Cumbre de Río, en 1992 y entró en vigor el 21 de marzo de 1994. Colombia aprobó la Convención mediante la Ley 164 de 1994 y es parte de ésta desde el 20 de junio de 1995. La Convención tiene como objetivo principal estabilizar las concentraciones de gases en la atmósfera a un nivel que prevenga una interferencia humana peligrosa en el clima, dentro de un periodo de tiempo que permita a los ecosistemas adaptarse para garantizar la producción de alimentos y permita que prosiga el desarrollo económico de manera sostenible [5].

En cumplimiento al Mandato de Berlín y en desarrollo del objetivo principal de la Convención, en la tercera Conferencia de las Partes, celebrada en Kyoto el 11 de diciembre de 1997, se adoptó el Protocolo de Kyoto como un tratado internacional donde parte de los países industrializados adquirieron compromisos firmes dirigidos a la reducción de los gases que causan el calentamiento global, a ejecutar un conjunto de medidas para reducir los gases de efecto invernadero o gases de efecto estufa (CO_2 , CH_4 y N_2O , además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6)), considerados según los especialistas, los causantes del calentamiento global del planeta.

El acuerdo entró en vigor el 16 de febrero de 2005, después de la ratificación por parte de Rusia el 18 de noviembre de 2004 [5].

2.1.1. Compromisos Jurídicamente Vinculantes para los Países

El Protocolo establece para los países desarrollados obligaciones cuantificadas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En su conjunto, los países desarrollados deberán reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 5%, para el período comprendido entre los años 2008 a 2012. Por ejemplo, si la contaminación de estos gases en el año 1990 alcanzaba el 100%, al término del año 2012 deberá ser al menos del 95%. Es preciso señalar que esto no significa que cada país deba reducir sus emisiones de gases regulados en un 5% como mínimo, sino que este es un porcentaje a nivel global.

Este compromiso de reducción de emisiones es diferenciado, según las condiciones particulares de cada país. Así, algunos países reducirán sus emisiones de gases de efecto invernadero mientras otros tendrán margen para aumentarlas. Por ejemplo, Estados Unidos reducirá sus emisiones en un 7%, la Unión Europea en un 8%, Japón en un 6%, mientras Australia podrá aumentar sus emisiones en un 8%. Las metas de reducción se calculan

sobre una “canasta de gases”. Para CO₂, CH₄ y N₂O el cálculo se hace respecto de la “línea de base” de las emisiones de cada país en 1990, y para HFC, PFC, SF₆ en 1995. Estas metas pueden ser alcanzadas individual o conjuntamente entre países [5].

Las actividades humanas generan emisiones de cuatro GEI de larga permanencia: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y halocarbonos (gases que contienen flúor, cloro o bromo). Cada GEI tiene una influencia térmica (forzamiento radiactivo) distinta sobre el sistema climático mundial por sus diferentes propiedades radiactivas y períodos de permanencia en la atmósfera. Tales influencias se homogenizan en una métrica común tomando como base el forzamiento radiactivo por CO₂ (emisiones de CO₂ equivalente). Homogenizados todos los valores, el CO₂ es con mucha diferencia el gas invernadero antropógeno de larga permanencia más importante, representando en 2004 el 77% de las emisiones totales de GEI antropógenos. Pero el problema no solo es la magnitud sino también las tasas de crecimiento. Entre 1970 y 2004, las emisiones anuales de CO₂ aumentaron un 80%. Además en los últimos años el incremento anual se ha disparado: en el reciente periodo 1995-2004, la tasa de crecimiento de las emisiones de CO₂eq fue de (0,92 GtCO₂-eq anuales), más del doble del periodo anterior 1970-1994 (0,43 GtCO₂eq anuales) [6].

Es preocupante el aumento de los GEI; como ya se ha mencionado anteriormente la concentración de CO₂ en la atmósfera ha pasado de un valor de 280 ppm en la época preindustrial a 379 ppm en 2005. El CH₄ en la atmósfera ha cambiado de los 715 ppm en 1750 (periodo preindustrial) hasta 1.732 ppm en 1990, alcanzando en 2005 las 1.774 ppm. La concentración mundial de N₂O en la atmósfera pasó de 270 ppm en 1750 a 319 ppm en 2005. Los halocarbonos prácticamente no existían en la época preindustrial y las concentraciones actuales se deben a la actividad humana [4] [6].

El objetivo principal es disminuir el cambio climático antropogénico cuya base es el efecto invernadero. Según las cifras de la ONU, se prevé que la temperatura media de la superficie del planeta aumente entre 1.4 y 5.8°C de aquí al 2100, a pesar que los inviernos son más fríos y violentos este fenómeno se conoce como Calentamiento global [6].

2.2. Colombia Frente a los Proyectos MDL (Potencial y Ventajas)

Colombia tiene bajas emisiones de gases de efecto invernadero, por parte de rellenos sanitarios se estima que entre 9% y 15%, adicionalmente posee un alto potencial para la reducción de estas emisiones a un bajo costo, y la captación y fijación de CO₂. Con estas condiciones el “Mecanismo de Desarrollo Limpio” representa para el país, una excelente oportunidad para acceder a la transferencia de tecnologías ambientalmente sostenibles y recursos financieros. Colombia posee la capacidad para entrar en el mercado de oferta y demanda de Certificados de Reducción de Emisiones de gases de efecto invernadero, vendiendo los certificados de reducciones logradas a través de la ejecución de proyectos MDL.

Estamos a las puertas de un mercado internacional de inversión de considerable magnitud dentro del cual Colombia posee una gran ventaja dada por su riqueza en recursos naturales. El país podrá lograr beneficios generados por el daño causado a la atmósfera y al sistema climático por los países desarrollados [5].

Una de las entidades encargadas en Colombia de apoyar los proyectos MDL es el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). Es un ente regulador que determina normas y directrices en materia de ambiente, vivienda, desarrollo, agua potable, por medio de estrategias que involucran el desarrollo sostenible, dentro del cual se encuentra el Grupo de Mitigación de Cambio Climático (El GMCC es creado en el 2005 en virtud de la Resolución Ministerial del MAVDT No. 0340 del 11 de marzo del mismo año). Este grupo se encarga de promover y genera actividades dentro de las cuales participa en eventos sectoriales o de gremios presentes cuando son temas netamente ambientales, además de la financiación de proyectos ambientales y de la industria.

El GMCC promueve actividades de mitigación del cambio climático mediante proyectos de reducción y captura de GEI de alta calidad que consolide al país en el mercado mundial del carbono. Además este grupo brinda asesoría sobre este tema de forma muy específica gracias a que cuenta con profesionales para que en conjunto con el grupo de mitigación del ministerio, desarrollen herramientas y capacitaciones para la evaluación y aprobación de proyectos, identificación y desarrollo de un portafolio de alta calidad, y diseño y implementación de estrategias de mercado de proyectos nacionales para el mercado internacional [12].

Debido a la evolución del MAVDT a nivel institucional, desde el 2006 han existido consultores capacitados en el tema MDL. En la actualidad, el GMCC se ha fortalecido mucho, teniendo un asesor para los temas energéticos exclusivamente, otro asesor para el tratamiento de aguas, otro asesor para el tratamiento de plantas y agua residuales, también para el sector industrial, otro asesor para el temas del transporte, sin dejar de mencionar al encargado de residuos sólidos y el de agricultura y sistemas forestales. Este es un gran paso que se ha dado en Colombia porque se tiene cubiertos todos los sectores.

Como grupo de cambio climático, éste genera conexiones directas con inversionistas internacionales, los desarrolladores de proyectos y compradores de certificados; se les muestra el portafolio de proyectos al cliente, este escoge el que se acomode a su necesidad y luego el grupo le ayuda en la fase de la negociación [12].

Los proyectos de reducción y captura de GEI debe pasar por una serie de etapas, una de ellas es la formulación, aquí se hace una evaluación previa y se estudia que tan viable es el proyecto una vez que se considera que es factible, se trae a todos los consultores MDL, inversionistas y demás agentes para que apoyen el proyecto y de ahí en adelante el consultor MDL que se asocia con este proyecto

El avance que Colombia ha tenido frente a la formulación de proyectos de reducción y captura de GEI es notorio. Se tiene a la fecha en el país 23 proyectos registrados en las Naciones Unidas a comparación con el 2006 que había cerca de 10 proyectos. En la actualidad se encuentran aprobados a nivel nacional 54 proyectos que son evaluados previamente para evaluar si en realidad cada uno de ellos contribuye con el desarrollo sostenible del país. De los 54 proyectos aprobados, 39 son del sector energético, además de un portafolio que toca temas como los rellenos sanitarios y temas industriales [12].

Colombia en el contexto internacional también presenta una evolución bastante notoria ya que el MAVDT sólo tenía 14 proyectos registrados en el año 2006 y al año 2010 son 23, lo que ubica a Colombia en el cuarto lugar a nivel latinoamericano, con Brasil y México en el primer y segundo lugar, respectivamente. Sin embargo, en el número de proyectos no es

posible establecer una comparación, porque estos países tienen un mayor potencial, aún así el país está bien posicionado en la región [12].

En el ámbito nacional, Colombia posee una serie de beneficios al desarrollar estos proyectos, el primero y más importante es la reducción de GEI, una problemática mundial que no discrimina entre países desarrollados y subdesarrollados. Colombia es un país altamente vulnerable al cambio climático, hay lluvias más intensas y otras más frecuentes, además del aumento del nivel del mar, estos son factores que se pueden disminuir en un porcentaje significativo y aportar al problema global en general.

Otro beneficio importante es la captación para las empresas ofrecidas por expertos internacionales, sobre nuevas formas de producir y hacer más eficiente el trabajo por medio de equipos y de tecnologías de punta que no alteran el medio ambiente.

El ahorro energético también es clave para combatir la deficiencia energética, también el tema que involucra rellenos sanitarios, trae beneficios como el uso adecuado de los rellenos para que se haga de una manera más adecuada. En lo que tiene que ver con energía renovable, dejar de quemar combustible trae beneficios en términos de la calidad del aire, Adicional a los beneficios en la salud de la población, inversiones en el tema social como puestos de salud en zonas alejadas de las ciudades principales y ayuda a las familias de las zonas en donde se lleva a cabo el proyecto, para iniciar empresas o microempresas [12].

Un ejemplo de que Colombia si puede realizar proyectos a pequeña y gran escala con el apoyo y supervisión del MAVDT, se destaca el relleno Sanitario de Doña Juana, es el que presenta mayor reducción de GEI anualmente (800 mil toneladas de CO₂), y es el más grande en Colombia.

Los proyectos pequeños también son importantes porque demuestran que pueden pasar por cada una de las fases MDL como por ejemplo el de EMCALI, que utiliza el CH₄ que sale de las plantas de tratamiento de aguas residuales y lo utiliza para generar electricidad, es un proyecto pequeño con 2 mil toneladas de reducción de CO₂ al año, pero esto nos permite ver como las empresas de servicios públicos se involucran con el tema.

Además, el desarrollo de estos proyectos es muy importante porque contribuyen al desarrollo sostenible, el cual es importante porque los proyectos además de que recuperan el medio ambiente, también contribuyen socialmente con la generación de empleo en zonas deprimidas mediante el uso de tecnologías de punta.

Por ejemplo, Jepirachi es un proyecto con una larga trayectoria, pues trajo tecnología que aún en Colombia no se había implementado, todo el tema de captura de biogás es innovador en los rellenos sanitarios, entre otros. Así que el análisis no solo se hace por toneladas de CO₂, lo que beneficia al país, sino también los cobeneficios que vienen con los proyectos [12].

2.3. Implementación de Mecanismos de Desarrollo Limpio en Colombia

La estimación de la producción de emisiones contaminantes, en particular del biogás de rellenos sanitarios, plantea una expectativa ambiental y económica muy importante, que obliga a tener una aproximación, bien sea del impacto ambiental que generan, y/o del

potencial técnico-económico que permita su valoración, mediante su recolección y utilización energética.



Figura 1. Portafolio de proyectos MDL en Colombia. Fuente: [20].

El comportamiento de la generación de biogás a partir de cada RSU y estimado por la simulación de los modelos en función del tiempo de disposición, representa el uso potencial para aplicaciones energéticas, lo que amplía la oferta de la canasta y acopia experiencia y desarrollo tecnológico sobre el uso de energías no convencionales [2].

Entre los beneficios de los proyectos de recuperación energética de biogás de los rellenos Sanitarios, están:

- reduciendo de los riesgos de incumplimiento de la normatividad ambiental
- ingreso por venta del energético o de la energía recuperada
- reducción del riesgo de incendio,
- reducción de las emisiones de gases de efecto
- reemplazo de energéticos convencionales.
- El beneficio global se centra en la eliminación de una fuente importante de calentamiento de la biosfera.

Las consideraciones que se deben estudiar para la implementación de un proyecto de captación y/o uso de biogás de rellenos sanitarios, están asociadas con la cadena productiva de la generación de RSU. En este sentido, deben evaluarse cuidadosamente todos los componentes tecnológicos -que van desde los entornos geográficos para la ubicación del relleno hasta la idiosincrasia de producción y consumo de bienes y servicios- para que se

constituyan en un soporte sólido que sirva como insumo para el diseño de la ingeniería de proceso y la ingeniería de detalle de los proyectos. Esta dinámica ha generado una oferta tecnológica en continuo desarrollo, con particularidades y limitaciones según cada contexto. Es así como se han desarrollado experiencias exitosas, entre las cuales se pueden mencionar las de países como Estados Unidos, México, Chile, Italia, Holanda, España y los países Nórdicos.

El resultado de las simulaciones de generación de biogás permite estimar las opciones sobre el potencial de generación de energía térmica y/o eléctrica y sobre la estructuración de proyectos MDL, según el contexto de cada relleno, asociado con la complejidad de los rellenos sanitarios y de las condiciones medioambientales.

Se prevé que el desarrollo de la ingeniería básica de proceso y la ingeniería de detalle, están articuladas con la ampliación de un desarrollo tecnológico -y el potencial de su apropiación- muy significativo, para lo cual este estudio aporta la secuencia metodológica piloto aplicable a Colombia, con base en la información primaria disponible en las diversas instituciones oficiales, además del análisis de criterios técnicos aplicables para el logro de una primera aproximación a la estimación de la generación de biogás de rellenos sanitarios.

Este documento utiliza una propuesta metodológica producto del análisis de la información disponible conceptual y de trabajos desarrollados y en vía de desarrollo, así como de varios ejemplos de proyectos de recuperación y uso del biogás- que contextualiza y proyecta su aplicación en Colombia, mediante la utilización un modelo predictivo de estimación de generación de biogás.

El ejercicio de simulación se sustenta en las bases de datos existentes relacionadas con la producción de biogás de rellenos sanitario la glorieta aportados por la empresa de Aseo de Pereira y ATESA y establece la información requerida para su uso en modelos.

En este estudio se determina el aprovechamiento del biogás producido en el sitio de disposición final (relleno sanitario) bajo los mecanismos establecidos en el Protocolo de Kyoto con el objeto de visionar ingresos económicos, análisis de criterios técnicos aplicables para el logro de una primera aproximación a la estimación de la generación de biogás de rellenos sanitarios, el mejoramiento ambiental y sanitario Pereira.

En la actualidad el mundo enfrenta un incremento en la temperatura, parte de este problema se debe a la acumulación en la atmosfera de GEI, de los cuales una parte importante es generada en rellenos sanitarios. En Colombia, al igual que el resto de América Latina, la fracción orgánica se constituye en el principal componente de los Residuos Sólidos Urbanos, lo anterior asociado a la disposición final en rellenos sanitarios, implica la generación de gas metano, como consecuencia de las reacciones anaeróbicas presentadas. El gas metano es considerado uno de los GEI de mayor importancia en el Protocolo de Kyoto.

Dentro de las alternativas planteadas en el protocolo de Kyoto, para la reducción de emisiones de GEI, surge la alternativa para países como Colombia de desarrollar proyectos MDL.

Colombia es uno de los países que presenta baja participación en este tipo de proyectos debido a factores necesarios de identificar, y buscar soluciones para tratar de cambiar esta realidad.

2.4. Algunos Ejemplos de Proyectos Desarrollados en Colombia

A enero de 2009 se contabilizan 58 rellenos sanitarios regionales, 14 más que en el año 2008 en 23 departamentos (Antioquia, Atlántico, Bolívar, Boyacá, Caldas, Caquetá, Casanare, Cauca, Cesar, Córdoba, Cundinamarca, Guaviare, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander, Sucre, Tolima y Valle) donde se dispone un total de 23.087 toneladas día provenientes de 486 municipios, es decir el 72% del total de los municipios que disponen en relleno sanitario [11].

2.4.1. Proyectos existentes y en desarrollo

- **Relleno Sanitario “La Esmeralda”**
 - Captura y aprovechamiento de biogás
 - Combustible Horno incinerador e iluminación
 - Manizales – Caldas
 - Potencial promedio de producción de biogás 12'094.394 m³/año (91.027 tCO₂eq / año)
 - Empresa Metropolitana de Aseo S.A. E.S.P

- **Relleno Sanitario “Guayabal”**
 - Captura y aprovechamiento de biogás
 - Generación de calor y electricidad
 - Cúcuta – Norte de Santander
 - Potencial promedio de producción de biogás 13'403.882 m³/año (100.883 tCO₂eq / año)
 - Aseo Urbano S.A. E.S.P

- **Relleno Sanitario “El Carrasco”**
 - Captura y aprovechamiento de biogás
 - Generación de calor para uso interno
 - Bucaramanga – Santander
 - Potencial promedio de producción de biogás 7'764.985 m³/año (58.442 tCO₂eq / año)
 - Empresa de Aseo de Bucaramanga S.A. E.S.P

- **Relleno Sanitario “La Glorita”**
 - Captura y aprovechamiento de biogás
 - Generación de electricidad
 - Pereira - Risaralda
 - Potencial promedio de producción de biogás 3'612.494 m³/año (27.189 tCO₂eq / año)
 - Empresa de Aseo de Pereira S.A. E.S.P

- **Relleno Sanitario “El Combeima”**
 - Captura y aprovechamiento de biogás
 - Generación de electricidad

- Pereira - Risaralda
- Potencial promedio de producción de biogás 4'813.915 m³/año (36.231 tCO₂eq / año)
- Empresa de Aseo de Pereira S.A. E.S.P [20].

