



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**MODELO MEXICANO Y MÉTODO ESTEQUIOMÉTRICO PARA
LA ESTIMACIÓN DE BIOGÁS EN CENTRO, TABASCO**

TESIS

**Que para obtener el grado de
Maestro en ingeniería y protección
ambiental**

PRESENTA

Ing. Amb. Juan Carlos García Alvarado

DIRECTOR

Dr. José Ramón Laines Canepa

Villahermosa, Tabasco, Octubre de 2022



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 12 de Octubre de 2022

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. JUAN CARLOS GARCÍA ALVARADO** egresado de la Maestría en **INGENIERIA Y PROTECCION AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"MODELO MEXICANO Y MÉTODO ESTEQUIOMÉTRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOGAS EN CENTRO, TABASCO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



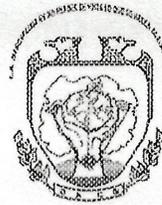
DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



PREJORSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

OCTUBRE 12 DE 2022

**C. JUAN CARLOS GARCÍA ALVARADO
PAS. DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y PROTECCIÓN
AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ingeniería y Protección Ambiental titulado: **"MODELO MEXICANO Y MÉTODO ESTEQUIOMÉTRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOGAS EN CENTRO, TABASCO"**, asesorado por el Dr. José Ramón Laines Canepa sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas, M.I.P.A. Luis Fernando Broca Martínez, Dr. José Ramón Laines Canepa, M. en C. José Luis Valencia Jiménez y M. en C. José Aurelio Sosa Oliver.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **“MODELO MEXICANO Y MÉTODO ESTEQUIOMÉTRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOGAS EN CENTRO, TABASCO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el día 12 de octubre del dos mil veintidós.

AUTORIZO



JUAN CARLOS GARCÍA ALVARADO



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ciencias
Biológicas

Jefatura de Posgrado



Ricardo
Flores
Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Villahermosa, Tabasco a 14 de diciembre de 2022

C. JUAN CARLOS GARCÍA ALVARADO

EGRESADO DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los documentos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados en el SNP-CONACyT.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones y el reporte de originalidad de su documento de tesis. Con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, el responsable del programa realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y emitió las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: **"Modelo mexicano y método estequiométrico para la estimación de biogás en Centro, Tabasco"**.

OBSERVACIONES:

1. **El índice de similitud obtenido fue de 19%**, el cual se ubica dentro del estándar de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT
2. El índice de similitud obtenido indica algunas coincidencias, éstas se refieren a frases y lenguaje propio del tema de investigación. No obstante, se recomienda al estudiante realizar un esfuerzo de síntesis en los párrafos con coincidencias mayores a 20 palabras.
3. Se adjunta el informe de originalidad de la tesis del C. Juan Carlos García Alvarado, realizado a través de la herramienta Turnitin iThenticate.
4. Es importante recordar que citar otros estudios implica de un análisis y síntesis de la información, que debe privilegiarse por encima del parafraseo y la cita textual. También, se debe indicar las fuentes de donde se obtuvieron las tablas e imágenes en caso de no ser de elaboración del autor.

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA

Tel. (993) 358-1500 Ext. 6407. Correo e: posgrado.dacbiol@ujat.mx





UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ciencias
Biológicas**

Jefatura de Posgrado



2022 Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

5. Finalmente, se le solicita al C. C. Juan Carlos García Alvarado, integrar en la versión final de tesis, este oficio e informe de originalidad.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

DR. ALLAN KEITH CRUZ RAMÍREZ
JEFATURA DE POSGRADO

UJAT



DIVISION ACADEMICA
CIENCIAS BIOLOGICAS
JEFATURA DE POSGRADO

C.C.P. Dr. José Ramón Laines Canepa. Director de Tesis.
Archivo



«Nuestra población y nuestro uso de los recursos finitos del planeta Tierra están creciendo exponencialmente, junto con nuestra capacidad técnica para cambiar el medio ambiente para bien o para mal.»

- **Stephen Hawking**



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida, las oportunidades que me brinda y la fortaleza para continuar en un camino de aprendizaje continuo.

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional, son mis fuerzas y motor de superación.

A mi casa de estudios, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por tener las puertas abiertas al crecimiento profesional de sus egresados.