2.5. Características de Algunos de los Proyectos de Rellenos Sanitarios más Exitosos Desarrollados en Colombia

2.5.1. En el relleno sanitario la esmeralda de Manizales

Este complejo de tratamiento de basuras, es una clara muestra, que en Colombia se pueden hacer las cosas bien y en beneficio del medio ambiente, creando entornos favorables para la salud pública sobre la base del manejo inteligente de los desechos tóxicos” La Esmeralda, cuenta con un relleno sanitario y un sistema de incineración de residuos biomédicos, así como con un laboratorio de análisis de agua certificado por el IDEAM.

El proyecto consistirá de la instalación de un sistema de colección de biogás para extraer el biogás y ser utilizado como combustible en generadores de combustión interna en una planta de energía. Los ingresos del proyecto serán creados por las ventas de la energía (exportándola a la red eléctrica) y de la venta de Reducciones Certificadas de Emisiones (CER) de gases invernadero. CER son generados por la combustión de metano, que compone un 50% del biogás. Metano tiene un potencial de calentamiento global 21 veces mayor que el dióxido de carbono.

La apertura del relleno sanitario fue en 1991 y es anticipado que la clausura sea en el 2015 con una capacidad total de aproximadamente 2.8 millones de toneladas de residuos sólidos de 19 municipios. El relleno sanitario cuenta con una extensión de 54 hectáreas con posibilidad de ampliación de su vida útil hasta el 2035 y incrementaría la capacidad total de 6,1 millones.

El relleno comenzó a recibir residuos en 1991. Hasta la fecha, aproximadamente 1,25 millones de toneladas de residuos han sido aceptados. El relleno tiene un capacidad total de aproximadamente 2,84 millones de toneladas. Actualmente, el relleno sanitario acepta cerca de 400 toneladas diariamente. Considerando un aumento anual de 1,0% en la disposición, el relleno sanitario alcanzará su máxima capacidad en 2015.

Asumiendo que el sistema de colección y combustión comience su funcionamiento en el 2006, se estima que el desarrollo de un proyecto de colección y utilización de biogás en el relleno sanitario podría resultar en aproximadamente 455.005 toneladas de reducción de emisiones de CO₂eq para el periodo del 2006 al 2012 y de 874.399 toneladas de reducción de emisiones de CO₂eq para el periodo del 2006 al 2019.

Los resultados del análisis económico indican que la factibilidad del proyecto bajo la mayoría de los escenarios evaluados es suficientemente favorable para atraer inversionistas/desarrolladores de proyectos si el precio de los CER es igual o mayor a \$5 por tonelada [19].

2.5.2. Proyecto de aprovechamiento energético de biogás del relleno sanitario doña Juana en Bogotá D.C.

El proyecto ubicado en el Distrito Capital de Colombia, Bogotá, implica la captación de biogás, combustión, uso de motores alternativos en el emplazamiento del relleno sanitario de Doña Juana, y el uso para la producción de energía térmica en las industrias cercanas.

El proyecto tiene como propósito disminuir las emisiones de GEI a través de la recuperación y quema del gas de relleno sanitario de Doña Juana, en Colombia. El proyecto contempla otras actividades como el aprovechamiento energético y térmico del biogás que también reducirán las emisiones de GEI.

Reducciones anuales: 827.384 tCO₂eq/año

Reducciones totales durante el período de acreditación: 5.971.686 tCO₂eq (7 años -de 2009 a 2016-, con la opción de renovarse como máximo 2 veces, duración máxima 21 años).

Reducciones totales hasta 2012: 2.645.931 tCO₂
Desarrollo del modelo a utilizar Modelo EPA [20].

2.6. Los Rellenos Sanitarios

Uno de los puntos importantes que aportan los GEI y sobre los cuales existe un especial interés en hacer énfasis del desarrollo de proyectos MDL, son los mencionados rellenos sanitarios.

Los rellenos sanitarios surgieron como solución a los problemas de las basuras, los cuales, hasta el momento, son el método más económico y ambientalmente más aceptable para la evacuación de los RSU en el mundo. Pero aunque los rellenos son proyectos necesarios, no son tan económicos, y realmente es una solución costosa ecológicamente. Sin embargo, la posibilidad de aprovechar al máximo el biogás generado, convierte este tipo de proyectos en algo atractivo.

Esta tendencia se viene implementando en muchos países en el mundo desde hace años, con el fin de mitigar los costos asociados, generar una fuente de ingresos adicional y disminuir las emisiones de gases contaminantes.

Según el Banco Mundial, en Norteamérica y Europa existen cerca de 1.115 plantas de energía, cuyo combustible es el biogás de rellenos sanitarios; y cada año más plantas entran en funcionamiento. El generador eléctrico, con base en la combustión interna, es la tecnología más utilizada en rellenos sanitarios para la recuperación energética del biogás. Aproximadamente el 80% de los proyectos de energía de biogás de rellenos sanitarios, que están actualmente operando en los Estados Unidos, los usan. Este tipo de máquinas son eficientes y más baratos que otras alternativas.

Colombia es un país que tiene aproximadamente 41 millones de habitantes y produce diariamente en sus centros urbanos 26.000 toneladas de desperdicios, de los cuales cerca del 20% corresponde a Bogotá, 10% a Medellín, 8% a Cali y 6% a Barranquilla. En promedio cada colombiano genera entre 0,5 y 0,65 kilogramos de residuos al día. Esto representa un problema debido a que en Colombia los rellenos sanitarios son la técnica menos utilizada, de los 1.092 municipios del país, sólo 350 disponen los residuos sólidos en rellenos sanitarios, muchos de los cuales son del tipo regional. 42 municipios disponen de sistemas de enterramiento (rellenos sanitarios no tecnificados), 565 en vertederos tipo

botaderos y quemas a cielo abierto, 32 disponen de sus basuras en cuerpos de agua, 5 utilizan sistemas de incineración y 44 aprovechan otros sistemas como el compostaje o plantas integrales.

En general el manejo de las basuras en Colombia es deficiente y no hay una verdadera cultura de la disposición de los residuos sólidos, y a diferencia de otros países, en Colombia no hay un aprovechamiento significativo del biogás que se produce de estos sitios, no solo para mitigar los problemas de medio ambiente sino también para contribuir con el desarrollo del país [14].

Actualmente Colombia está implementando el uso de rellenos sanitarios, técnica que utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área destinada para este fin, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, evita muchos problemas ambientales pero no del todo, pues igual se liberan líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica. aún con todos estos cuidados, en un relleno son fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos, como materiales biológicos, gases y otros productos de degradación de desechos orgánicos, constituyendo una importante fuente antropogénica de generación de gases invernadero, representada por el biogás producto de la descomposición biológica de la materia orgánica.

Por la presencia de la materia orgánica, el biogás está compuesto por metano, dióxido de carbono y trazas de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), estos últimos compuestos son potencialmente perjudiciales para la calidad del aire y la salud, y su producción varía dependiendo de la antigüedad del sitio de disposición, por el avance de los procesos de estabilización de los residuos, y de las condiciones ambientales en las que se efectúan [13].

El proceso de descomposición de residuos orgánicos resulta complejo y ocurre en diversas etapas de acuerdo con las condiciones del medio, determinadas por la temperatura, la humedad, la presencia de oxígeno, las características del residuo y la edad del relleno sanitario, principalmente.

2.7. Relleno Sanitario La Glorita

2.7.1. Ubicación

El relleno sanitario “La Glorita” se encuentra ubicado en la vereda La Suecia Corregimiento de Combia Baja, en zona rural al noroccidente de la ciudad de Pereira, aproximadamente a 13 km. de su casco urbano. Al sitio se accede a través de una vía pavimentada en buen estado.

El relleno se encuentra ubicado en la Zona de Manejo Especial (ZME) para las actividades asociadas al manejo integral de residuos sólidos, la cual fue definida en el Plan de Ordenamiento Territorial de Pereira (Acuerdo 23 de 2006 del Concejo Municipal de Pereira) en el artículo 113, de la siguiente manera:

“...Artículo 113: El Municipio de Pereira Reservó un área de suelo de 326,7 Hectáreas, localizada en la vertiente norte del río Otún, en el sector noroccidental del Municipio de Pereira, Corregimiento de Combia Baja, para el manejo y la disposición final de residuos sólidos, coherente con los estudios. La zona corresponde a un corredor asociado a la vía al

actual relleno sanitario “La Glorita”, que se constituye en el eje longitudinal de la zona...”

“...Parágrafo: El área receptora para actividades asociadas al manejo integral de residuos sólidos es aferente al actual relleno sanitario “La Glorita” y se ha denominado Zona de Manejo Especial (ZME) que identificamos en el plano No.7G y que forma parte del presente acuerdo...”

2.7.2. Antecedentes

El primer Plan de Manejo Ambiental (PMA) del relleno sanitario “La Glorita” fue aprobado por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) en el año 2.000 mediante Resolución 216. Para entonces el marco legal asociado a la disposición final de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Colombia era menos especializado que en la actualidad, pues no existían normas como el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS – 2.000), el Decreto 1713 de 2002 y el Decreto 838 de 2005, entre otros. Por otra parte el Decreto 1594 de 1984 no aplicaba para el manejo de lixiviados en sitios de disposición final, ya que éstos no se consideraban una descarga puntual industrial. Frente a la necesidad de licencia ambiental, aunque el Decreto 1220 de 2005 establece la necesidad de diligenciar licencia ambiental para la actividad de disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios, dicha norma fue expedida después del inicio de operaciones del relleno sanitario “La Glorita”.

Como consecuencia de aplicación del artículo 13 de la Resolución 1045 de 2003, ratificada a través de la Resolución 1390 de 2005, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, ordenó el cierre de todos los sitios que no cumplieran con las normas de disposición final, consolidando al relleno sanitario “La Glorita” como relleno sanitario regional. Lo anterior evidenció la necesidad de ampliar su capacidad y darle continuidad a la disposición final en este sitio, ya que el traslado de los residuos a otras partes del país incrementaría considerablemente la tarifa del servicio público de aseo.

Como respuesta al inminente cumplimiento de la vida útil del relleno sanitario, y ante la necesidad de adquirir terrenos aledaños que permitieran continuar con la actividad de disposición final, la Empresa de Aseo de Pereira S.A E.S.P adquirió el predio “Guamacaro”, obteniendo el certificado de uso conforme del suelo y el concepto de viabilidad ambiental por parte de la Aeronáutica Civil. Posteriormente solicitó a la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) la modificación del PMA mediante el documento *“DISEÑO, ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL Y PLAN DE MANEJO PARA EL RELLENO SANITARIO “LA GLORITA”, MUNICIPIO DE PEREIRA”* del año 2005.

Teniendo en cuenta el cambio de prestador del servicio público de aseo en la ciudad de Pereira en el año 2007, la empresa ATESA de Occidente S.A E.S.P, inició labores de operación en el relleno sanitario “La Glorita”, incluidos los diseños, construcción y operación de las nuevas zonas, garantizando de esta manera la continuidad del componente de disposición final en este relleno regional.

En vista de la dinámica anteriormente expuesta se hace necesaria la actualización del Plan de Manejo Ambiental del relleno sanitario “La Glorita”, como herramienta de gestión ante actividades de planificación, operación, clausura y seguimiento.



Figura 2. Vista desde el aire del relleno sanitario La Glorita.

2.7.3. Cantidad de Residuos a Disponer

El promedio de disposición final estimado en el relleno sanitario “La Glorita”, para el año 2010 es de 752 toneladas diarias [26]. Los usuarios que actualmente hacen uso del relleno sanitario son los siguientes:

- Municipio de Pereira.
- E.S.P. de Apia.
- Municipio de Balboa.
- E.S.P. de Belén de Umbria.
- E.S.P. Guatica.
- Municipio de La Celia.
- Municipio de La Virginia.
- Municipio de Obando.
- Municipio de Dosquebradas.
- E.S.P. de Pueblo Rico.
- E.S.P. de Santa Rosa de Cabal.
- E.S.P. de Santuario.
- E.S.P. de Marsella.
- Cartagueña de Aseo Total E.S.P.
- Municipio de Belalcazar.
- Cooperativa de Ansermanuevo.
- Municipio de Viterbo.
- Municipio de Ulloa.
- Municipio de San José.

Según proyecciones basadas en registros históricos, se calcula un incremento anual en la generación de residuos del 2% [26].

3. Aspectos Teóricos Básicos

3.1 Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Para un mejor conocimiento del aporte que realiza cada uno de los GEI en el calentamiento global, se hace una descripción de los más importantes, como se presentan en [6].

3.1.1. Vapor De Agua (H_2O_g)

El vapor de agua es un gas que se obtiene por evaporación o ebullición del agua líquida o por sublimación del hielo. Es el que más contribuye al efecto invernadero debido a la absorción de los rayos infrarrojos. Es inodoro e incoloro y, a pesar de lo que pueda parecer, las nubes o el vaho blanco de una cacerola o un congelador, comúnmente llamado "vapor", no son vapor de agua sino el resultado de minúsculas gotas de agua líquida o cristales de hielo.

3.1.2. Dióxido De Carbono (CO_2)

La principal fuente de emisión de dióxido de carbono a la atmósfera es la quema de combustibles fósiles y biomasa (gas natural, petróleo, combustibles, leña) en procesos industriales, transporte, y actividades domiciliarias (cocina y calefacción). Los incendios forestales y de pastizales constituyen también una fuente importante de CO_2 atmosférico. La concentración del CO_2 atmosférico subió desde 280 ppm en el periodo 1000 - 1750, a 368 ppm en el año 2000, lo que representa un incremento porcentual de 31%. Se estima que la concentración actual es mayor a la ocurrida durante cualquier periodo en los últimos 420 miles de años, y es muy probable que sea el máximo de los últimos 20 millones de años. Eventualmente todo el carbono transferido desde la atmósfera a la biosfera es devuelto a ella en la forma de CO_2 que se libera en procesos de descomposición de la materia vegetal muerta o en la combustión asociada a incendios de origen natural o antrópico. Se estima que entre 1990 y 1999 el hombre emitió a la atmósfera un promedio de 1.000 millones de toneladas.

3.1.3. Metano (CH_4)

En el metano cada uno de los átomos de hidrógeno está unido al carbono por medio de un enlace covalente. Es una sustancia no polar que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias. Es incoloro e inodoro y apenas soluble en agua en su fase líquida. La principal fuente natural de producción de CH_4 son los pantanos. El metano se produce también en la descomposición anaeróbica de la basura en los rellenos sanitarios, en el cultivo de arroz, en la descomposición de fecas de animales, en la producción y distribución de gas y combustibles, y en la combustión incompleta de combustibles fósiles. Constituye hasta el 97% del gas natural. En las minas de carbón se le llama *grisú* y es muy peligroso ya que es fácilmente inflamable y explosivo.

El metano es un gas de efecto invernadero relativamente potente que podría contribuir al calentamiento global del planeta Tierra ya que tiene un potencial de calentamiento global de 21, pero que su concentración es muy baja. Esto significa que en una media de tiempo de 100 años cada kg de CH_4 calienta la Tierra 21 veces más que la misma masa de CO_2 , sin embargo hay aproximadamente 220 veces más dióxido de carbono en la atmósfera que

metano, por lo que este contribuye de manera menos importante al efecto invernadero. Se estima que su concentración aumentó entre 700 ppb en el periodo 1000 - 1750 y 1.750 ppb en el año 2000, con un aumento porcentual del 151%

3.1.4. Dióxido De Nitrógeno (NO₂)

El aumento del NO₂ en la atmósfera se deriva parcialmente del uso creciente de fertilizantes nitrogenados. El NO₂ también aparece como sub-producto de la quema de combustibles fósiles y biomasa, y asociado a diversas actividades industriales (producción de nylon, producción de ácido nítrico y emisiones vehiculares). Un 60% de la emisión de origen antropogénico se concentra en el Hemisferio Norte. Se estima que la concentración de NO₂ atmosférico creció entre 270 ppb en el periodo 1000 - 1750, a 316 ppb en el año 2000.

3.1.5. Ozono Troposférico Y Estratosférico (O₃)

El ozono troposférico se genera en procesos naturales y en reacciones fotoquímicas que involucran gases derivados de la actividad humana. Su incremento se estima en un 35% entre el año 1750 y el 2000. El ozono estratosférico es de origen natural y tiene su máxima concentración entre 20 y 25 km de altura sobre el nivel del mar. En ese nivel cumple un importante rol al absorber gran parte de la componente ultravioleta de la radiación solar. Se ha determinado que compuestos gaseosos artificiales que contienen cloro o bromo han contribuido a disminuir la concentración del ozono en esta capa, particularmente alrededor del Polo Sur durante la primavera del Hemisferio sur.

3.1.6. Halocarbonos

Los halocarbonos son compuestos gaseosos que contienen carbono y algunos elementos como cloro, bromo o flúor. Estos gases, que fueron creados para aplicaciones industriales específicas, han experimentado un significativo aumento de su concentración en la atmósfera durante los últimos 50 años. Una vez liberados, algunos de ellos son muy activos como agentes intensificadores del efecto invernadero planetario. Como resultado de la larga vida media de la mayoría de ellos, las emisiones que se han producido en los últimos 20 o 30 años continuarán teniendo un impacto por mucho tiempo.

3.1.7. Clorofluorocarbonos (CFC)

El clorofluorocarburo, clorofluorocarbono o clorofluorocarbonados, es cada uno de los derivados de los hidrocarburos saturados obtenidos mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de flúor y/o cloro principalmente. Debido a su alta estabilidad fisicoquímica y su nula toxicidad, han sido muy usados como líquidos refrigerantes, agentes extintores y repelentes para aerosoles. Fueron introducidos a principios de la década de 1930 por ingenieros de General Motors, para sustituir materiales peligrosos como el dióxido de azufre y el amoníaco.

3.2. Ciclo de cualquier Proyecto MDL en Colombia

Según se presenta en [1], en una información suministrada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), se establecen las etapas necesarias y requerimientos para la elaboración de un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio.

Etapas 1 – Planeación y desarrollo del proyecto - Inicia con la identificación del proyecto, análisis elegibilidad y evaluación preliminar potencial de reducción o captura. El resultado será un plan de desarrollo que utiliza una metodología aprobada por la Junta Ejecutiva.

La formulación de un proyecto MDL debe cumplir con los requisitos establecidos por las instancias internacionales y por la autoridad nacional designada del MDL. Las instancias internacionales se refieren a la conferencia de las partes de la convención de la conferencia Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y la Junta Ejecutiva del proyecto MDL.

Para efectos del trámite de proyecto, el responsable debe diligenciar el formato oficial de proyectos MDL o documentos del proyecto. Los elementos fundamentales que debe contener la formulación de un proyecto son los siguientes:

- Descripción general del proyecto: El promotor del proyecto debe proveer información básica sobre el mismo, como son la determinación de las actividades a ser desarrolladas, descripción de la tecnología a ser empleada, participantes, localización y explicación de la manera como el proyecto reduce o captura GEI.
- Elaboración y cálculo de la línea base: La línea base constituye el escenario hipotético más probable que representa lo que hubiera ocurrido si el proyecto del MDL no se llevara a cabo. En términos generales, establece el nivel de emisiones y captura de GEI que tendría lugar si no se ejecutan las actividades propuestas por el proyecto. La línea base debe constituirse de manera específica para cada proyecto, siguiendo algunas de las metodologías aprobadas por la Junta Ejecutiva del MDL.
- Selección del periodo de acreditación: Los proyectos del MDL deben elegir la duración del periodo de tiempo durante el cual solicitaran la certificación de las reducciones o captura de GEI. Para los proyecto de reducción de emisiones por fuentes, los promotores deben elegir entre un periodo de hasta diez años o un periodo de hasta siete años, renovable en dos oportunidades.
- Elaboración del plan de monitoreo: El responsable del proyecto debe definir un plan de monitoreo que permita la estimación o medición de las emisiones de GEI atribuidos al proyecto, así como la recopilación de información necesaria para determinar la línea base.

El plan debe diseñarse siguiendo algunas de las metodologías aprobado por la Junta Ejecutiva de MDL y ejecutarse de conformidad durante todo el periodo de acreditación.

Etapas 2 – Aprobación Nacional del proyecto por la Autoridad Nacional Designada - Comprobando que éste contribuye al desarrollo sostenible del país, el resultado será una carta de aprobación nacional. (Proceso reglamentado en la resolución 453/2004 y 454 de 2004 del MAVDT).

Etapas 3 – Validación – El propósito de esta etapa es establecer su conformidad con los requisitos y procedimientos del MDL. La validación de la entidad operacional designada consiste en la revisión de los elementos de la formulación del proyecto, tal como se presenta en el documento del proyecto. Entre los elementos se encuentra la construcción de

la línea base, el diseño del plan de monitoreo, el trámite de los comentarios de los interesados y el análisis de los impactos ambientales. Igualmente, la entidad operacional, designada constará que el proyecto ha sido aprobado por la autoridad nacional y confirmará el carácter adicional de las actividades del proyecto, es decir que las reducciones de emisiones de GEI son superiores a las que tendrían lugar de no llevarse a cabo el proyecto.

Etapas 4 – Registro – El registro constituye la aceptación oficial del proyecto por la Junta Ejecutiva del MDL. El reporte de la validación debe contener el documento del proyecto, la explicación del trámite dado a los comentarios de los interesados durante los periodos de consulta al que tuvo que someterse el proyecto y las cartas de las autoridades nacionales designadas de cada uno de los países participantes, manifestando la participación voluntaria en el proyecto y confirmando la contribución del desarrollo sostenible del país donde se desarrollarán las actividades del proyecto. El registro se considera definitivo, de no existir objeción de algunas de las partes en el proyecto o de al menos tres de los diez miembros de la Junta Ejecutiva.

Etapas 5 – Monitoreo – El monitoreo o vigilancia consiste en la puesta en marcha del plan de seguimiento propuesto en el documento del proyecto. Durante el periodo de acreditación, el responsable del proyecto debe obtener y registrar permanentemente la información pertinente para determinar las reducciones de GEI que el proyecto da a lugar durante su ejecución. El plan debe proveer los procedimientos para recopilar los datos que permitan determinar la línea base y medir las emisiones de las fuentes correspondientes al proyecto y sus fugas. La ejecución del plan de monitoreo debe registrar y documentar la información mencionada y aplicar las medidas relevantes para asegurar la calidad del procedimiento.

Etapas 6 – Verificación – La verificación consiste en la revisión de los cálculos y procedimientos realizados por el responsable del proyecto durante el monitoreo para cuantificar las reducciones de GEI. Dicha revisión es realizada por una entidad operacional que puede o no ser la misma que efectuó con anterioridad la validación del proyecto. La entidad operacional comprueba que el procedimiento seguido por el responsable del proyecto se ajusta a lo establecido en el protocolo de monitoreo consignado en el documento del proyecto. Durante el proceso de verificación corrobora la información suministrada efectuando las inspecciones pertinentes y acudiendo a fuentes adicionales. Con base en los resultados de la verificación, la entidad operacional designada elabora un informe de verificación quien remite a la Junta Ejecutiva de MDL, a las partes interesadas y los participantes del proyecto. Finalmente, procede a expedir una certificación de las reducciones o capturas de GEI resultantes de las actividades del proyecto.

Etapas 7 – Expedición de las reducciones certificadas de las reducciones – La entidad operacional remite el informe de certificados de las reducciones y capturas de GEI a la Junta Ejecutiva, para que ésta proceda a expedir el Certificado de Reducción de Emisiones (CER). La expedición de un CER se hará efectiva si no existe objeción de alguna de las partes participante en el proyecto. Dicho CER constituye un bien final que puede ser negociado por el responsable del proyecto con el fin de obtener recursos adicionales.

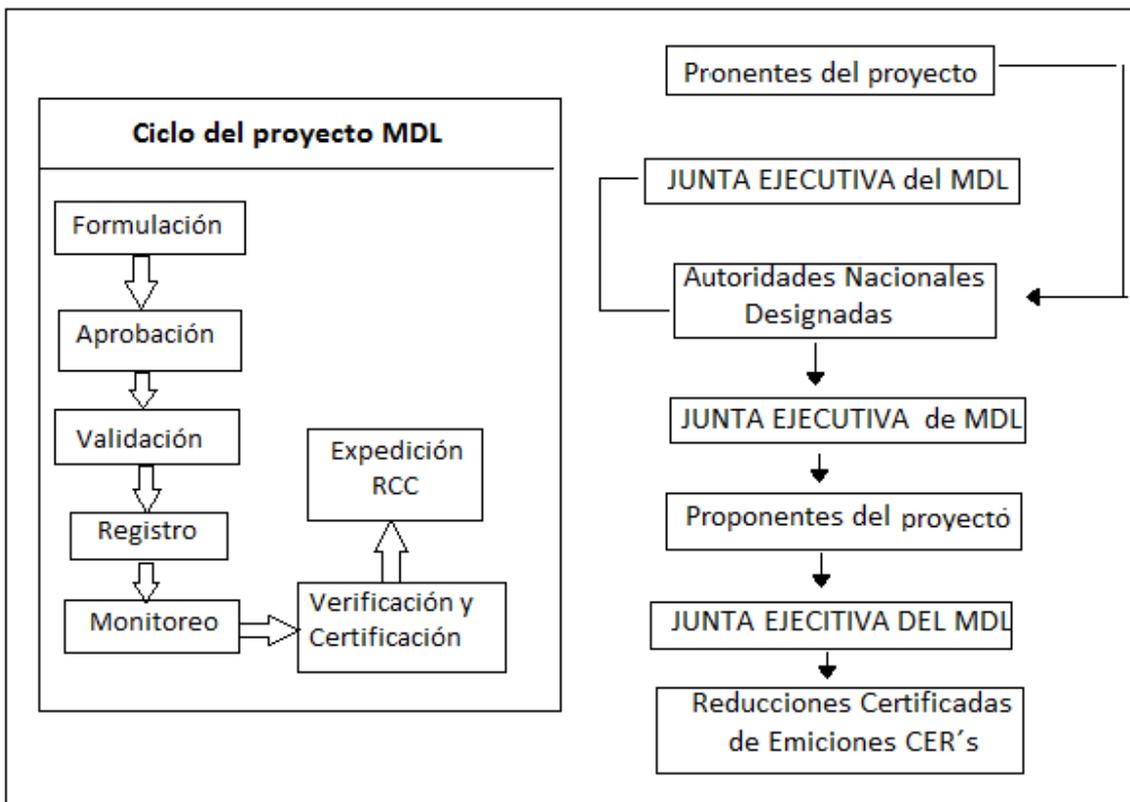


Figura 3. Ciclo de aprobación de un proyecto MDL. Fuente: [1] [8].

En resumen, para postular un proyecto de captura de biogás en un relleno sanitario, según [7], primero se debe considerar:

1. Estimación del precio de los CER.
2. Estudios de ingeniería para sistema de captura.
 - Permisos.
 - Pozos de prueba.
 - Análisis de concentración de líquidos lixiviados.
3. Construcción.
4. Operación, mantenimiento y monitoreo.
5. Financiamiento.

3.3. Principales Objetivos del Mecanismo de Desarrollo Limpio

Los MDL ofrecen muchas ventajas y desventajas según las necesidades de los actores involucrados en un proyecto de este tipo. Sin embargo, los principales objetivos del mecanismo de desarrollo limpio son, entre otros:

- Ayudar a los países en vía de desarrollo a alcanzar el desarrollo sostenible.
- Contribuir al objetivo primordial de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático para estabilizar la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera en niveles que prevengan una interferencia antropogénica peligrosa en el sistema climático.
- Ayudar a los países incluidos en el Anexo I del Protocolo de Kyoto (países desarrollados)

a cumplir el compromiso de reducción de emisiones establecido en el artículo 3° del Protocolo.

Gas Efecto Invernadero	Unidad	Potencial de Calentamiento Global
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	21
Oxido Nitroso	N ₂ O	310
Hidrofluorocarbonos	HFC	11700
Perfluorocarbonos	PFC	6500
Hexafluoruro de Azufre	SF ₆	22200

Tabla 1. Gases de Efecto Invernadero incluidos en el Protocolo de Kyoto y su potencial de calentamiento. Fuente: [9] [10].

Barreras Políticas	Barreras Técnicas y Tecnológicas	Barreras Financieras	Barreras Sociales	Barreras Institucionales
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Baja prioridad para los entes municipales (ej. presupuestos). ❖ Incertidumbre política (ej. continuidad). ❖ Falta de interés político por el metano (ej. No se contempla dentro de la política energética del país). ❖ Interacción de los diferentes entes gubernamentales. (ej. autoridad ambiental). ❖ Complejidad de la normativa. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Desconocimiento del potencial del metano (ej. maneja una imagen relativa al GN). ❖ Condiciones para el aprovechamiento (ej. aspectos técnicos del sitio). ❖ Capacidad disponible en los rellenos (ej. rellenos muy pequeños en algunos municipios). ❖ Altos costos de inversión (ej. tecnologías muy especializadas - internacionales). ❖ Poco desarrollo del sector (ej. Nunca se ha hecho uso del biogás). ❖ Falta de conocimientos técnicos (ej. no hay un modelo de valoración propio). 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Poca disponibilidad de recursos de tipo estatal. ❖ Desconocimiento del potencial de metano (ej. entidades financieras). ❖ No se contempla el uso del biogás desde el inicio. (ej. Inversiones no proyectadas). ❖ Presupuestos de operación limitados (ej. contratos de concesión). ❖ Acceso a créditos para este tipo de proyectos (ej. montos elevados). ❖ Con las demoras en la aprobación de los proyectos y las demoras en su iniciación, el tiempo hasta el final del primer período de compromiso (2012) se acaba. ❖ Pocos compradores desean comprometerse a comprar RCE más allá de 2012. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Poca disponibilidad de dinero. ❖ Desconocimiento del potencial de metano (ej. entidades financieras). ❖ No se contempla el uso del biogás desde el inicio. (ej. evaluación del proyecto). ❖ Presupuestos de operación limitados (ej. contratos de concesión). ❖ Imagen percibida por la comunidad. ❖ Existencia de otros actores (ej. pepenadores). 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Enfoque distinto al del negocio. ❖ Condiciones contractuales municipio operador. ❖ Actualidad de algunos datos existentes. ❖ Transición de botaderos a rellenos sanitarios. ❖ La lenta aprobación de las metodologías ha demorado el proceso de validación de proyectos.

Tabla 2. Identificación de barreras para proyectos MDL en Colombia. Fuente: [11].

3.4. Procesos Biológicos de Digestión

Los procesos biológicos aerobios y anaerobios pueden compararse respecto de la transformación global que tiene lugar y del producto final obtenido. Básicamente el proceso aeróbico o digestión aeróbica elimina el 80% de la materia orgánica en forma de biomasa microbiana (lodos) y el 20% restante en forma de anhídrido carbónico y agua. En cambio, la digestión anaeróbica transforma la materia orgánica en una mezcla de un 5% de biomasa y un 95% de metano y anhídrido carbónico (biogás), susceptible de aprovechamiento y valorización económica.

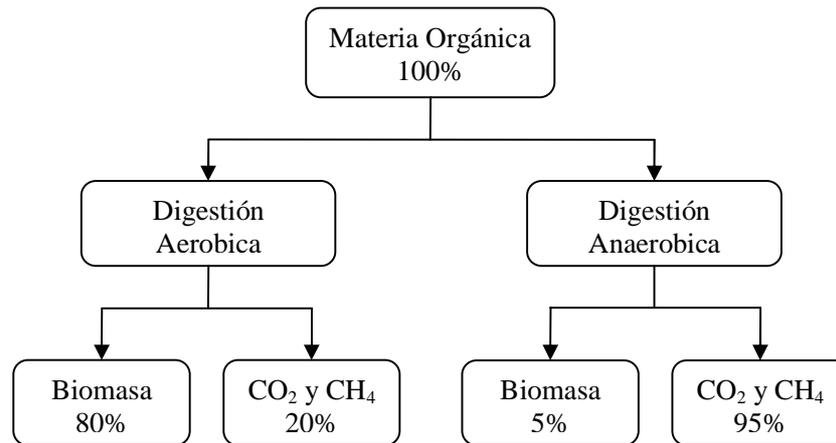


Figura 4. Balance de los procesos biológicos aeróbico y anaeróbico. Fuente: [21].

3.4.1. Proceso de Digestión Aeróbica

Los procesos aerobios requieren un aporte neto de energía. En cambio, los procesos anaerobios no sólo no consumen energía, sino que son productores de la misma. La producción de metano como producto final del proceso anaeróbico, consecuencia del metabolismo de la microbiota anaeróbica, es una ventaja adicional y un atractivo desde el punto de vista económico. El balance energético positivo, aportado por el gas metano incide en una notable reducción de los costos de operación en la planta de tratamiento. Desde el punto de vista medioambiental, el proceso anaeróbico contribuye a la disminución en la generación de GEI, si el metano producido sustituye una fuente no renovable de energía [21].

3.4.2. Proceso de Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico que consiste en la degradación biológica, en ausencia de aire, de un material orgánico complejo, dando como productos finales un biogás, compuesto fundamentalmente por metano y dióxido de carbono, y un residuo con una menor concentración en sólidos volátiles u orgánicos. Así en un proceso equilibrado, la conversión total de la materia orgánica ocurre mediante una serie de etapas que transcurren tanto en paralelo como en serie, en la que participan varios grupos microbianos.

3.4.2.1. Ventajas de la Digestión Anaeróbica

- Alta producción de biogás compuesto fundamentalmente por CH_4 y CO_2 .
- Obtención de biogás susceptible de aprovechamiento energético.
- Bajo consumo energético: la alta producción de biogás con elevado valor energético reduce significativamente los costos del tratamiento.
- Reducción de la emisión de gases responsables del efecto invernadero.

3.4.2.2. Microbiología y Bioquímica de la Digestión Anaeróbica

El proceso de digestión anaeróbica se produce a partir de la acción coordinada e interdependiente de un conjunto de poblaciones bacterianas con metabolismos diferentes. En un principio se estableció el modelo tradicional de la digestión anaeróbica en dos etapas

que aceptaba la existencia de dos grandes grupos microbianos: bacterias formadoras de ácidos o acidogénicas y *archaeas* formadoras de metano o metanogénicas.

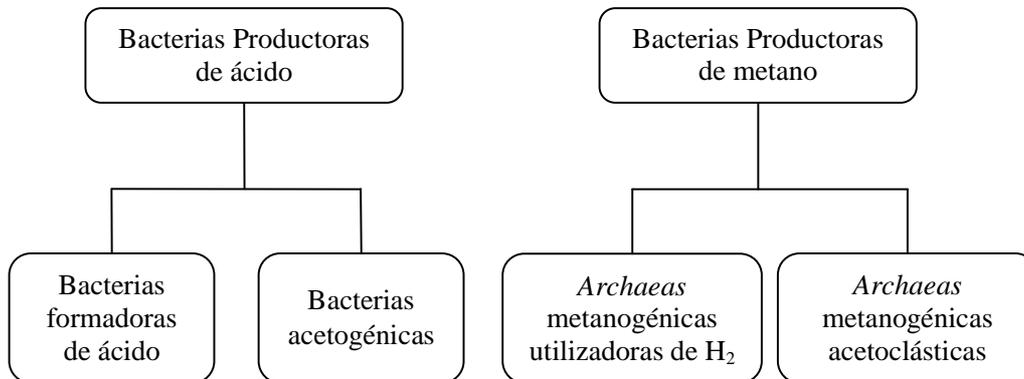


Figura 5. Principales grupos de microorganismos anaeróbicos. Fuente: [21].

Según este modelo, la primera fase es la *hidrólisis* de partículas y moléculas complejas que son hidrolizadas, mediante reacciones de oxidación-reducción, por enzimas extracelulares producidos por los organismos fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles, que serán metabolizados por las bacterias anaerobias en el interior de las células. Los compuestos solubles, básicamente diferentes tipos de oligosacáridos y azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos, son fermentados por los microorganismos *acidogénicos* que producen principalmente, ácidos grasos de cadena corta, dióxido de carbono e hidrógeno. Los ácidos de cadena corta son transformados en acético, hidrógeno y dióxido de carbono mediante la acción de los microorganismos *acetogénicos*. La formación de metabolitos ácidos en esta fase produciría un pequeño descenso del pH del medio (hasta valores de 5,5 aproximadamente) si no existiesen, en la etapa siguiente, otros microorganismos capaces de consumir estos ácidos. Así, en un proceso equilibrado, las *archaeas* metanogénicas convierten los productos de la fermentación a la misma velocidad a la que se forman metano y dióxido de carbono, fundamentalmente. La acción coordinada de todos los grupos microbianos provoca que el pH del medio se establezca en valores ligeramente alcalinos (7,4 - 8,5) dependiendo de la temperatura de trabajo [21].

3.4.2.3. Etapas que Componen el Proceso de Degradación Anaeróbica

Las etapas que componen el proceso de degradación anaeróbica son:

a) Etapa Hidrolítica

En esta primera fase las moléculas orgánicas complejas y no disueltas se rompen, en una transformación controlada por enzimas extracelulares, en compuestos más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos, alcoholes, CO₂ e H₂).