A mi director de tesis, al Dr. José Ramon Laines Canepa por la oportunidad y apoyo para realizar este trabajo de investigación. Doctor, mi gratitud por su apoyo constante, dedicación y dirección para hacer posible esta investigación.

A mi comité sinodal por sus valiosas aportaciones para fortalecer este trabajo, estoy muy agradecido por el tiempo y dedicación, sus comentarios brindaron claridad en el desarrollo del trabajo y en los resultados obtenidos.

A mi amiga Martha Aurora, por su tiempo y apoyo para hacer posible la conclusión de este trabajo, te estaré siempre agradecido.

A quienes en el desarrollo de este trabajo brindaron sus aportaciones y expresaron su valioso conocimiento para fortalecer este documento.

Mi afecto y gratitud para todos, les estaré infinitamente agradecido.

Dios les Bendiga.



Índice

1. Introducción	6
2. Justificación	9
3. Antecedentes	11
4. Objetivos	14
4.1. Objetivo general	14
4.2. Objetivos específicos	14
5. Área de Estudio	15
5.1. Localización del relleno sanitario	15
6. Marco Teórico	17
6.1. Residuos sólidos urbanos	17
6.2. Sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.....	17
6.2.1. Tiradero a cielo abierto	17
6.2.2. Relleno Sanitario	17
6.3. Composición de los residuos sólidos	18
6.3.1. Composición de los residuos sólidos urbanos (RSU)	18
6.4. Propiedades químicas de los RSU.....	19
6.5. Análisis elemental de los componentes de los residuos sólidos	19
6.6. Digestión Anaerobia	21
6.7. Biogás	23
6.8. Método y modelos de generación de metano	26
6.8.1. Método de balance estequiométricos	26
6.8.2. Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0	28
7. Materiales y método	30
7.1. Muestreo	30
7.2. Método estequiométrico	33



7.2.1. Caracterización de los residuos.....	33
7.2.2. Análisis elemental.....	33
7.2.3. Cálculo de la estimación de producción de biogás.....	33
7.3. Modelo Mexicano de Biogás 2.0.....	34
7.3.1. Alimentación de la base de datos.....	34
8. Resultados y discusión.....	38
8.1. Determinación mediante el método estequiométrico, del volumen de biogás generado por la fracción orgánica.....	38
8.1.1. Caracterización de residuos.....	38
8.1.2. Análisis elemental.....	40
8.1.3. Determinación de la cantidad teórica total de metano y dióxido de carbono.....	41
8.2. Determinación de la producción teórica de biogás mediante el Modelo Mexicano de Biogás.....	43
8.3. Comparativa de la estimación de ambos métodos.....	44
9. Conclusiones.....	47
10. Recomendaciones.....	48
11. Referencias bibliográficas.....	49
Anexo A.....	55



Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del relleno sanitario del municipio de Centro.....	15
Figura 2 Esquema de operación del Relleno Sanitario del municipio de Centro..	16
Figura 3. Proceso de degradación de compuestos orgánicos para la producción de biogás, de acuerdo con Gujer & Zehnder, 1983.....	21
Figura 4. Curva de lixiviados y biogás.....	23
Figura 5. Inicio del recorrido del sitio.....	30
Figura 6. Sitio del muestreo dentro del Relleno Sanitario del Municipio del Centro	31
Figura 7. Hoja de alimentación del MMB.....	35
Figura 8. Entrevista al personal del Relleno Sanitario del Municipio de Centro	36
Figura 9. Hoja de caracterización de residuos del MMB	37
Figura 10. Comparativa de la estimación de la producción de biogás obtenida del MMB y el método estequiométrico, expresada en m ³ /h	46

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución estimada de los componentes de los RSU generados en una comunidad típica, excluyendo los residuos industriales y agrícolas de acuerdo con Tchobanoglous, 1994.....	18
Tabla 2	20
Tabla 3. Valores típicos para t y las constantes K1 y K2.....	28
Tabla 4. Caracterización de residuos realizada por la SERNAPAM (2010).	38
Tabla 5. Porcentaje en peso del total de residuos, clasificado por fuente generadora	39
Tabla 6. Resultados del análisis elemental, cenizas y humedad.....	40



1. Introducción

El biogás es el resultado de la descomposición de la materia orgánica presente en los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), los cuales sufren descomposición anaerobia. Este gas está compuesto por metano (CH_4) (40-70%) y el resto es CO_2 y trazas de otros gases y al quemarse es muy similar al gas LP, ya que no emite olor fétido ni desprende hollín (Tasneem y col., 2012).