Los compuestos solubles, básicamente diferentes tipos de oligosacáridos y azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos, atraviesan la pared celular y constituyen las principales fuentes de carbono y energía para las células de los microorganismos. En el interior de la célula estos compuestos se transforman en compuestos más simples como, acetato, pinato, butirato, amoníaco, alcoholes, etc.

La fase hidrolítica es decisiva para la biodegradación de RSU, convirtiéndose en la etapa limitante para los residuos con gran cantidad de sólidos, donde la hidrólisis previa es necesaria ya que los microorganismos solo son capaces de metabolizar la materia orgánica disuelta y, por tanto, han de generar las exoenzimas necesarias para degradar el residuo. La velocidad viene limitada, en gran parte, por el grado de trituración o el tamaño de partícula de las sustancias a hidrolizar. Cuanto mayor es la velocidad de solubilización de la materia orgánica, mayor es la velocidad de producción de biogás.

b) Etapa de Fermentación Acidogénica o Acidogénesis

La segunda etapa consiste en la transformación de los compuestos formados en la primera fase en compuestos de peso molecular intermedio tales como ácidos grasos volátiles (acetato, propionato, butirato, etc.), alcoholes, y otros subproductos importantes para etapas posteriores (CH₄, H₂, CO₂, etc.).

Las bacterias implicadas en esta etapa son anaerobias obligadas o facultativas, muy abundantes en la naturaleza y bacterias proteolíticas. Se pueden citar bacterias acidogénicas de los géneros *Clostridium*, *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Micrococcus*.

c) Etapa Acetogénica o Acetogénesis

El grupo especializado de bacterias sintróficas denominadas acetogénicas fue descubierto gracias a las limitaciones metabólicas con relación a los otros grupos de bacterias. Son bacterias facultativas que viven en estrecha colaboración con las *archaeas* metanogénicas. Algunos ejemplos de bacterias productoras de hidrógeno son las anaerobias obligadas *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas* y *Desulfovibrio* [21].

Las bacterias acetogénicas no tienen otras posibilidades metabólicas, dependen necesariamente de reacciones de transferencia de hidrógeno entre distintas especies de microorganismos. Así el principal significado de estos microorganismos en el proceso de digestión anaeróbica es el de donantes de hidrógeno, dióxido de carbono y acetato a las *archaeas* metanogénicas. Estos microorganismos son capaces de convertir los productos finales de la microbiota acidogénica en acetato a partir de dos rutas diferentes:

- (1) deshidrogenación acetogénica como producto de la fermentación de ácidos grasos volátiles o lactato y alcoholes.
- (2) hidrogenación acetogénica a partir del hidrógeno y dióxido de carbono las bacterias homoacetogénicas sintetizan acetato.

Las reacciones de *deshidrogenación acetogénica* dependen de la concentración de hidrógeno existente, por lo tanto para que la acetogénesis tenga lugar en los digestores anaerobios, es necesario que el hidrógeno generado en la misma sea utilizado y consumido con igual velocidad a la que se produce (bacterias metanogénicas utilizadoras de hidrógeno y/o bacterias homoacetogénicas).

Cuando la producción de hidrógeno en el gas es muy baja (5 – 50 ppm), las reacciones que ocurren son termodinámicas favorables, existirá mayor formación de acético y su energía libre será suficiente para permitir la síntesis de ATP y el crecimiento bacteriano. Al contrario, cuando la eliminación de hidrógeno es menos eficiente, aumenta la concentración de hidrógeno y, por lo tanto, la proporción de ácidos grasos de cadena larga, como

propiónico, butírico, valérico, isovalérico, heptanoico, etc., lo que puede llevar a una acidificación de reactores anaerobios.

Este proceso ocurre porque el hidrógeno bloquea la eliminación de electrones, vía reducción de protones, y las bacterias acidogénicas (fermentativas) deben asumir dichos electrones por otras vías, con el consiguiente aumento de productos reducidos de oxidación tales como propionato y butirato.

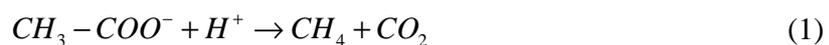
Algunos autores admiten la existencia de otras bacterias, denominadas *homoacetogénicas*, que pueden crecer autotróficamente con dióxido de carbono e hidrógeno para producir acetato (reacciones de *hidrogenación acetogénica*) cuando las metanogénicas utilizadoras de H₂, están inhibidas debido a un pH bajo. Así, se considera que el intercambio de hidrógeno es tan rápido en el digestor que originan diferentes microambientes con diferentes presiones de hidrógeno, donde ambas reacciones (acetogénicas y homoacetogénicas) se da conjuntamente [21].

d) Etapa de Fermentación Metanogénica o Metanogénesis

La metanogénesis es el último paso del proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica. En esta etapa los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H₂, CO₂, formiato, metanol, y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea*, y, morfológicamente pueden ser bacilos cortos y largos, células en forma de placas y metanógenos filamentosos, tanto Gram positivos como Gram negativos. Las *archaeas metanogénicas* constituyen el único grupo de microorganismos altamente especializado y que son anaeróbicas estrictas, existiendo dos grupos fundamentales de *archaeas metanogénicas*: las metanogénicas acetoclásticas y las utilizadoras de hidrógeno. La clasificación de las *archaeas metanogénicas* utilizadoras de hidrógeno se compone de seis géneros principales: *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanococcus*, *Methanobacillus*, *Methanotrix*, *Methanospirillum*.

Las reacciones identificadas en la figura 4 para estos microorganismos son:

1. *Conversión de acetato en metano por las archaeas metanogénicas acetoclásticas*: la reacción acetoclástica, cuyos productos finales son metano y dióxido de carbono, es llevada a cabo específicamente por los géneros *Methanosarcina* y *Methanotrix*. La molécula de acetato se rompe por descarboxilación y el grupo metilo es reducido a CH₄ y CO₂ sin modificar su estructura y sin afectar a la concentración de H₂ en el gas. Normalmente estos microorganismos controlan el pH del medio por la eliminación del acético y producción de CO₂ que se disuelve formando bicarbonato según las ecuaciones (1) y (2).



La mayoría de los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H₂ como aceptor de electrones, mientras que dos géneros son capaces de utilizar el acetato. A pesar de ello, en ciertos ambientes anaerobios, éste es el principal precursor del metano, considerándose que

alrededor del 70% del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir de acetato, mientras que el restante 30% proviene del CO_2 y H_2 .

La degradación metanogénica de cada sustrato depende tanto de la naturaleza del mismo como de la ruta metabólica seleccionada por los microorganismos para su degradación. En el caso de desequilibrio de las velocidades de generación y consumo de ácidos grasos volátiles se produce un descenso de pH del medio y una acumulación de hidrógeno en el medio. En el primer caso, descenso del pH, los microorganismos desvían la producción de ácidos grasos hacia el ácido butírico, donde se produce un mol de butírico en lugar de dos de acético. Este fenómeno se conoce con el nombre de “*sobrecarga de ácido butírico*”. Sin embargo, cuando se produce un aumento del contenido de hidrógeno se fomenta la producción de ácido propiónico, lo que favorece la disminución de la concentración de hidrógeno y permite que las bacterias formadoras de ácidos recuperen el control del potencial redox del medio; no obstante se produce un acusado descenso del pH, por lo que las bacterias acetogénicas y metanogénicas se inhiben fuertemente. Este fenómeno se conoce como “*sobrecarga de ácido propiónico*”.

2. *Formación de metano a partir del CO_2 y H_2 por las archaeas homoacetogénicas*: la reacción de formación de metano a partir del dióxido de carbono e hidrógeno, actúa en el control del potencial redox de la fermentación en el digestor, evitando la pérdida de hidrógeno y CO_2 durante el crecimiento sobre compuestos multicarbonados, lo que implica en una mayor eficiencia termodinámica. El papel que desempeñan estos microorganismos en la naturaleza no es bien conocido, aunque la ventaja selectiva de los homoacetogénicos en sistemas anaeróbicos implica una ganancia adicional de ATP sobre especies hidrolíticas que no son capaces de catalizar compuestos de un solo átomo de carbono. Sin embargo, se ha comprobado la existencia de una compleja relación entre las *archaeas* metanogénicas y no metanogénicas a través de delicados equilibrios con los niveles de ácidos e hidrógeno. En la oxidación del hidrógeno, las *archaeas metanogénicas* eliminan el hidrógeno manteniendo sus concentraciones en niveles lo suficientemente bajos para permitir crecer y metabolizar a las bacterias no metanogénicas. Así, los microorganismos *metanogénicos* consiguen la energía necesaria a la vez que actúan como sumidero de electrones para las especies sensitivas al hidrógeno.

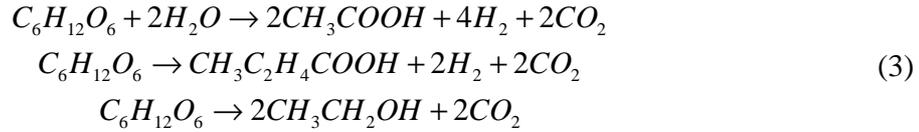
3.4.2.4. Bacterias sulfatorreductoras

Además de las bacterias señaladas en la etapa metanogénica, también existen en los digestores anaerobios las bacterias denominadas *sulfatorreductoras*. Estas bacterias, especialmente en presencia de sulfatos, tienen capacidad de reducir sulfatos a sulfuros, o sea utilizan el sulfato como aceptor final de electrones en la cadena respiratoria, actuando la materia orgánica como donador de electrones. Estas bacterias, además de utilizar los ácidos pirúvicos y lácticos para su desarrollo, pueden utilizar el ácido acético e impedir la formación de metano. Por otro lado, el exceso de sulfatos puede provocar una baja producción de metano que, puede estar relacionada con la falta de H_2 , más que con la toxicidad del sulfato [21].

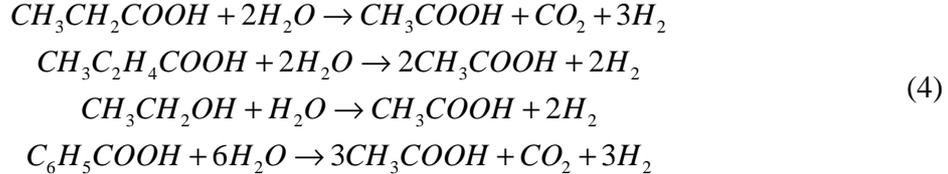
3.4.2.5. Principales reacciones de conversión en el ecosistema anaeróbico

Según se expresa en [21] y [25], el acetato puede convertirse en metano a temperaturas superiores a los 75°C .

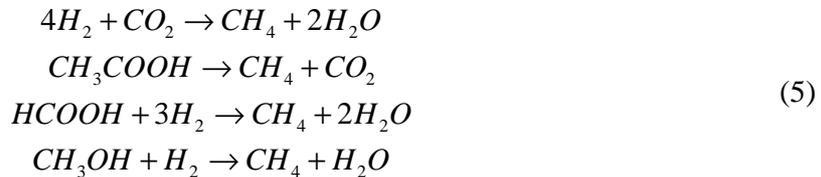
Bacterias Fermentativas:



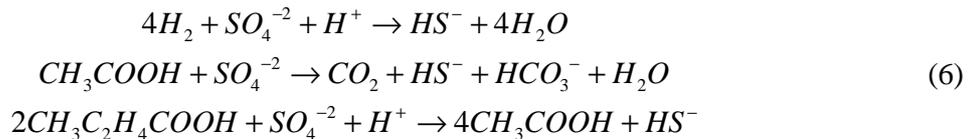
Bacterias Acetogénicas:



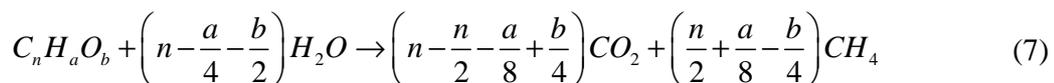
Bacterias Metanogénicas:



Bacterias Sulfato-Reductoras:



En forma general, de las tres etapas de la degradación de la materia orgánica en un vertedero se distinguen tres etapas. Etapa 1: Hidrolizados y fermentados (ácidos grasos, alcoholes, hidrogeno y dióxido de carbono). Etapa 2: Las bacterias acetogénicas (generan ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono), Y etapa 3: las bacterias metanogénicas (generan metano). Todo esto se resume en la siguiente ecuación.



En conclusión se puede resumir el proceso de descomposición de residuos orgánicos en cinco fases las cuales son reguladas por las condiciones del medio, determinadas como la temperatura, la presencia de oxígeno, las características del residuo y la edad del relleno sanitario, principalmente [13].

Fase I: Aeróbica, que inicia inmediatamente después de la disposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario y en la que las sustancias fácilmente biodegradables se descomponen por la presencia de oxígeno y se propicia la formación de dióxido de carbono (CO₂), agua, materia parcialmente descompuesta registrando temperaturas entre 35 y 40 °C.

Fase II: Aeróbica con el desarrollo de condiciones anaeróbicas en la que ocurre el proceso de Fermentación, actúan los organismos facultativos con la producción de ácidos orgánicos y la reduce significativamente el pH, condiciones propicias para la liberación de metales en el agua y la generación de dióxido de carbono (CO₂).

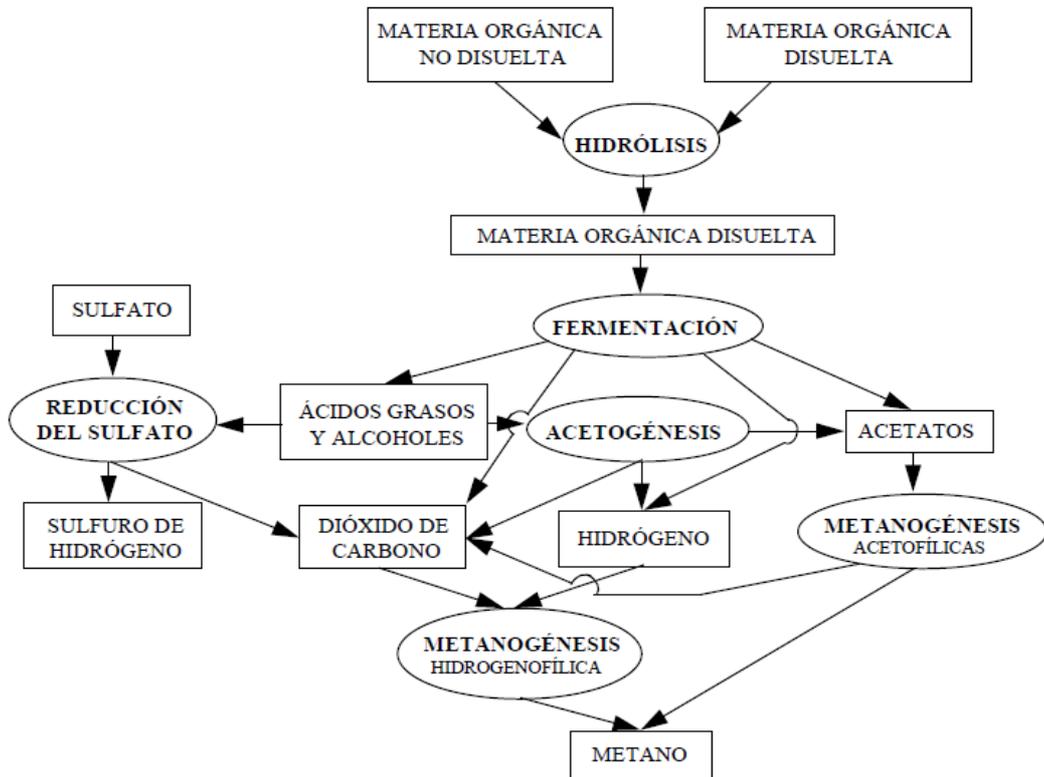


Figura 6. Etapas de degradación anaeróbica de los RSU. Fuente: [21].

Fase III: Anaeróbica, resultado de la acción de organismos formadores de metano (CH_4), que en las condiciones adecuadas, actúan lenta y eficientemente en la producción de este gas mientras reducen la generación de dióxido de carbono (CO_2).

Fase IV: Metanogénica estable, que registra la más alta producción de metano oscilando entre 40-60% de metano (CH_4) en volumen.

Fase V: Estabilización, la producción de metano (CH_4) comienza a disminuir y la presencia de aire atmosférico introduce condiciones aeróbicas en el sistema [13].

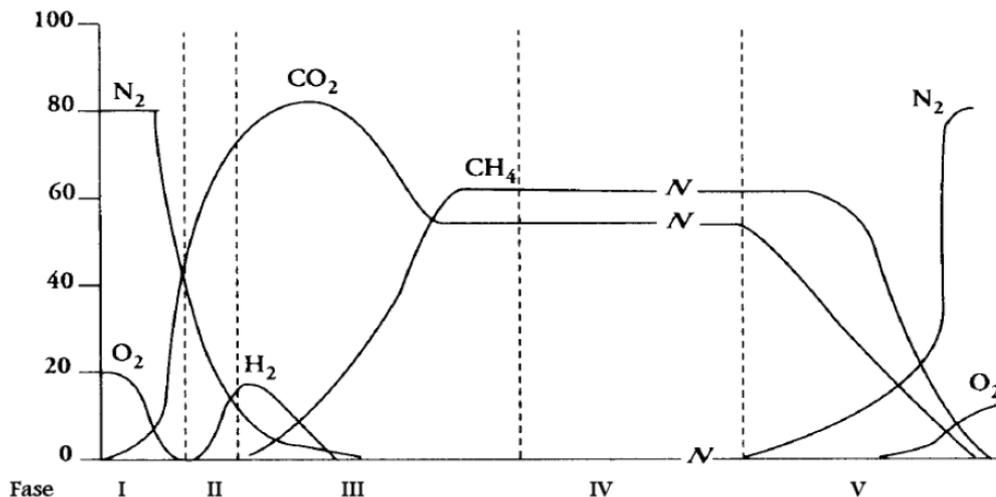


Figura 7. Producción de los diferentes gases durante las fases de descomposición de los RSU. Fuente: [13].

3.5. Condiciones y Variables de las que Depende la Generación de Biogás

En [17], se encuentra cuales son las condiciones necesarias para que sea posible la generación de biogás de vertedero:

- Índices de disposición de residuos.
- Composición de los residuos (% de orgánicos secos).
- Humedad (precipitación).
- Profundidad y compactación de residuos, cobertura, etc.

La recuperación de biogás es determinada por la generación de biogás y la eficiencia de captura función de:

- Diseño del sistema de captura.
- Operación y mantenimiento del sistema de captura.
- Configuración y operación del relleno sanitario.

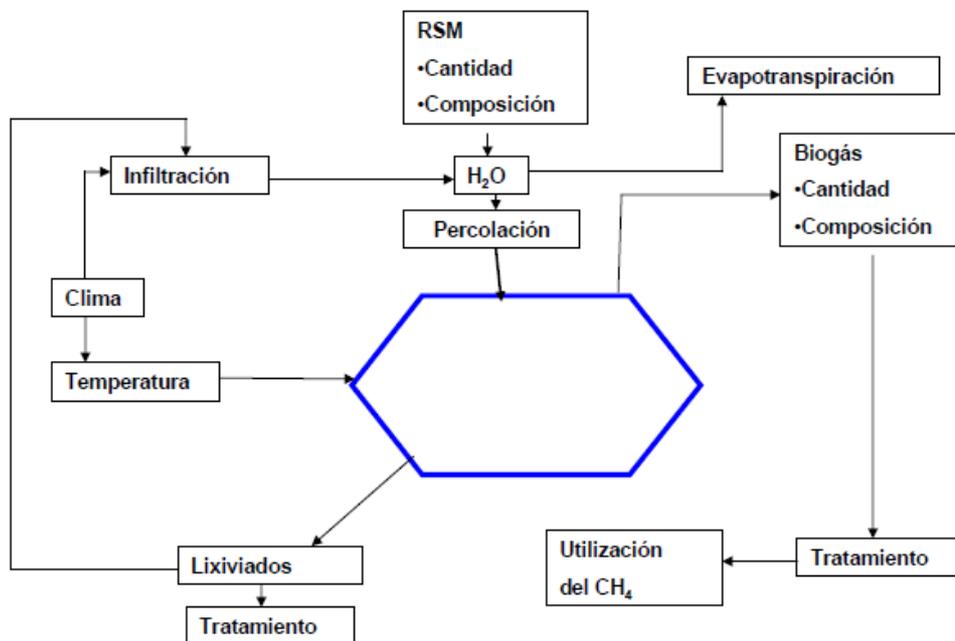


Figura 8. Factores que determinan la generación de biogás. Fuente: [13].

3.5.1. Temperatura de Operación

La temperatura es una de las principales variables fisicoquímicas ya que afecta a la velocidad global del proceso, la actividad de los microorganismos, la constante de equilibrio, la solubilidad de los gases y al tipo de microorganismos presente en el medio [21].

3.5.2. Efectos del pH sobre la Oxidación del Metano

En estudios efectuados sobre el consumo de CH₄ en suelos aireados demostraron que se presentan mayores tasas de oxidación de CH₄ en pH de 4 a 5 respecto a las obtenidas en suelos alcalinos. Con lo anterior se indica que las poblaciones metanotróficas se encuentran solo parcialmente adaptadas a medios ambientes ácidos, lo que resulta favorable en la cobertura de suelo de zona donde se encontraron pH desde 4,2 hasta 5,6.

3.5.3. Efectos del Contenido de Humedad sobre la Oxidación del Metano

Las ratas de oxidación de CH_4 son también dependientes del contenido de humedad, esto se ha demostrado en investigaciones realizadas en laboratorios por medio de incubaciones de muestras de suelo tomadas de coberturas en rellenos sanitarios, donde se ha determinado que las ratas de oxidación de CH_4 resultaron ser más altas bajo condiciones de humedad moderadas comparadas con suelos de bajos contenidos de humedad.

Un estudio realizado en Bélgica respecto a la influencia del contenido de humedad sobre la oxidación de CH_4 en coberturas de suelos en rellenos sanitarios, determinó un contenido de humedad óptimo de 15% donde se obtuvo la máxima rata de oxidación de CH_4 . Altos contenidos de humedad reducen sustancialmente la oxidación de CH_4 ocasionado por la limitada difusión a la superficie celular de la bacteria oxidante del CH_4 manifestándose una restringida difusión del gas (CH_4 y O_2) entre el suelo y la fase gaseosa, junto a la restringida solubilidad de CH_4 en suelos, debido a que el coeficiente de difusión del CH_4 en agua es 4 veces más bajo que el aire; adicionalmente el flujo advectivo también se ve afectado, ya que el volumen de poros del suelo disminuye con incrementos del agua restringiendo de esta forma el flujo de gas. En suelos con bajos contenidos de humedad se presenta un decaimiento en la oxidación del CH_4 como resultado de la reducida actividad microbial [21].

Parámetro	Unidad	Rango de variación
Metano	% CH_4	30 - 65
Dióxido de carbono	% CO_2	20 - 40
Nitrógeno	% N_2	05 - 40
Hidrógeno	% H_2	1 - 3
Oxígeno	% O_2	0 - 5
Argón	%Ar	0 - 0,04
Sulfuro de hidrógeno	% H_2S	0 - 0,01
Temperatura	°C	10 - 40
Contenido de humedad	%humedad relativa	0 - 100
Masa	kg/m^3	2,1 - 1,28
Nivel de energía	MJ/m^3	10,8 - 23,3

Tabla 3. Rango de composición de biogás en un relleno sanitario. Fuente: [13].

Con lo anterior se puede resaltar que las condiciones de pH y contenido de humedad con las que actualmente cuenta el suelo de cobertura del relleno sanitario La Glorita son propicios para el desarrollo de las bacterias en el proceso de oxidación del gas metano.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Estructurar un análisis de los factores asociados a la generación de biogás en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira, analizando las perspectivas de participación en proyectos MDL en el marco del protocolo de Kyoto.

4.2. Objetivos Específicos

- Estimar el potencial energético del biogás generado en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira.
- Establecer el comportamiento histórico frente al desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira.
- Establecer las perspectivas de desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira.

5. Metodología

5.1 Estimación del potencial energético del biogás generado en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira

Para esta estimación se realizó inicialmente una revisión y selección de un modelo que permitiera proyectar la generación de biogás en el relleno sanitario, para posteriormente determinar el poder calorífico de éste.

5.1.1. Métodos Indirectos de Estimación

Para poder aplicar a al aprovechamiento de los GEI enfocándolo hacia un proyecto de MDL se debe conocer o poder realizar una estimación de la cantidad de gases que produce y así tener una idea de cuál es el potencial de este relleno y calcular su tiempo de aprovechamiento.

A continuación se presenta los diferentes sistemas que existen para realizar estos cálculos:

La Estimación directa (medición), de la emisión de contaminantes no es siempre posible debido a razones técnicas o económicas, sobre todo cuando se trata de pequeñas o numerosas fuentes. Para la estimación de estas emisiones es más conveniente el empleo de métodos indirectos, entre los cuales están los balances de materiales, el uso de factores de emisión, la extrapolación y el empleo de encuestas.

En el campo ambiental existen hoy día diferentes metodologías para estimar las emisiones de material contaminante hacia la atmósfera, entre las cuales se tienen:

- Monitoreo en la fuente.
- Balances de Masa.
- Empleo de Factores de Emisión.
- Caracterización de combustibles.
- Modelos Matemáticos que permiten estimar la dispersión de las emisiones. extrapolación de valores [17].

Balance de masa. Es la contabilidad de flujos y cambios de materia en el inventario de masa de cualquier porción arbitraria o del total de un proceso. Se basa en el principio de conservación de la materia, pero no es posible de ser empleado en los rellenos sanitarios ya que no se tiene información acerca de la entrada y salida de las especies involucradas en las reacciones químicas en un relleno.

Extrapolación. Este método se puede emplear cuando existen suficientes datos sobre un número importante de rellenos y es posible extrapolar (o interpolar) las características del relleno de interés e inferir sus emisiones. En el caso de los rellenos en nuestro país, no existen mediciones suficientes, ni en número de rellenos ni para las especies contaminantes de interés.

Factores de emisión. Un factor de emisión (FE), es una estimación de la cantidad de contaminantes descargados como resultado de una actividad específica. Un FE relaciona la

emisión de un contaminante con uno o varios parámetros que representen el nivel de actividad del proceso. Para el caso de un relleno sanitario el nivel de actividad puede estar dado por las toneladas de basura que se manejan, la edad del relleno, la producción de biogás, etc.

Cuando se posee el factor de emisión de un contaminante, la emisión de este (E), se calcula multiplicando el factor de emisión por el nivel de actividad (NA), relacionado con el contaminante en cuestión. Según [7], esto es:

$$E = FE * NA \quad (8)$$

Para estimar la emisión anual de las sustancias que se requieren para el inventario de emisiones, debe conocerse el volumen de gas emitido (biogás), así como su composición. Por lo tanto deberá primero conocerse la relación entre este flujo y alguna de las características físicas principales del relleno, como: área de emplazamiento, cantidad másica de basura recibida durante la vida útil del relleno y su profundidad.

Para analizar y seleccionar el método más adecuado para ser empleado en Colombia es indispensable considerar, además de las características distintivas de un relleno sanitario, la información razonablemente posible de obtener para realizar la estimación requerida. Las características de los rellenos sanitarios que se consideran importantes para el análisis de las emisiones contaminantes a los distintos medios (aire, agua y suelo) son: el tamaño del área dispuesta para el emplazamiento, la capacidad del relleno en su vida útil (reportada en toneladas o m³ de basura), la profundidad del relleno, el tiempo de descomposición transcurrido, la composición de la basura y metodología para la línea base [17].

Modelos matemáticos. Es una representación matemática de los fenómenos químicos, físicos o biológicos que se llevan a cabo dentro de un proceso. Entre más complicado es el proceso y el modelo posee más precisión, se requiere de mayor cantidad de información sobre el proceso, por lo que no resultan económicamente adecuados para Colombia, además de no existir un gran número de ellos para el caso de rellenos sanitarios. Debe recordarse que debido a la compleja composición de la basura, dentro de los rellenos sanitarios son muy complejos los procesos físicos, químicos y biológicos que se realizan [17].

La estimación del biogás emitido desde sitios de disposición final de residuos sólidos es uno de los objetivos previstos en el Protocolo de Kyoto; de hecho, resulta fundamental evaluar la contribución de los rellenos sanitarios, a lo largo del tiempo por la producción de biogás para realizar un cualquier tipo aprovechamiento del biogás producido. Sin embargo, la evaluación de las emisiones de biogás de los rellenos sanitarios resulta compleja, debido a que se trata de múltiples fuentes con una alta variabilidad espacial y temporal [13].

Es preciso aclarar que los rellenos sanitarios poseen dos fases en su vida útil: etapa de funcionamiento, cuando los residuos sólidos urbanos son depositados y degradados en estos sitios, y etapa de clausura, cuando se alcanza la máxima capacidad de almacenamiento de residuos sólidos. En su etapa de operación los rellenos sanitarios emiten mayor cantidad de metano con respecto a los rellenos clausurados, esto se debe a que la degradación de la materia orgánica ocurre en su mayoría en los primeros años [13].

Sin embargo tras el cierre, un relleno sanitario continúa con la generación y emisión de biogás, posiblemente por varios cientos de años. La producción de biogás en las primeras

etapas de vida de un relleno sanitario puede ser mínima durante varios meses, sin embargo, en rellenos sanitarios con una vida útil media o recientemente clausurado la producción se puede encontrar en su máxima capacidad, tardando varios años en dejar de producir este biogás, incluso aun después de clausurado el relleno .

Para este análisis de toda la metodología que explicamos anteriormente según su concepto se usara los modelos matemáticos, y entre todos los existentes emplearemos el sistema más adecuado. Dentro de los modelos matemáticos más importante tenemos:

5.1.2. Modelos Predictivos para la Producción de Biogás

5.1.2.1. Modelo Mexicano de Biogás

El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden que asume que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo ubicado antes de la generación de metano, y que este período es de un año, contado desde la colocación de los residuos hasta la generación de biogás; además, que por cada unidad de residuos, después de un año de disposición de los RSU, la generación disminuye exponencialmente mientras se consume la fracción orgánica de los residuos.

Ecuación de degradación de primer orden [18].

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2k \cdot L_0 \cdot M_i \cdot e^{-k \cdot t_i} \quad (9)$$

Donde:

Σ = La suma desde el año de apretura +1 ($i=1$) hasta el año de proyección (n).

Q_M = Generación máxima de biogás ($m^3/año$).

k = Índice de generación de metano ($años^{-1}$).

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

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

t_i = Edad de los residuos dispuestos en el año i (años).

La 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, la disponibilidad de nueva información hará posible la calibración del modelo y el desarrollo de mejores valores de k y L_0 .

5.1.2.2. Modelo de Scholl Canyon

Es un modelo de degradación de primer orden. Asume que se llega al máximo de la producción después de la fase inicial de estabilización, mientras se equilibran las condiciones anaerobias y las poblaciones de microorganismos dentro del relleno sanitario. Después la tasa de producción de biogás decrece debido a la disminución de la fracción orgánica de los residuos en el relleno sanitario. Este procedimiento se encuentra descrito por la ecuación (10).

$$\frac{dG}{dt} = -\frac{dL}{dt} = k \cdot L = k \cdot L_0 \cdot e^{-kt} \quad (10)$$

Donde:

t = tiempo (años).

L = Volumen de metano que queda por producir después del tiempo t (m^3/t RSU/año).

k = Constante de producción de biogás ($años^{-1}$).

La velocidad de producción de biogás está definida por:

L_0 = Volumen total máximo a ser producido (m^3/t RSU/año).

G = Volumen de metano producido después de un tiempo t (m^3/t RSU/año).

5.1.2.3. Modelo EPA v.302 de 2005

El ajuste del modelo EPA es un ejercicio que debe soportarse en la práctica experimentalmente, y necesita la caracterización desagregada de los RSU, para precisar su humedad y el porcentaje de sus diferentes fracciones, con base en los criterios de: i) degradación rápida, como restos de comida, residuos verdes, animales muertos y lodos; ii) degradación mediana, como papel; iii) degradación baja, como madera y textiles, además de iv) material inorgánico no biodegradable, como vidrio, metales.

La versión v.302, a diferencia del anterior v.301, no permite alimentar valores de k y L_0 ; sin embargo, con este modelo se hizo la simulación con los mismos valores k y L_0 que para Scholl Canyon y se obtuvo el resultado que dio base para descartarlo: Pero se espera que EPA flexibilice la entrada de estos dos parámetros para que nuevamente se constituya en un referente válido. Sin embargo, el listado de COV que produce este modelo, se tomó como un primer intento cualitativo para la predicción de la caracterización del biogás generado, para compuestos diferentes a CO_2 más CH_4 [18].

5.1.2.4. Landfill Gas Emission Model (LandGEM)

El modelo Landfill Gas Emission Model (LandGEM) de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), es una herramienta utilizada para estimar tasas de emisión de sitios de disposición de residuos sólidos municipales; LandGEM es uno de los modelos que se basa en una ecuación de descomposición con cinética de primer orden para la cuantificación las emisiones derivadas de la descomposición de residuos biodegradables. El modelo se utiliza para estimar las tasas de emisión total de gases de relleno sanitario como el metano, el dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, y otros contaminantes atmosféricos asociados; este modelo en la determinación de la cantidad de biogás producido en el Relleno Sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín [13].

5.1.2.5. Modelo Microgen-mgm

El Modelo microgen-mgm mediante la simulación de procesos biológicos y físico-químicos que tienen lugar dentro de un relleno sanitario, puede estimar la respectiva tasa de producción de metano. Microgen utiliza las ecuaciones de modelo basadas en el crecimiento microbiano, para describir la dinámica del ecosistema del relleno sanitario [13].

5.1.3. Selección del Modelo a Aplicar

Para estudiar la posibilidad de aprovechar la producción de biogás existente en el relleno Sanitario a Glorita se realizara una proyección de la generación de metano de este relleno, por medio del “Modelo Mexicano”, el cual es un método muy sencillo y provee mucha información que permite analizar la viabilidad de este proyecto, además de evaluar el

beneficio ambiental que se produce por la transformación de metano a dióxido de carbono sin mencionar las entradas económicas que se generan por la venta de bonos de carbono.

La cantidad de biogás producido depende de variables que afectan este proceso de degradación como son : humedad(precipitaciones), temperatura, composición de los RSU entre otras, y en el aprovechamiento de este biogás para la conversión a energía por medio de la pila depende otros factores como son: la eficiencia del sistema(recuperación, transformación, etc.), cantidad de metano contenido en el biogás todos estos factores afectan de forma directa o indirecta todo el proceso productivo y eficiente de un proyecto de este tipo [22].

Para desarrollar la metodología propuesta, primero se deben obtener las ecuaciones que modelan de forma independiente cada una de las variables y luego relacionarlas para obtener un modelo matemático que permita determinar de forma cercana y real el potencial de producción de metano y su posible aprovechamiento.

5.1.3.1. Modelo Predictivo para la Producción de Biogás utilizado

Muchos métodos y modelos han sido desarrollados para proyectar el potencial de generación del biogás. La aplicación de modelos ha permitido determinar la producción de metano a través de los desechos, con lo que puede calcularse un potencial de generación de electricidad a partir de biogás producido en el relleno sanitario. Los modelos más aceptados son los desarrollados por el IPCC [5].

El método que se utilizara para la proyección de biogás producido por el Relleno Sanitario la Glorita es el modelo mexicano LandGEM como ya se menciono anteriormente, presenta algunas ventajas con referencia a otros modelos y es el método que más se adecua la situación de este relleno.

El Modelo Mexicano de Biogás está elaborado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel[®], y está basado en una ecuación de degradación de primer orden. Este modelo requiere que el usuario alimente datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, precipitación promedio anual y eficiencia del sistema de recolección. El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (Lo); k y Lo son datos calculados basándose en la información previamente recolectada en rellenos sanitarios estos datos dependen directamente de la precipitación anual y son parámetros fundamentales para el cálculo del metano.

El valor de estos parámetros depende de muchos factores. En el caso del índice de generación de metano, su valor está en función de los siguientes factores: Contenido de humedad en los residuos, la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, el pH y la temperaturas, y su rango de trabajo está definido entre 0.003 a 0.21 intervalo determinado con modelos teóricos haciendo pruebas de campo, por lo tanto se observa que mientras k incrementa también lo hace la generación de metano (siempre y cuando se siga recibiendo residuos) y luego disminuye (después de que es clausurado el campo) a través del tiempo.

Mientras que el valor de la generación potencial de metano en los residuos, solo depende del tipo de residuos En la práctica, el valor teórico de Lo no podría ser alcanzado en regiones de clima seco, donde la humedad en los residuos es muy baja esto produce que

bacterias generadoras de metano no tengan un ambiente óptimo para desarrollar su trabajo y no se dé una producción del gas. Los valores teóricos varían entre 6.2 y 270 m³/ton de residuos.