El Protocolo de Kioto establece, mediante uno de sus objetivos principales, la limitación y/o reducción de las emisiones de metano en la gestión de los desechos, mediante su recuperación y reutilización (Naciones Unidas, 1998). En el caso de México, el Protocolo de Kioto fue firmado en 1998 y ratificado en el año 2000, adquiriendo el compromiso de reducir las emisiones de gases de invernadero.

En América Latina y el Caribe existen proyectos de captura y uso de biogás de relleno sanitario para el aprovechamiento energético de los RSU, en países como Argentina, Chile, Brasil y México, (Sáez y col., 2014).

En México sólo tres de los 196 Rellenos Sanitarios cuentan con Infraestructura para obtener energía eléctrica del biogás recuperado. Éstos se encuentran en las ciudades de Monterrey, Aguascalientes y Ciudad Juárez; sin embargo, en México existen al menos 85 Rellenos Sanitarios con el potencial para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento del biogás (COCEF, 2011).

La estimación de biogás mediante el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 (SCS Engineers, 2003) y método estequiométrico es una importante herramienta para el manejo de los rellenos sanitarios, sin embargo, tanto el método como el modelo son poco empleados.

Se han realizado diversos trabajos de investigación para la estimación de biogás en rellenos sanitarios mediante el uso de modelos de predicción que proveen proyecciones de generación y recuperación de biogás a corto y largo plazo.



La evaluación de las emisiones de biogás producidas por los rellenos sanitarios presenta complejidad, debido a las múltiples variables tanto espaciales como temporales que interfieren en el volumen generado, por lo que la aplicación y adaptación de los métodos de estimación resulta una aportación importante en el manejo de los rellenos sanitario en la actualidad.

Esta investigación se orienta en la estimación de la generación de biogás del relleno sanitario del municipio de Centro, Tabasco, mediante la aplicación del Modelo Mexicano de Biogás 2.0 y el Método Estequiométrico, y el resultado de este trabajo proveerá una herramienta acorde a las condiciones predominantes en el Estado de Tabasco para evaluar la factibilidad de recuperar y usar el biogás generado en el relleno sanitario, en beneficio del propietario y administrador del sitio de disposición final de residuos, con el cual podrá definir la viabilidad de establecer un proyecto enmarcado en Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), establecido en el Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998)



2. Justificación

Durante 2018, en México se generó un promedio de 107,055 ton de RSU, como consecuencia de las actividades productivas y la vida cotidiana (INEGI, 2018). Sin embargo, sólo el 78.53% se dispone en sitios de disposición final (SEMARNAT, 2017). Aunado a esto, los RSU no cuentan con una reinserción a la actividad económica, desestimando su valorización energética.

Un claro ejemplo del potencial de valorización energética de los RSU es la primera Central Eléctrica de Biogás, que es emitido por los residuos orgánicos y está ubicada en Monterrey, Nuevo León, México; produce 7.4 MW aprovechados para alumbrado público, bombeo de agua potable y alimentación eléctrica del Metro de Monterrey, donde se implementó el Modelo Mexicano del Biogás, una opción tecnológica y estratégica que, además de evitar emisiones tóxicas, abre el potencial para el “manejo limpio” de los casi 30 millones de toneladas de residuos producidos anualmente en las zonas urbanas del país (Arvizu y col., 2006).

La estimación de la generación de biogás en los sitios de disposición final de RSU en el municipio de Centro, permitirá conocer el potencial de generación de energía y, con base en estos resultados, se podrán formular medidas de mitigación que puedan adoptarse para la reducción de gases emitidos al ambiente, contribuyendo así, a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, con la posibilidad de ser sometidos como proyectos al Mecanismo de Desarrollo Limpio, permitiendo crear un sistema de comercio viable para ayudar a cumplir de manera eficiente con los compromisos de los países en esta materia, además de aumentar la viabilidad económica de los proyectos.

Por otro lado, las necesidades energéticas aumentan de acuerdo al crecimiento de las ciudades, y la producción alterna de energía puede contribuir a cubrir las demandas de energía.