Aun así se reconoce que es difícil modelar la generación y recuperación de biogás en forma exacta debido a las limitaciones en la información disponible pero si se tiene una idea aproximada del volumen que se tiene y que utilidad se puede dar a este GEI.

El método planteado utiliza una ecuación de degradación de primer orden y se asume que la generación de metano depende de la cantidad de RSU depositados en relleno por el año i , y que el metano generado en un año determinado es el resultado de la generación por la degradación de los RSU depositados en el año i más la generación de metano acumulada por los RSU depositados en años anteriores T .

La ecuación (11) presenta el modelo de primer orden, también conocido como modelo mexicano.

$$Q_{mT} = F \cdot k \cdot L_0 \sum_{i=1}^n M_i \cdot e^{-k \cdot (T-i)} \quad (11)$$

Donde:

Q_{mT} = Generación máxima de metano en el año T [m³_{CH₄}/año].

F = fracción de metano en el biogás [%].

k = constante de generación de metano [año⁻¹].

L_0 = potencial de generación de metano [m³_{CH₄}/ton].

M_i = masa de residuo dispuesto en el año i [ton].

En la ecuación del modelo se estima la generación de metano utilizando las cantidades de los residuos dispuestos, acumulados durante un año. Los valores son calculados basándose en la información previamente recolectada en el Relleno Sanitario la Glorita.

El modelo permite la alimentación de los valores de k y L_0 , derivados con información propia del relleno sanitario y de la precipitación anual. La tabla 2 presenta algunos valores típicos de las constantes mencionadas para residuos sólidos urbanos característicos de la región.

Tabla de cálculo de valores k Y L_0			
Precipitación (mm/año)	k (año ⁻¹)	L_0 (m ³ /ton)	L_0 (ft ³ /ton)
0	0,040	60	1.920
250	0,050	80	2.560
500	0,065	84	2.690
1000	0,080	84	2.690
2000	0,080	84	2.690

Tabla 4. Índices de generación de metano k y L_0 .

Para el relleno sanitario La Glorita, se tiene que está ubicado a una altura de 1.423 m sobre el nivel del mar, con una temperatura media de 21°C y una precipitación promedio de 2.258 mm/año, lo que hace un ambiente óptimo para el proceso de descomposición anaerobia y

umentando la producción de biogás en el relleno a esto suma la excelente composición en su mayoría de materia orgánica que favorece la descomposición y producido en mayor cantidad de biogás.

El modelo LandGEM además de ser útil para estimar las tasas de emisión total de gases de relleno sanitario como el metano también nos permite obtener otros gases como: CO₂, COV, y otros contaminantes atmosféricos asociados.

Adicionalmente, es posible establecer las toneladas equivalentes de CO₂ reducidas por la captura e incineración o aprovechamiento del biogás generado por el relleno, recordemos que el efecto del metano es mucho más dañino para el medio ambiente que el dióxido de carbono lo que nos permite establecer el aporte ambiental en un proyecto de esta categoría y hacer todo tipo de cálculos para saber cuál puede ser su aprovechamiento en la comunidad como fuente de energía primaria.

$$T_{CO_2,eq} = \%V_{CH_4} \cdot 21 \cdot Q_{BG} \cdot \rho_{CH_4} \quad (12)$$

Donde:

$T_{CO_2,eq}$ = Toneladas totales generadas de CO₂ equivalente.

$\%V_{CH_4}$ = Porcentaje del volumen estimado de metano en el biogás.

Q_{BG} = Cantidad total de biogás estimado [ton/año].

ρ_{CH_4} = Densidad del metano = 0.0007168 [ton/m³_{CH₄}].

Hay que resaltar que la aplicación del modelo planteado obtiene un valor estimado de la generación de metano, pero ese resultado no implica que sea el total de metano que puede ser captado, ya que depende de la eficiencia del sistema, del proceso de recuperación en el momento de la recolección y extracción del biogás. Los valores típicos de eficiencia de los sistemas de recuperación de biogás se encuentran entre el 50 y 80% [16].

Para efectos de cálculos con biogás se plantea a partir información contenida en tablas de propiedades termodinámicas para el metano [23].

5.2 Comportamiento histórico frente al desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira

Este comportamiento histórico se determinó a partir de información secundaria suministrada por la Empresa de Aseo de Pereira S.A E.S.P.

5.3 Perspectivas de desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira

Las perspectivas de desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario se definieron en función de los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo seleccionado. Para lo anterior se consideraron como principales criterios de análisis los aspectos ambientales, económicos y sociales, según la siguiente perspectiva:

- *Aspectos ambientales:* Se estimaron las emisiones (Ton. Eq./CO₂) evitadas bajo el escenario de aprovechamiento del biogás, estimando de esta manera el área forestal equivalente para la fijación de dichos gases.

- *Aspectos económicos:* Se estimó el valor de los bonos de carbono (CER) equivalentes a las emisiones evitadas, y la venta de energía eléctrica potencial asociada a la combustión del gas metano generado.

- *Aspectos sociales:* Se analizaron los beneficios asociados a la generación de empleo con respecto al aprovechamiento de los gases generados, y al beneficio ambiental de los habitantes de las zonas aledañas.

6. Análisis de Resultados

A Continuación se encuentran los resultados obtenidos por medio modelo mexicano tomando como base toda la información recolectada tanto del modelo como del relleno.

Las condiciones que se presentan a continuación, dan una viabilidad y argumentos del porqué este proyecto de aprovechamiento de RSU en pro del desarrollo puede ser factible en este relleno y se ratifica en los datos obtenidos del modelo.

Los puntos que favorecen la producción de biogás en el relleno son: la composición de que presentan sus RSU como se observa en la tabla 5, son en su mayoría composición de materia orgánica, esto es muy importante porque este es el material con el cual las bacterias inician la descomposición orgánica y con el que seguirán desarrollando su trabajo de generación de gas metano.

Adjunto a esto, si analizamos las condiciones climáticas en el relleno sanitario de Pereira se cuenta con la temperatura ideal para el funcionamiento de las bacterias y en cuanto a las precipitaciones es de 2.258 mm de lluvia por año, lo que es muy bueno debido a que el índice de generación del metano, según la tabla 4, presentado por el modelo de descomposición de primer orden, depende directamente de la cantidad de precipitaciones en la región y a esto se le suma la humedad contenida en los residuos también, cartas que son favorables para este proceso aumentando la producción de bigas.

Otro factor importante que favorece este propósito es la composición que presenta el biogás producido en el relleno la Glorita según estudios presentados presenta una composición 55,5% aproximadamente, como se observa en la tabla 6, este dato confirma que el biogás producido en este relleno realmente está causando un daño ambiental gigante si hablamos ecológicamente por los efectos que presenta el metano con respecto a el dióxido de carbono pero si se aprovecha este para la transformación de energía para abastecer la sociedad al mismo relleno para su auto sostenimiento, realmente se puede aprovechar esta composición y disminuir el impacto ambiental beneficiando a un gran sector tanto económica como socialmente.

6.1. Estimación del potencial energético del biogás generado en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira

El Relleno Sanitario La Glorita, ubicado en la Vereda La Suecia del Corregimiento de Combia Baja, comenzó a funcionar desde el año 1997 con una disposición de residuos de 164.250 ton/año situación que se conservo hasta el año 2007, año a partir del cual aumenta su disposición a 255.500 ton/año debido a que se sumaron 13 municipios más a este relleno sanitario (para efecto de cálculos se toma como un año equivalente a 365 días y un mes equivalente a 30 días).

Composición del biogás, según componentes			
CH ₄	CO ₂	Otros	Temperatura
59.8%	40.2%	1.0	21°C

Tabla 5. Composición del biogás. Relleno Sanitario “La Glorita”. Fuente: ETEISA, 2006.

Componente	Composición
Materia orgánica	55,5%
Plástico reciclable	3,60%
Cartón y papel	2,60%
Envase PET	3,40%
Vidrio	0,80%
Lata	1%
Textiles, telas, cuero, algodón	8,60%
Plástico inservible	13,20%
Papel no reciclable	1,20%
Icopor	1%
Algodón desechable (pañales y otros)	3,10%
Empaques tetrapack	1,60%
Hojas, escombros y otros sin clasificar	1,20%

Tabla 6. Composición de RSU de relleno sanitario de Pereira. Fuente: Empresa de Aseo de Pereira S.A E.S.P, Octubre de 2005.

A partir de la predicción obtenida por medio del modelo mexicano, se encuentra cuál es la cantidad de biogás producido por el relleno sanitario teniendo en cuenta la composición de sus residuos y basándose en la información suministrada por la tablas 5 y 6. Luego se determina el porcentaje de metano aprovechable contenido en el biogás, dependiendo de la eficiencia del sistema para la recuperación del CH₄.

Para efectos de cálculo de las posibles ganancias por ventas de bonos de carbón, se establece una equivalencia del CH₄ de 1.470 m³/ton para obtener cuál es la generación de metano en términos de su masa y no de su volumen.

Los valores típicos de eficiencia de los sistemas de recuperación de biogás se encuentran entre el 50 y 80% [24], entonces, se determina una eficiencia de recolección de biogás del 80%, a partir de la optimización de condiciones de operación y clausura, considerando que el sistema de recuperación es bastante eficiente.

Para encontrar los ingresos por la venta de bonos de carbón, es necesario determinar el impacto que tiene el CH₄ comparado con el CO₂ en cuanto a su contribución en el efecto invernadero, se tiene que esta relación es de 21 veces mayor para el metano.

En cuanto al valor unitario de los certificados de reducción de emisiones, se encuentra que éste fluctúa constantemente pues es establecido por la relación entre la oferta y la demanda en el mercado del carbón. Además, se debe tener en cuenta la aleatoriedad del precio del dólar en el mercado de divisas nacional, por tanto, para este trabajo se utiliza un precio de \$ 28.800/CER.

También se determina cual es el área de bosque necesario para consumir el dióxido de carbono equivalente producido por el relleno de no realizarse ninguna acción sobre él. Según el IPCC, asumiendo un ciclo de maduración forestal de 40 años y estimando una eficiencia forestal de 1,42 toneladas de carbono por hectárea al año, se estima una fijación de 5,2066 tonCO₂ por hectárea al año [25].

Año	Basura depositada (ton/año)	Basura acumulada (ton)	Total biogás (ton/año)	Generación de metano (m ³ /año)	Generación del metano (ton/año)	Recuperación de metano		Valor bonos (\$/año)	Bosque necesario (haCO ₂ eq)
						(ton/año)	(tCO ₂ eq/año)		
1997	164.250	0	0	0	0	0	0	0	0
1998	164.250	164.250	2.335	1.065.012	711	568	13.429	386.750.987	2.578
1999	164.250	328.500	4.491	2.048.143	1.366	1.093	25.825	743.767.146	4.957
2000	164.250	492.750	6.481	2.955.687	1.972	1.578	37.269	1.073.334.598	7.153
2001	164.250	657.000	8.317	3.793.455	2.531	2.025	47.832	1.377.563.700	9.181
2002	164.250	821.250	10.013	4.566.813	3.047	2.437	57.583	1.658.402.557	11.052
2003	164.250	985.500	11.578	5.280.712	3.523	2.818	66.585	1.917.649.496	12.780
2004	164.250	1.149.750	13.023	5.939.724	3.963	3.170	74.895	2.156.964.584	14.375
2005	164.250	1.314.000	14.357	6.548.069	4.369	3.495	82.565	2.377.880.254	15.847
2006	164.250	1.478.250	15.588	7.109.642	4.743	3.795	89.646	2.581.811.119	17.207
2007	164.250	1.642.500	16.725	7.628.039	5.089	4.071	96.183	2.770.063.035	18.461
2008	255.500	1.806.750	17.774	8.106.580	5.408	4.327	102.217	2.943.841.455	19.619
2009	255.500	2.062.250	20.040	9.140.003	6.098	4.878	115.247	3.319.120.816	22.120
2010	255.500	2.317.750	22.132	10.093.972	6.734	5.387	127.276	3.665.547.328	24.429
2011	255.500	2.573.250	24.063	10.974.597	7.322	5.857	138.380	3.985.339.304	26.560
2012	255.500	2.828.750	25.845	11.787.516	7.864	6.291	148.630	4.280.544.504	28.528
2013	255.500	3.084.250	27.490	12.537.934	8.365	6.692	158.092	4.553.053.250	30.344
2014	255.500	3.339.750	29.009	13.230.658	8.827	7.061	166.827	4.804.610.529	32.020
2015	255.500	3.595.250	30.411	13.870.123	9.253	7.403	174.890	5.036.827.164	33.568
2016	255.500	3.850.750	31.705	14.460.423	9.647	7.718	182.333	5.251.190.136	34.997
2017	255.500	4.106.250	32.900	15.005.339	10.011	8.009	189.204	5.449.072.100	36.316
2018	255.500	4.361.750	34.003	15.508.360	10.346	8.277	195.547	5.631.740.175	37.533
2019	255.500	4.617.250	35.021	15.972.707	10.656	8.525	201.402	5.800.364.061	38.657
2020	255.500	4.872.750	35.961	16.401.353	10.942	8.754	206.806	5.956.023.527	39.694
2021	255.500	5.128.250	36.829	16.797.043	11.206	8.965	211.796	6.099.715.324	40.652
2022	255.500	5.383.750	37.629	17.162.311	11.450	9.160	216.401	6.232.359.571	41.536
2023	0	5.639.250	38.369	17.499.496	11.675	9.340	220.653	6.354.805.644	42.352
2024	0	5.639.250	35.419	16.154.071	10.777	8.622	203.688	5.866.224.968	39.096
2025	0	5.639.250	32.696	14.912.087	9.949	7.959	188.028	5.415.208.160	36.090
2026	0	5.639.250	30.182	13.765.591	9.184	7.347	173.572	4.998.867.171	33.315
2027	0	5.639.250	27.861	12.707.242	8.478	6.782	160.227	4.614.535.999	30.754
2028	0	5.639.250	25.719	11.730.263	7.826	6.261	147.908	4.259.753.612	28.389
2029	0	5.639.250	23.742	10.828.397	7.224	5.779	136.536	3.932.248.191	26.207
2030	0	5.639.250	21.917	9.995.871	6.669	5.335	126.039	3.629.922.583	24.192
2031	0	5.639.250	20.232	9.227.352	6.156	4.925	116.349	3.350.840.872	22.332
2032	0	5.639.250	18.676	8.517.919	5.683	4.546	107.403	3.093.215.983	20.615
2033	0	5.639.250	17.240	7.863.030	5.246	4.197	99.146	2.855.398.237	19.030
2034	0	5.639.250	15.915	7.258.492	4.842	3.874	91.523	2.635.864.788	17.567
2035	0	5.639.250	14.691	6.700.432	4.470	3.576	84.486	2.433.209.873	16.216
2036	0	5.639.250	13.562	6.185.279	4.126	3.301	77.991	2.246.135.808	14.969
2037	0	5.639.250	12.519	5.709.732	3.809	3.047	71.995	2.073.444.680	13.819
2038	0	5.639.250	11.556	5.270.747	3.516	2.813	66.459	1.914.030.678	12.756
2039	0	5.639.250	10.668	4.865.513	3.246	2.597	61.350	1.766.873.006	11.775
2040	0	5.639.250	9.848	4.491.434	2.996	2.397	56.633	1.631.029.354	10.870
2041	0	5.639.250	9.091	4.146.116	2.766	2.213	52.279	1.505.629.858	10.034
2042	0	5.639.250	8.392	3.827.348	2.553	2.043	48.259	1.389.871.534	9.263
2043	0	5.639.250	7.747	3.533.087	2.357	1.886	44.549	1.283.013.132	8.551
2044	0	5.639.250	7.151	3.261.451	2.176	1.741	41.124	1.184.370.395	7.893
2045	0	5.639.250	6.601	3.010.698	2.009	1.607	37.962	1.093.311.672	7.286
2046	0	5.639.250	6.094	2.779.225	1.854	1.483	35.044	1.009.253.876	6.726
2047	0	5.639.250	5.625	2.565.548	1.712	1.369	32.349	931.658.750	6.209
2048	0	5.639.250	5.193	2.368.299	1.580	1.264	29.862	860.029.422	5.732
2049	0	5.639.250	4.793	2.186.216	1.459	1.167	27.566	793.907.218	5.291

Evaluación de la Generación de Biogás en Rellenos Sanitarios en Colombia en el Marco del Protocolo de Kyoto

Año	Basura depositada (ton/año)	Basura acumulada (ton)	Total biogás (ton/año)	Generación de metano (m ³ /año)	Generación del metano (ton/año)	Recuperación de metano		Valor bonos (\$/año)	Bosque necesario (haCO ₂ eq)
						(ton/año)	(tCO ₂ eq/año)		
2050	0	5.639.250	4.425	2.018.131	1.346	1.077	25.447	732.868.730	4.884
2051	0	5.639.250	4.085	1.862.970	1.243	994	23.490	676.523.104	4.509
2052	0	5.639.250	3.771	1.719.738	1.147	918	21.684	624.509.536	4.162
2053	0	5.639.250	3.481	1.587.518	1.059	847	20.017	576.494.962	3.842
2054	0	5.639.250	3.213	1.465.464	978	782	18.478	532.171.923	3.547
2055	0	5.639.250	2.966	1.352.794	903	722	17.058	491.256.601	3.274
2056	0	5.639.250	2.738	1.248.786	833	667	15.746	453.486.999	3.022
2057	0	5.639.250	2.528	1.152.775	769	615	14.535	418.621.261	2.790
2058	0	5.639.250	2.333	1.064.145	710	568	13.418	386.436.129	2.575
2059	0	5.639.250	2.154	982.330	655	524	12.386	356.725.508	2.377
2060	0	5.639.250	1.988	906.805	605	484	11.434	329.299.147	2.195
2061	0	5.639.250	1.835	837.086	558	447	10.555	303.981.426	2.026
2062	0	5.639.250	1.694	772.728	516	412	9.743	280.610.223	1.870
2063	0	5.639.250	1.564	713.318	476	381	8.994	259.035.884	1.726
2064	0	5.639.250	1.444	658.476	439	351	8.303	239.120.259	1.594
2065	0	5.639.250	1.333	607.850	406	324	7.664	220.735.820	1.471
2066	0	5.639.250	1.230	561.116	374	299	7.075	203.764.843	1.358
2067	0	5.639.250	1.136	517.975	346	276	6.531	188.098.658	1.254
2068	0	5.639.250	1.048	478.151	319	255	6.029	173.636.946	1.157
2069	0	5.639.250	968	441.389	294	236	5.566	160.287.103	1.068
2070	0	5.639.250	893	407.454	272	217	5.138	147.963.645	986
2071	0	5.639.250	825	376.127	251	201	4.743	136.587.659	910
2072	0	5.639.250	761	347.209	232	185	4.378	126.086.301	840
2073	0	5.639.250	703	320.514	214	171	4.041	116.392.325	776
2074	0	5.639.250	649	295.872	197	158	3.731	107.443.658	716
2075	0	5.639.250	599	273.124	182	146	3.444	99.182.997	661
2076	0	5.639.250	553	252.126	168	135	3.179	91.557.446	610
2077	0	5.639.250	510	232.741	155	124	2.935	84.518.175	563
2078	0	5.639.250	471	214.847	143	115	2.709	78.020.109	520
2079	0	5.639.250	435	198.329	132	106	2.501	72.021.638	480
2080	0	5.639.250	401	183.081	122	98	2.308	66.484.351	443
2081	0	5.639.250	371	169.005	113	90	2.131	61.372.791	409
2082	0	5.639.250	342	156.011	104	83	1.967	56.654.227	378
2083	0	5.639.250	316	144.016	96	77	1.816	52.298.443	349
2084	0	5.639.250	291	132.944	89	71	1.676	48.277.548	322
2085	0	5.639.250	269	122.723	82	65	1.547	44.565.793	297
2086	0	5.639.250	248	113.287	76	60	1.428	41.139.412	274
2087	0	5.639.250	229	104.577	70	56	1.319	37.976.464	253
2088	0	5.639.250	212	96.537	64	52	1.217	35.056.695	234
2089	0	5.639.250	195	89.115	59	48	1.124	32.361.408	216
2090	0	5.639.250	180	82.263	55	44	1.037	29.873.345	199
2091	0	5.639.250	167	75.939	51	41	958	27.576.573	184
2092	0	5.639.250	154	70.100	47	37	884	25.456.385	170
2093	0	5.639.250	142	64.711	43	35	816	23.499.205	157
2094	0	5.639.250	131	59.736	40	32	753	21.692.500	145
2095	0	5.639.250	121	55.143	37	29	695	20.024.702	133
2096	0	5.639.250	112	50.903	34	27	642	18.485.130	123
2097	0	5.639.250	103	46.990	31	25	592	17.063.925	114
2098	0	5.639.250	95	43.377	29	23	547	15.751.988	105
2099	0	5.639.250	88	40.042	27	21	505	14.540.918	97
2100	0	5.639.250	81	36.963	25	20	466	13.422.959	89
2101	0	5.639.250	75	34.121	23	18	430	12.390.953	83
2102	0	5.639.250	69	31.498	21	17	397	11.438.291	76

Año	Basura depositada (ton/año)	Basura acumulada (ton)	Total biogás (ton/año)	Generación de metano (m ³ /año)	Generación del metano (ton/año)	Recuperación de metano		Valor bonos (\$/año)	Bosque necesario (haCO ₂ eq)
						(ton/año)	(tCO ₂ eq/año)		
2103	0	5.639.250	64	29.076	19	16	367	10.558.874	70
2104	0	5.639.250	59	26.841	18	14	338	9.747.069	65
2105	0	5.639.250	54	24.777	17	13	312	8.997.679	60
2106	0	5.639.250	50	22.872	15	12	288	8.305.904	55
2107	0	5.639.250	46	21.114	14	11	266	7.667.316	51
2108	0	5.639.250	43	19.491	13	10	246	7.077.825	47
2109	0	5.639.250	39	17.992	12	10	227	6.533.656	44
2110	0	5.639.250	36	16.609	11	9	209	6.031.324	40
2111	0	5.639.250	34	15.332	10	8	193	5.567.614	37
2112	0	5.639.250	31	14.153	9	8	178	5.139.556	34
2113	0	5.639.250	29	13.065	9	7	165	4.744.408	32
2114	0	5.639.250	26	12.060	8	6	152	4.379.640	29
2115	0	5.639.250	24	11.133	7	6	140	4.042.918	27
2116	0	5.639.250	23	10.277	7	5	130	3.732.083	25
2117	0	5.639.250	21	9.487	6	5	120	3.445.147	23
2118	0	5.639.250	19	8.758	6	5	110	3.180.272	21
2119	0	5.639.250	18	8.084	5	4	102	2.935.761	20
2120	0	5.639.250	16	7.463	5	4	94	2.710.049	18
2121	0	5.639.250	15	6.889	5	4	87	2.501.690	17
2122	0	5.639.250	14	6.359	4	3	80	2.309.351	15
2123	0	5.639.250	13	5.870	4	3	74	2.131.800	14
2124	0	5.639.250	12	5.419	4	3	68	1.967.899	13
2125	0	5.639.250	11	5.002	3	3	63	1.816.600	12
2126	0	5.639.250	10	4.618	3	2	58	1.676.933	11
2127	0	5.639.250	9	4.263	3	2	54	1.548.004	10
2128	0	5.639.250	9	3.935	3	2	50	1.428.988	10
2129	0	5.639.250	8	3.633	2	2	46	1.319.122	9
2130	0	5.639.250	7	3.353	2	2	42	1.217.703	8
2131	0	5.639.250	7	3.095	2	2	39	1.124.082	7
2132	0	5.639.250	6	2.857	2	2	36	1.037.658	7
2133	0	5.639.250	6	2.638	2	1	33	957.879	6
2134	0	5.639.250	5	2.435	2	1	31	884.234	6
2135	0	5.639.250	5	2.248	1	1	28	816.251	5
2136	0	5.639.250	5	2.075	1	1	26	753.495	5
2137	0	5.639.250	4	1.915	1	1	24	695.563	5
Valor total de los CER =								\$ 153.511.128.488	

Tabla 7. Estimaciones frente al potencial de venta de CER según resultados de monitoreo de biogás de Relleno Sanitario "La Glorita" de Pereira.

Un primer análisis muestra que un proyecto de esta categoría obtiene beneficios económicos considerables pese a tratarse del uso de residuos orgánicos como materia prima para la generación de energía eléctrica. Además, por tratarse de un proyecto MDL, se percibirían ingresos adicionales de parte del gobierno nacional para la ejecución y operación del mismo, por lo que la relación total beneficio-costos sería mayor.

Los cálculos presentados muestran un significativo aporte ambiental de parte del proyecto, pues si el total de la basura depositada se acumulara en un año sería necesaria la disposición de 1.023.080 hectáreas de bosque para asumir la cantidad total de CH₄ generados en el relleno, sin considerar las hectáreas necesarias para asumir la cantidad de CO₂ asociado.

Otros beneficios asociados al proyecto, son los beneficios sociales, entre los cuales se considera el mejoramiento en la calidad de vida de las personas alrededor del relleno, disminución del desempleo y organización en el manejo de los residuos.

Por otro lado, para calcular el potencial energético del biogás de vertedero, es necesario determinar primero la cantidad de metano que se recupera de él, luego se multiplica esta cantidad por el poder calorífico del metano presentado en la ecuación (13).

$$PC_{CH_4} = 50050 \frac{kJ}{kg} \cdot \left(16,043 \frac{kg}{kmol} \right) \cdot \left(\frac{0,044643 kmol}{1m^3} \right) \cdot \left(\frac{2,778 \cdot 10^{-4} kWh}{1kJ} \right) \quad (13)$$

$$PC_{CH_4} = 9,958 \frac{kWh}{m^3}$$

6.2 Comportamiento histórico frente al desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira

La información suministrada por la Empresa de Aseo de Pereira S.A E.S.P permite concluir que a la fecha no se ha adelantado un estudio de factibilidad completo que permita concluir la viabilidad de un proyecto MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira. Sin embargo, se han adelantado los siguientes estudios:

Inicialmente se realizó el estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del biogas generado en el relleno sanitario “la glorita”, elaborado por la firma Estudios y Técnicas Especializadas en Ingeniería, S.A de C.V. – ETEISA (2006).

En este estudio se estimó la generación de biogás por un periodo de 15 años, a partir de los residuos dispuestos desde el inicio de operaciones (1997), hasta el 2005 (septiembre). La estimación de generación de biogás se calculó a partir del “Modelo Mexicano de Biogás”. El registro histórico de residuos depositados en el relleno sanitario “La Glorita” se hizo con valores promedios mensuales. Los monitoreos arrojaron la composición del biogás presentado en la tabla 5.

Los resultados se estructuraron a partir de tres escenarios:

Escenario 1: Para el año 2006 se esperaría una generación de biogás de 21,2 m³/min, equivalente a 2,7 millones de m³ de metano (con una eficiencia de extracción del 60%). El año de mayor generación sería el 2007, con 22,9 m³/min de biogás.

Escenario 2: Para el año 2006 se esperaría una generación de biogás de 26,5 m³/min, equivalente a 3,5 millones de m³ de metano (con una eficiencia de extracción del 75%). El año de mayor generación sería el 2007, con 22,9 m³/min de biogás.

Finalmente este estudio concluye que la posible viabilidad del proyecto MDL estaría condicionado al precio de los bonos en el mercado de 5 dólares por tonelada de CO₂ equivalente.

Posteriormente se realizó el monitoreo de biogás en el relleno sanitario, reportando una generación de 13.243 Ton.Eq.CO₂/Año para los vasos 3, 4, 5 y 6 (SINGEP. 2010), concluyendo la inviabilidad de un posible proyecto MDL.

El último estudio reportado (Lógica Eko. 2010) estima una generación de 76.000 Ton.Eq.CO₂/Año en el relleno sanitario, lo que representa alrededor de 1.500 millones de pesos en CER's, sin embargo en las conclusiones se reitera la inviabilidad de un proyecto MDL teniendo en cuenta el impacto por la operación de la planta de Biorgánicos.

6.3 Perspectivas de desarrollo de proyectos MDL en el relleno sanitario “La Glorita” de la ciudad de Pereira

Para la realización de la tabla 8, se establece un consumo promedio de energía por vivienda de 1.500 kWh/año, con base en un análisis realizado en varias viviendas de un sector de estrato bajo de la ciudad de Pereira.

Año	Basura depositada (ton/año)	Basura acumulada (ton)	Total biogás (ton/año)	Generación de metano (m ³ /año)	Recuperación de metano (m ³ /año)	Potencial de metano (kWh/año)	Potencial de metano (kWh/año)	Consumo vivienda (kWh/año)
1997	164.250	0	0	0	0	0	0	0
1998	164.250	164.250	2.335	1.065.012	852.010	8.484.315	3.224.040	2.149
1999	164.250	328.500	4.491	2.048.143	1.638.514	16.316.326	6.200.204	4.133
2000	164.250	492.750	6.481	2.955.687	2.364.549	23.546.182	8.947.549	5.965
2001	164.250	657.000	8.317	3.793.455	3.034.764	30.220.181	11.483.669	7.656
2002	164.250	821.250	10.013	4.566.813	3.653.450	36.381.059	13.824.802	9.217
2003	164.250	985.500	11.578	5.280.712	4.224.570	42.068.265	15.985.941	10.657
2004	164.250	1.149.750	13.023	5.939.724	4.751.779	47.318.219	17.980.923	11.987
2005	164.250	1.314.000	14.357	6.548.069	5.238.455	52.164.537	19.822.524	13.215
2006	164.250	1.478.250	15.588	7.109.642	5.687.714	56.638.252	21.522.536	14.348
2007	164.250	1.642.500	16.725	7.628.039	6.102.431	60.768.012	23.091.844	15.395
2008	255.500	1.806.750	17.774	8.106.580	6.485.264	64.580.260	24.540.499	16.360
2009	255.500	2.062.250	20.040	9.140.003	7.312.002	72.812.918	27.668.909	18.446
2010	255.500	2.317.750	22.132	10.093.972	8.075.178	80.412.619	30.556.795	20.371
2011	255.500	2.573.250	24.063	10.974.597	8.779.677	87.428.027	33.222.650	22.148
2012	255.500	2.828.750	25.845	11.787.516	9.430.013	93.904.065	35.683.545	23.789
2013	255.500	3.084.250	27.490	12.537.934	10.030.348	99.882.201	37.955.236	25.303
2014	255.500	3.339.750	29.009	13.230.658	10.584.527	105.400.717	40.052.272	26.702
2015	255.500	3.595.250	30.411	13.870.123	11.096.098	110.494.948	41.988.080	27.992
2016	255.500	3.850.750	31.705	14.460.423	11.568.339	115.197.517	43.775.057	29.183
2017	255.500	4.106.250	32.900	15.005.339	12.004.271	119.538.535	45.424.643	30.283
2018	255.500	4.361.750	34.003	15.508.360	12.406.688	123.545.800	46.947.404	31.298
2019	255.500	4.617.250	35.021	15.972.707	12.778.165	127.244.971	48.353.089	32.235
2020	255.500	4.872.750	35.961	16.401.353	13.121.082	130.659.737	49.650.700	33.100
2021	255.500	5.128.250	36.829	16.797.043	13.437.634	133.811.963	50.848.546	33.899
2022	255.500	5.383.750	37.629	17.162.311	13.729.849	136.721.834	51.954.297	34.636
2023	0	5.639.250	38.369	17.499.496	13.999.597	139.407.984	52.975.034	35.317
2024	0	5.639.250	35.419	16.154.071	12.923.257	128.689.789	48.902.120	32.601
2025	0	5.639.250	32.696	14.912.087	11.929.669	118.795.648	45.142.346	30.095
2026	0	5.639.250	30.182	13.765.591	11.012.473	109.662.205	41.671.638	27.781
2027	0	5.639.250	27.861	12.707.242	10.165.794	101.230.974	38.467.770	25.645
2028	0	5.639.250	25.719	11.730.263	9.384.210	93.447.966	35.510.227	23.673
2029	0	5.639.250	23.742	10.828.397	8.662.718	86.263.345	32.780.071	21.853
2030	0	5.639.250	21.917	9.995.871	7.996.697	79.631.104	30.259.820	20.173
2031	0	5.639.250	20.232	9.227.352	7.381.881	73.508.774	27.933.334	18.622
2032	0	5.639.250	18.676	8.517.919	6.814.335	67.857.151	25.785.717	17.190
2033	0	5.639.250	17.240	7.863.030	6.290.424	62.640.045	23.803.217	15.869
2034	0	5.639.250	15.915	7.258.492	5.806.793	57.824.050	21.973.139	14.649

Año	Basura depositada (ton/año)	Basura acumulada (ton)	Total biogás (ton/año)	Generación de metano (m ³ /año)	Recuperación de metano (m ³ /año)	Potencial de metano (kWh/año)	Potencial de metano (kWh/año)	Consumo vivienda (kWh/año)
2035	0	5.639.250	14.691	6.700.432	5.360.346	53.378.325	20.283.764	13.523
2036	0	5.639.250	13.562	6.185.279	4.948.223	49.274.405	18.724.274	12.483
2037	0	5.639.250	12.519	5.709.732	4.567.786	45.486.008	17.284.683	11.523
2038	0	5.639.250	11.556	5.270.747	4.216.598	41.988.878	15.955.774	10.637
2039	0	5.639.250	10.668	4.865.513	3.892.410	38.760.620	14.729.035	9.819
2040	0	5.639.250	9.848	4.491.434	3.593.147	35.780.562	13.596.613	9.064
2041	0	5.639.250	9.091	4.146.116	3.316.893	33.029.621	12.551.256	8.368
2042	0	5.639.250	8.392	3.827.348	3.061.878	30.490.183	11.586.270	7.724
2043	0	5.639.250	7.747	3.533.087	2.826.470	28.145.987	10.695.475	7.130
2044	0	5.639.250	7.151	3.261.451	2.609.161	25.982.020	9.873.168	6.582
2045	0	5.639.250	6.601	3.010.698	2.408.559	23.984.428	9.114.083	6.076
2046	0	5.639.250	6.094	2.779.225	2.223.380	22.140.417	8.413.359	5.609
2047	0	5.639.250	5.625	2.565.548	2.052.438	20.438.181	7.766.509	5.178
2048	0	5.639.250	5.193	2.368.299	1.894.639	18.866.819	7.169.391	4.780
2049	0	5.639.250	4.793	2.186.216	1.748.973	17.416.269	6.618.182	4.412
2050	0	5.639.250	4.425	2.018.131	1.614.505	16.077.243	6.109.352	4.073
2051	0	5.639.250	4.085	1.862.970	1.490.376	14.841.166	5.639.643	3.760
2052	0	5.639.250	3.771	1.719.738	1.375.791	13.700.122	5.206.047	3.471
2053	0	5.639.250	3.481	1.587.518	1.270.015	12.646.807	4.805.787	3.204
2054	0	5.639.250	3.213	1.465.464	1.172.371	11.674.474	4.436.300	2.958
2055	0	5.639.250	2.966	1.352.794	1.082.235	10.776.898	4.095.221	2.730
2056	0	5.639.250	2.738	1.248.786	999.029	9.948.331	3.780.366	2.520
2057	0	5.639.250	2.528	1.152.775	922.220	9.183.467	3.489.717	2.326
2058	0	5.639.250	2.333	1.064.145	851.316	8.477.408	3.221.415	2.148
2059	0	5.639.250	2.154	982.330	785.864	7.825.634	2.973.741	1.982
2060	0	5.639.250	1.988	906.805	725.444	7.223.971	2.745.109	1.830
2061	0	5.639.250	1.835	837.086	669.669	6.668.566	2.534.055	1.689
2062	0	5.639.250	1.694	772.728	618.183	6.155.862	2.339.228	1.559
2063	0	5.639.250	1.564	713.318	570.654	5.682.577	2.159.379	1.440
2064	0	5.639.250	1.444	658.476	526.780	5.245.679	1.993.358	1.329
2065	0	5.639.250	1.333	607.850	486.280	4.842.372	1.840.102	1.227
2066	0	5.639.250	1.230	561.116	448.893	4.470.073	1.698.628	1.132
2067	0	5.639.250	1.136	517.975	414.380	4.126.398	1.568.031	1.045
2068	0	5.639.250	1.048	478.151	382.521	3.809.145	1.447.475	965
2069	0	5.639.250	968	441.389	353.111	3.516.284	1.336.188	891
2070	0	5.639.250	893	407.454	325.963	3.245.939	1.233.457	822
2071	0	5.639.250	825	376.127	300.902	2.996.380	1.138.624	759
2072	0	5.639.250	761	347.209	277.767	2.766.007	1.051.083	701
2073	0	5.639.250	703	320.514	256.412	2.553.346	970.272	647
2074	0	5.639.250	649	295.872	236.698	2.357.036	895.674	597
2075	0	5.639.250	599	273.124	218.500	2.175.818	826.811	551
2076	0	5.639.250	553	252.126	201.700	2.008.533	763.243	509
2077	0	5.639.250	510	232.741	186.193	1.854.110	704.562	470
2078	0	5.639.250	471	214.847	171.878	1.711.559	650.392	434
2079	0	5.639.250	435	198.329	158.663	1.579.968	600.388	400
2080	0	5.639.250	401	183.081	146.465	1.458.495	554.228	369
2081	0	5.639.250	371	169.005	135.204	1.346.360	511.617	341
2082	0	5.639.250	342	156.011	124.809	1.242.847	472.282	315
2083	0	5.639.250	316	144.016	115.213	1.147.292	435.971	291
2084	0	5.639.250	291	132.944	106.355	1.059.084	402.452	268
2085	0	5.639.250	269	122.723	98.178	977.658	371.510	248
2086	0	5.639.250	248	113.287	90.630	902.492	342.947	229
2087	0	5.639.250	229	104.577	83.662	833.105	316.580	211