La determinación del potencial de generación de biogás en sitios de disposición final del municipio de Centro, es importante desde el punto de vista económico, político y social, con el cual se permitirá planificar e invertir sobre bases firmes en los equipos necesarios para un eficaz aprovechamiento de los residuos y para reducir la emisiones de efecto invernadero, con fines de negocio (generación y venta de energía), ambientales (cuidado del entorno) y de impacto social (generación de fuentes de empleo), con la posibilidad de replicar este modelo en otros municipios.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



3. Antecedentes

Planta piloto IIE-SENER. Arvizu y col. (2006), llevaron a cabo la evaluación del potencial energético del biogás producido en rellenos sanitarios y sitios de disposición final de residuos sólidos en el Distrito Federal. Mediante la implementación de una Planta Piloto IIE-SENER, desarrollaron metodologías de laboratorio para la evaluación metanogénica de los residuos, así como el manejo de modelos matemáticos para predecir la producción de gas y energía.

Estimación de biogás en rellenos sanitarios del Estado de México. Cárdenas y col. (2014), desarrollaron la estimación de la producción de biogás en los sitios de disposición final de RSU en el Estado de México. Su investigación abarcó el análisis de 27 rellenos sanitarios, 19 vertederos y 42 basureros. Dicho estudio fue elaborado mediante el uso del modelo Mexicano de Biogás 2.0, estimando una producción de 173,308.40 ton de biogás para 2020.

Aplicación de modelos EPA e IPCC. Urrego y col. (2016), compararon la aplicación de los modelos de la EPA, mexicano e IPCC en la estimación del biogás en un relleno sanitario, simulando una degradación exponencial, demostrando que son una buena aproximación para conocer el fenómeno de estudio.

Generación de biogás en relleno sanitario de Santander, España. Chávez y col. (2017), calcularon el potencial de generación de biogás en un relleno sanitario ubicado en Santander, España, mediante el Modelo Colombiano de Biogás. Estimaron una producción de 2.503 m³/h de biogás,



teniendo en cuenta el factor de corrección de metano y una eficiencia de extracción del 73%.

Simulación de digestión anaerobia mediante el software ASPEN PLUS.

En 2018, Suárez y col. simularon el proceso de digestión anaerobia mediante el software ASPEN PLUS, para estimar la producción de biogás a partir de sustrato porcino. Se basaron en los procesos de formación del biogás, considerando las propiedades físicas de cada elemento, así como la estequiometría de las reacciones involucradas. Compararon los resultados experimentales con la estimación utilizando el software, obteniendo una diferencia de 0.2%.

Estimación de biogás mediante el modelo matemático LandGem.

Madrigal y col. (2018) calcularon la producción de biogás en el relleno sanitario de Juliaca, Perú, mediante el modelo matemático LandGem, estimando una producción de 29.925.493,1 m³/año.

Modelo colombiano del biogás. Andrade y col. (2018), utilizaron el modelo colombiano de biogás para estimar la producción de biogás en diferentes rellenos sanitarios, comparando lo estimado por el modelo con los resultados obtenidos mediante mediciones experimentales realizadas en el relleno sanitario, obteniendo resultados que indican que la estimación teórica es mayor que las mediciones experimentales.

Potencial de producción de biogás de la cáscara de naranja.

Echeverri (2019), calculó el potencial de producción de biogás de la cáscara de naranja, encontrando que el residuo tiene potencial para la producción de metano debido a su alta cantidad de material orgánico disponible, especialmente la



pectina, que resulta potenciadora para este proceso, mostrando entre 3 y 5 veces mayor producción de metano que las muestras sin el sustrato.

Comparación de MMB y modelo EPA. En 2019, Escamilla comparó el MMB y el modelo EPA con los resultados de una medición *in situ* en un relleno sanitario en el Estado de México, México, obteniendo diferencias significativas entre los modelos teóricos y las mediciones (*in situ* = 3355,99 m³/h, modelo EPA = 6270,57 m³/h, modelo mexicano = 8379,52 m³/h), afirmando que las variaciones en los valores obtenidos se deben a los parámetros que cada modelo asume, que discrepan ampliamente de las características reales de los rellenos sanitarios en México.

Comparación de Modelo Ecuatoriano de biogás y el modelo matemático LandGem. Guevara (2021), estimó la producción de biogás en el relleno sanitario del Complejo Ambiental Chasinato, en Ambato, Ecuador. Realizó la estimación mediante el Modelo Ecuatoriano de Biogás y lo comparó con los resultados obtenidos mediante el modelo matemático LandGem y el Modelo Ecuatoriano modificado, obteniendo que: para el modelo LandGEM una producción estimada de 934.24 m³ /h, para el modelo ecuatoriano se estimó un promedio de 1 112.73 m³ /h y para el modelo ecuatoriano modificado se obtuvo 1 607 m³ /h.



4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Estimar la generación de biogás utilizando el modelo mexicano y el método estequiométrico basado en valores reales de medición en el relleno sanitario del municipio de Centro, Tabasco.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar mediante el método estequiométrico, el volumen de biogás generado por la fracción orgánica en los residuos sólidos urbanos del municipio de Centro.
- Determinar mediante el Modelo Mexicano de Biogás 2.0, el volumen de biogás generado por la fracción orgánica en los residuos sólidos urbanos del municipio de Centro.
- Comparar los valores potenciales de generación de biogás obtenidos a través del modelo mexicano de biogás y método estequiométrico con los valores reales de generación de biogás en el relleno sanitario del municipio del Centro.

5. Área de Estudio

5.1. Localización del relleno sanitario

El estado de Tabasco se encuentra situado en el sureste del país, entre los $17^{\circ}15'00''$ y $18^{\circ}39'07''$ de latitud norte y los $90^{\circ}50'23''$ y $94^{\circ}07'49''$ de longitud oeste. Abarca una extensión de $24,475.24 \text{ km}^2$ y limita al norte con el Golfo de México, al noroeste con Campeche, al sureste con la República de Guatemala, al sur con Chiapas y al oeste con Veracruz (Figura 1).

El municipio de Centro es uno de los 17 municipios que conforman el estado mexicano de Tabasco, localizado en la región del río Grijalva y en la subregión del Centro (Figura 1). La cabecera municipal es la ciudad de Villahermosa, que también es capital del estado.