Año	Basura depositada (ton/año)	Basura acumulada (ton)	Total biogás (ton/año)	Generación de metano (m ³ /año)	Recuperación de metano (m ³ /año)	Potencial de metano (kWh/año)	Potencial de metano (kWh/año)	Consumo vivienda (kWh/año)
2088	0	5.639.250	212	96.537	77.230	769.053	292.240	195
2089	0	5.639.250	195	89.115	71.292	709.926	269.772	180
2090	0	5.639.250	180	82.263	65.811	655.344	249.031	166
2091	0	5.639.250	167	75.939	60.751	604.959	229.884	153
2092	0	5.639.250	154	70.100	56.080	558.447	212.210	141
2093	0	5.639.250	142	64.711	51.769	515.512	195.894	131
2094	0	5.639.250	131	59.736	47.788	475.877	180.833	121
2095	0	5.639.250	121	55.143	44.114	439.290	166.930	111
2096	0	5.639.250	112	50.903	40.723	405.516	154.096	103
2097	0	5.639.250	103	46.990	37.592	374.338	142.249	95
2098	0	5.639.250	95	43.377	34.702	345.558	131.312	88
2099	0	5.639.250	88	40.042	32.034	318.990	121.216	81
2100	0	5.639.250	81	36.963	29.571	294.465	111.897	75
2101	0	5.639.250	75	34.121	27.297	271.825	103.294	69
2102	0	5.639.250	69	31.498	25.198	250.926	95.352	64
2103	0	5.639.250	64	29.076	23.261	231.634	88.021	59
2104	0	5.639.250	59	26.841	21.473	213.825	81.254	54
2105	0	5.639.250	54	24.777	19.822	197.386	75.007	50
2106	0	5.639.250	50	22.872	18.298	182.210	69.240	46
2107	0	5.639.250	46	21.114	16.891	168.201	63.916	43
2108	0	5.639.250	43	19.491	15.592	155.269	59.002	39
2109	0	5.639.250	39	17.992	14.394	143.331	54.466	36
2110	0	5.639.250	36	16.609	13.287	132.312	50.278	34
2111	0	5.639.250	34	15.332	12.265	122.139	46.413	31
2112	0	5.639.250	31	14.153	11.322	112.749	42.844	29
2113	0	5.639.250	29	13.065	10.452	104.080	39.550	26
2114	0	5.639.250	26	12.060	9.648	96.078	36.510	24
2115	0	5.639.250	24	11.133	8.907	88.691	33.703	22
2116	0	5.639.250	23	10.277	8.222	81.872	31.111	21
2117	0	5.639.250	21	9.487	7.590	75.578	28.719	19
2118	0	5.639.250	19	8.758	7.006	69.767	26.511	18
2119	0	5.639.250	18	8.084	6.467	64.403	24.473	16
2120	0	5.639.250	16	7.463	5.970	59.451	22.592	15
2121	0	5.639.250	15	6.889	5.511	54.881	20.855	14
2122	0	5.639.250	14	6.359	5.087	50.661	19.251	13
2123	0	5.639.250	13	5.870	4.696	46.766	17.771	12
2124	0	5.639.250	12	5.419	4.335	43.171	16.405	11
2125	0	5.639.250	11	5.002	4.002	39.852	15.144	10
2126	0	5.639.250	10	4.618	3.694	36.788	13.979	9
2127	0	5.639.250	9	4.263	3.410	33.959	12.904	9
2128	0	5.639.250	9	3.935	3.148	31.348	11.912	8
2129	0	5.639.250	8	3.633	2.906	28.938	10.996	7
2130	0	5.639.250	7	3.353	2.683	26.713	10.151	7
2131	0	5.639.250	7	3.095	2.476	24.659	9.371	6
2132	0	5.639.250	6	2.857	2.286	22.764	8.650	6
2133	0	5.639.250	6	2.638	2.110	21.013	7.985	5
2134	0	5.639.250	5	2.435	1.948	19.398	7.371	5
2135	0	5.639.250	5	2.248	1.798	17.906	6.804	5
2136	0	5.639.250	5	2.075	1.660	16.530	6.281	4
2137	0	5.639.250	4	1.915	1.532	15.259	5.798	4

Tabla 8. Estimaciones del consumo del potencial energético para la alimentación de viviendas a partir del biogás producido en el Relleno Sanitario "La Glorita" de Pereira.

La tabla 8 muestra cómo es posible percibir ingresos adicionales por la venta de energía eléctrica al sistema de distribución local, esto se daría en común acuerdo con la empresa prestadora del servicio energético. Esta transformación biogás-energía se puede realizar con una inversión relativamente baja, si se tiene en cuenta para tal fin el uso de generadores eléctricos impulsados por máquinas de combustión interna, las cuales se consideraron con una eficiencia de conversión del 38%.

Lo que se pretende con un proyecto de este tipo, es utilizar un gas combustible que está siendo desperdiciado, de modo que se pueda aprovechar el potencial energético del metano contenido en el biogás del relleno sanitario para la generación de electricidad.

Cabe resaltar que una parte de la energía producida sería destinada para la alimentación de la planta de recolección y procesamiento de los residuos.

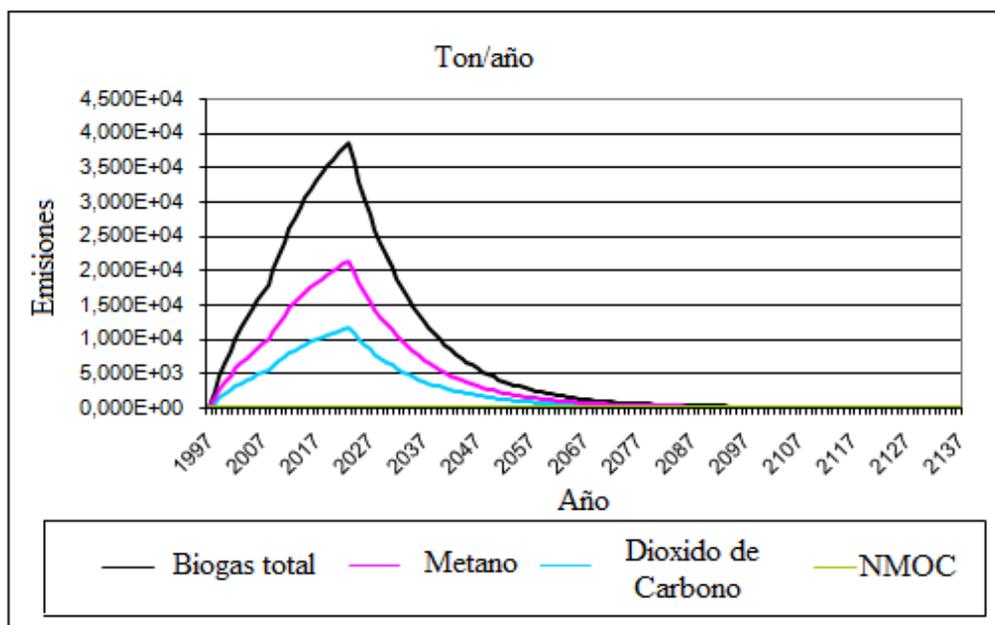


Figura 9. Comportamiento de producción de biogás en el Relleno Sanitario "la Glorita".

Un estudio de viabilidad, indica que el proyecto evaluado a 3, 5 y 7 dólares por tonelada de CO₂ equivalente es viable antes de impuestos, después de éstos, únicamente es viable a partir de 5 dólares.

De la figura 8 se puede determinar que la producción de metano presenta su máxima generación en año 2022, tiempo en que se clausurara el relleno según el modelo presentado. También este es el punto donde se daría su máximo rendimiento, a partir de este punto comienza a descender la producción de gases en el relleno hasta llegar al punto en que solo generaría energía por su autosostenimiento, pero este es un proceso que lleva muchos años. Para un proyecto de este tipo, perfectamente se puede asegurar un aprovechamiento de alrededor de 20 años.

Con esta grafica se confirma que la producción de metano tiene la mayor composición e le biogás lo que favorece un proyecto de esta categoría, con estos objetivos de aprovechamiento energético.

7. Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados obtenidos nos permiten visualizar el potencial que ofrecen los Residuos Sólidos Urbanos depositados en los Rellenos Sanitarios y que pueden ser aprovechados en pro de un desarrollo social y ambiental, generando un bienestar a las comunidades que se encuentran a los alrededores de estos lugares.

Estos residuos producto de las actividades diarias (domésticas, comerciales e industriales), depositados en los rellenos colombianos presentan una composición muy variada, como son: vidrio, papel, cartón, plástico, entre otros, pero en su mayor porcentaje se encuentra la materia orgánica.

Esta característica permite que exista una mayor facilidad para el proceso de la degradación bacteriana por medio de la cual se genera el biogás. Así mismo, entre mayor sea el porcentaje de materia orgánica mayor será la cantidad de biogás generado, una de las condiciones importantes con las que en estos momentos el relleno sanitario La Glorita tiene a su favor.

Este gas es un problema que genera consecuencias graves ambientalmente, a largo plazo, pues el biogás producto de los residuos urbanos contiene dos de los principales gases de efecto invernadero en una concentración importante, como son el metano y el dióxido de carbono. Como se menciona en el documento, estos gases son causantes del efecto invernadero debido a que al ser liberados al ambiente se almacenan en la atmósfera, aumentando su concentración en la capa de ozono, y por sus propiedades, han ido aumentando la temperatura interna del planeta causando un gran número de desastres como sequías e inundaciones.

Dentro de las propiedades que presenta el metano esta su capacidad de efecto invernadero 21 veces mayor que la del dióxido de carbono, por eso se busca la oportunidad de disminuir el efecto que presenta el metano contenido en el biogás, con lo cual se presentan dos opciones. En primer lugar se plantea la opción de adecuar el relleno con una infraestructura que permita recolectar el biogás y quemarlo por medio de un conjunto de chimeneas mitigando el efecto del metano en la atmósfera sin mayores ingresos económicos. Como segunda medida se plantea la posibilidad de aprovechar el potencial energético del metano como fuente de energía primaria, realizando por medio de un grupo motor de combustión interna- generador la transformación a energía eléctrica, obteniendo ingresos adicionales asociados a la venta de electricidad, sin mencionar el autosostenimiento de la planta de producción.

Con respecto a la segunda opción, se observan beneficios adicionales inherentes al desarrollo mismo de la sociedad alrededor del relleno y del municipio, mostrando una imagen positiva por el interés hacia el medio ambiente.

Los proyectos MDL deben ser analizados por medio de diferentes modelos que permiten estimar su potencial y viabilidad. Cada modelo puede presentar información muy certera, todo depende de que tanta información se tenga del relleno, sus residuos y las condiciones de la región. Para este caso, se utiliza un modelo muy sencillo y que no requiere de mucha información y ofrece un resultado muy cercano a la realidad.

Con las herramientas y la información obtenida, se realiza un análisis económico de los beneficios recibidos por la venta de bonos de carbono. Beneficio que contribuye a que estos proyectos sean más factibles, además de los ingresos adicionales anteriormente mencionados, de los apoyos de entes gubernamentales y de las ayudas de la administración pública.

Por otro lado, otro factor que beneficia un proyecto de esta categoría, son las condiciones climáticas de la zona, como temperatura, precipitaciones y humedad, que incrementa el óptimo desarrollo y funcionamiento de las bacterias encargadas de generar este gas.

Uno de los problemas de las condiciones de los residuos sólidos, es el cambio en la composición de los residuos finales, debido al estilo vida actual. Esto es perjudicial y preocupante para la producción de biogás en el relleno porque entre menor sea la cantidad de material biodegradable que termina el relleno sanitario, menor será la cantidad de biogás generado y por ende el metano aprovechable. Lo que se puede plantear ante una situación como esta, es buscar el apoyo en campañas que intenten concientizar a las personas de la importancia de reciclar y reutilizar, lo que beneficiaría al relleno porque recibiría una mayor cantidad de residuos ricos en materia orgánica y por otro lado aumentaría la capacidad del relleno.

Una desventaja con estos proyectos, es el tiempo necesario para su ejecución, y de existir el apoyo del gobierno municipal o departamental, se debe replantear el mismo cada cambio de periodo administrativo.

Por último, cabe considerar el impacto social y ambiental sobre los sectores aledaños al relleno, los cuales son inevitables para un proyecto de esta índole.

- Contaminación odorífera y visual.
- Polución de las fuentes hídricas por exceso de lixiviados.
- Peligro en el tráfico vial de la vereda por el exceso de vehículos pesados que transportan la basura.
- Destrucción de los cultivos y la fauna del hábitat.
- El gorgoteo del gas metano sin chimeneas de alivio puede causar un estadillo letal. Hace falta un manejo racional de gases.
- Criadero de moscas y de roedores que invaden y contaminan el vecindario.
- Desvalorización de los predios vecinos.

Bibliografía

- [1].Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. “*Portafolio MDL en Colombia*” Revista Mundo Eléctrico Colombiano. Vol. 24 No. 80. pp 6-13. 2010.
- [2].VnzDaniel. “*Documental sobre el calentamiento global*”. Website <http://www.youtube.com/watch?v=lzf8yN1wo3o>. Visitado el 05/Ago/2010.
- [3].Planetatierra08. “*El Efecto Invernadero*”. Website visitado el 15-ago-2010. <http://www.youtube.com/watch?v=QD-18YqEPVM&feature=related>.
- [4].ICCP, Clima 2001, La base científica, Resumen técnico del Informe del Grupo de Trabajo I, p.38.
- [5].Ministerio de Medio Ambiente. “*El protocolo de Kyoto y su desarrollo Nacional*”. Oficina Asesora de Negociación Internacional. Santafé de Bogotá, D.C. 1998.
- [6].Ing.Rosalio Palomino, Universidad nacional San Luis Gonzaga de ICA, “efecto invernadero”. Website <http://www.scribd.com/doc/28694612/TERMODINAMICA-3>.
- [7].Secretaria de ambiente y desarrollo, formulación de un proyecto Y análisis de factibilidad Seminario Internacional Febrero 2007 “*Estudio de factibilidad*”.
- [8].PNUMA:” *El Mecanismo de Desarrollo Limpio*” Introducción al MDL” website <http://cd4cdm.org/Publications/brochure%20spanish/MDL%20Intro%20con.pdf> pag13.
- [9].Centro de fortalecimiento para el mejoramiento del desarrollo de Chile: “*Mecanismo de Desarrollo Limpio Objetivos del Mecanismo de Desarrollo Limpio*” website <http://www.cgfmdl.cl/informacion-general/mecanismo-de-desarrollo-limpio>.
- [10].GreenFacts” *Potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero (figuras IPCC TAR 2001)*” website <http://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/potencial-calentamiento-global.htm>.
- [11].Mitigación de Cambio Climático “*Sector Residuos - Implementación del MDL en Colombia Identificación de barreras para el sector bajo el MDL*” website http://slidefinder.net/P/Presentacion_MDL_Colombia_Uruguay_commpc/939464/p2.
- [12].Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. “*Portafolio MDL en Colombia*”. Revista Mundo Eléctrico Colombiano. Vol. 24 No. 80.pg14-16.
- [13].Grupo de investigación en modelación de sistemas ambientales, universidad del magdalena. “*Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitario*” website <http://www.uninorte.edu.co/divisiones/Ingenierias/IDS/upload/File/Memorias%20II-SIIR/3d-Camargo-Colombia-001.pdf>.

- [14]. “*historia de los rellenos sanitarios a nivel mundial y colombiano*” website: http://www2.epm.com.co/bibliotecaepm/biblioteca_virtual/documents/capitulo1.pdf.
- [15]. David Neira A. CORDELIM “*Guías para desarrollar el Documento de Diseño de Proyecto (PDD): contenido y aspectos críticos*”.
- [16]. Erika Mazo Osorio Ing. Sanitaria Relleno Curva de Rodas “*Estimación de la producción de biogás en rellenos sanitarios Factores que afectan la generación de biogás*” website <http://www.tecspar.org/Documentos/estimacionrelleno.pdf>.
- [17]. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, k2 ingeniería ltda. “*Manual de bases técnicas para el programa de inventarios de emisiones-cap5 técnicas de estimación de emisiones*” website http://www.minambiente.gov.co/documentos/4168_051009_bases_tecnicas.pdf.
- [18]. Ciro Serrano Camacho, “*Alternativas de utilización de biogás de rellenos sanitarios en Colombia*” proyecto final de máster, Fundación Universitaria Iberoamericana Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- [19]. El banco mundial “*estudio de pre-factibilidad de recuperación y utilización de biogás en el relleno sanitario la Esmeralda Manizales, Colombia*”.
- [20]. Análisis del “*proyecto de aprovechamiento energético de biogás del relleno sanitario doña juana*” en colombia (proyecto doña juana landfill gas-to-energy).
- [21]. Nuria Marti Ortega, “*procesos biológicos digestión anaerobia*” website <http://www.bookpump.com/dps/pdf-b/1123329b.pdf>.
- [22]. Brian Guzzone Programa Landfill Methane Outreach Agencia para la Protección del Ambiente “*Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás*”.
- [23]. Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, “*Termodinámica*” Cuarta Edición, McGraw-Hill Inc. México. C2003. pp. 692-694.
- [24]. L. M. Johannessen, “*Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills*” The International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank. 1999.
- [25]. Juan L. Doménech, “*Guía metodológica de la huella ecológica corporativa*” Centro argentino de estudios internacionales y desarrollo. Programa de recursos naturales. 2004.
- [26]. Darwin Hernández, Universidad Tecnológica de Pereira, Programa de Administración del Medio Ambiente. 2011.