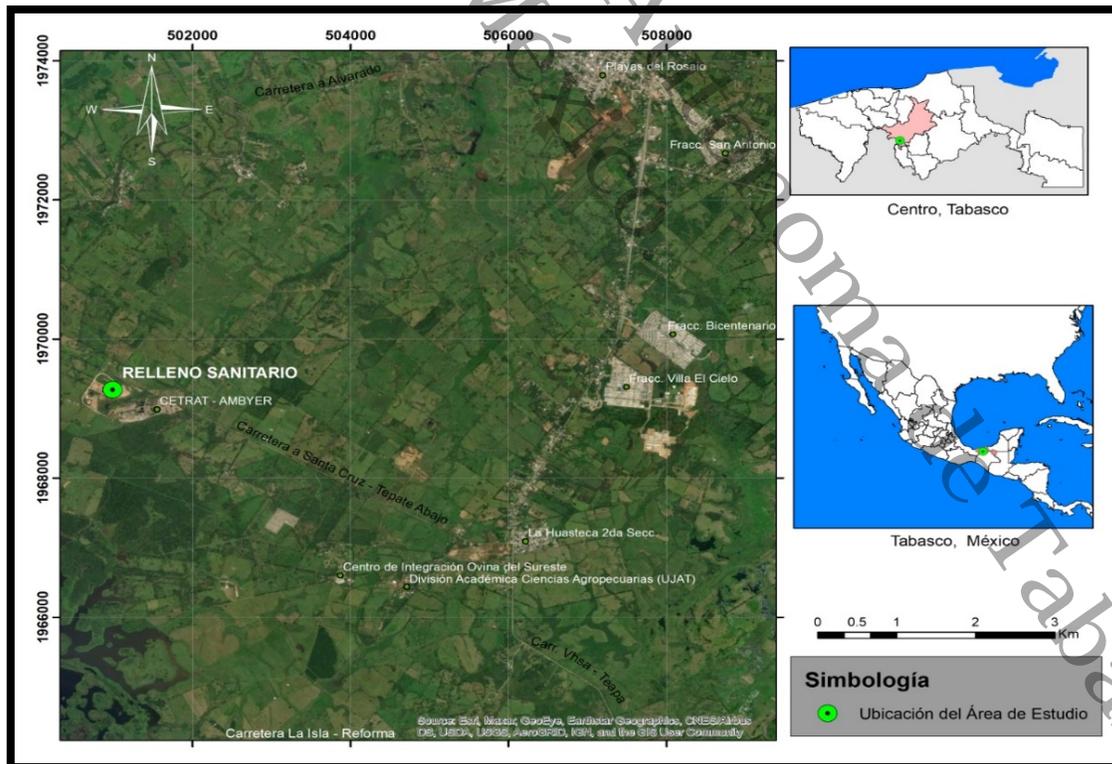


Figura 1. Ubicación del relleno sanitario del municipio de Centro

El relleno sanitario está ubicado en la carretera Villahermosa-Teapa km 25 R/a Alvarado Santa Irene, Segunda Sección y es de alta compactación con una superficie de 26 hectáreas (Figura 1). Este es un servicio concesionado, a partir de enero de 2008, a la empresa PASA (Promotora Ambiental de la Laguna S.A. de C.V.) desde el año 2003, por lo que el confinamiento es responsabilidad de la misma.

Su ubicación está en las siguientes coordenadas: $17^{\circ} 49' 24''$ N y $92^{\circ} 56' 18''$, colindando al Este con la empresa AMBYER y el Ejido Huasteca, al oeste con el municipio de Reforma, Chiapas, al Norte con la comunidad de Alvarito y al Sur con la población El Chilar, del municipio de Centro.

Brinda servicio a una población de 504,459 habitantes provenientes de treinta y nueve colonias, ciento diez fraccionamientos, un poblado, sesenta rancherías y siete villas, operando bajo el método combinado de área y trinchera.

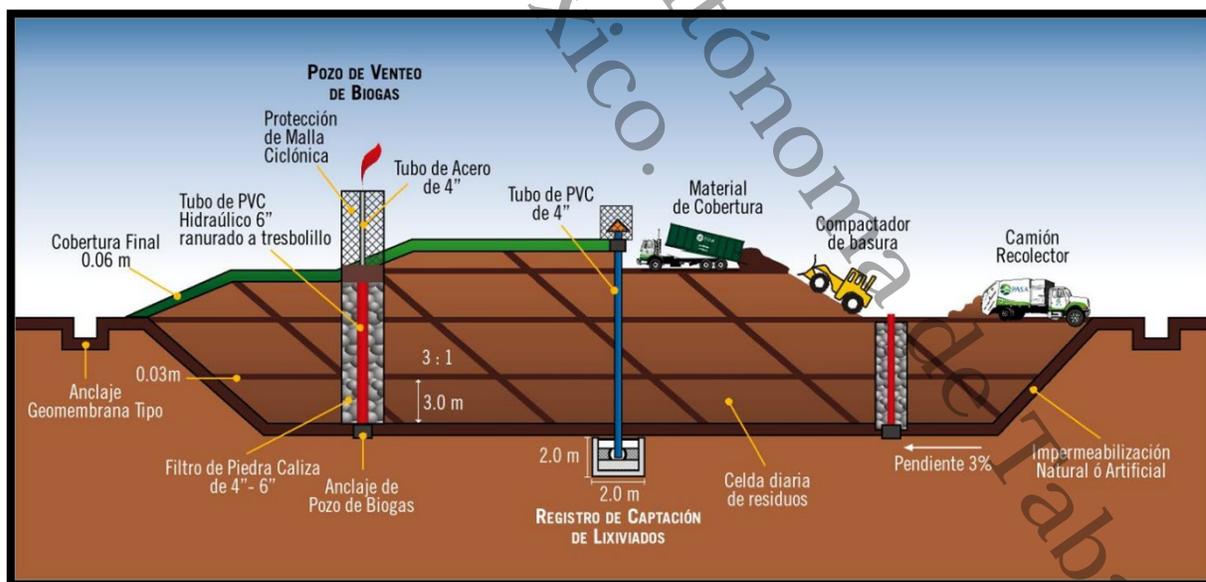


Figura 2. Esquema de operación del Relleno Sanitario del municipio de Centro (Promotora ambiental, S.A. de C.V., 2005)



6. Marco Teórico

6.1. Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos son aquellos generados como resultado de actividades domésticas e industriales, que no tienen lugar en la categoría de residuos peligrosos o residuos de manejo especial. La NOM-083-SEMARNAT-2003, define a los RSU como: "Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos."

6.2. Sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial

Son los lugares en donde se depositan los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en forma definitiva y son conocidos como:

6.2.1. Tiradero a cielo abierto

Es un sitio inadecuado de disposición final que no cumple con los requisitos establecidos en la NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

6.2.2. Relleno Sanitario

La obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructuras adicionales, los impactos ambientales. (SEMARNAT, 2003).



6.3. Composición de los residuos sólidos

Los RSU comprenden diversos componentes individuales que constituyen el flujo de residuos sólidos y su distribución relativa, usualmente basada en porcentajes por peso (Tchobanoglous, 1994). Es importante conocer la composición de los residuos para poder evaluar las necesidades de equipo, los sistemas y los programas y planes de gestión.

6.3.1. Composición de los residuos sólidos urbanos (RSU)

La distribución total del porcentaje de RSU que producen los rubros doméstico y comercial de una comunidad oscilan entre el 50 y 75% (Tchobanoglous, 1994). El porcentaje dependerá de las actividades económicas que se desempeñan, de la ubicación geográfica y del nivel socioeconómico, considerando los servicios municipales con que cuenta la comunidad y el poder adquisitivo de la misma.

Tabla 1. Distribución estimada de los componentes de los RSU generados en una comunidad típica, excluyendo los residuos industriales y agrícolas de acuerdo con Tchobanoglous, 1994.

Categoría de residuos	Porcentaje en peso	
	Rango(%)	Típico (%)
Domésticos y comerciales, excluyendo residuos especiales y peligrosos.	50-75	62.0
Especiales (artículos voluminosos, electrodomésticos de consumo, bienes de línea blanca, residuos de jardín recogidos separadamente, baterías, pilas, aceites y neumáticos.)	3-12	5
Peligrosos °	0.01-1.0	0.1
Institucionales	3-5	3.4
Construcción y demolición	8-20	14.0
Servicios municipales		
Limpiezas de calles	2-5	3.8
Árboles y paisajismo	2-5	3.0
Parques y zonas de recreo	1.5-3	2.0
Sumideros	0.5-1.2	0.7
Fangos de planta de tratamiento	3-8	6.0
Total		100.0



6.4. Propiedades químicas de los RSU

Son las propiedades químicas de los RSU las que darán la pauta para valorar las opciones de recuperación y transformación. Por ejemplo, es necesario distinguir entre residuos con características inflamables y no inflamables para determinar si la incineración es una opción viable en caso de su uso como combustible.

Destacan cuatro propiedades a reconocer en los RSU:

1. Análisis físico.
2. Punto de fusión de las cenizas.
3. Análisis elemental.
4. Contenido energético.

Cuando la fracción orgánica de los RSU se va a compostar o se va a utilizar como alimentación para la elaboración de otros productos de conversión biológica, no solamente será importante tener información sobre los elementos que componen los residuos mayoritariamente, sino también será importante tener información sobre los elementos en cantidades traza que se encuentran en los residuos.

6.5. Análisis elemental de los componentes de los residuos sólidos.

Un análisis elemental de los RSU tiene como propósito la determinación porcentual de la cantidad de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre (CHONS) y cenizas. Estos resultados permiten identificar la composición de los RSU orgánicos y determinar la relación elemental para los procesos biológicos, como la velocidad de degradación y conversión biológica.

Los materiales orgánicos presentes en los residuos sólidos pueden dividirse en dos clasificaciones: 1) aquellos materiales que se descomponen rápidamente (tres meses a cinco años) y 2) aquellos materiales que se descomponen lentamente (hasta 50 años o más). En la Tabla 2 se identifican los componentes de la fracción orgánica de los RSU de descomposición lenta y rápida.



Tabla 2
Constituyentes orgánicos rápida y lentamente biodegradables en los RSU, de acuerdo con Tchobanoglous, 1994.

Componente de residuos orgánicos	Rápidamente biodegradable	Lentamente biodegradable
Residuos de comida	Sí	
Periódicos	Sí	
Papel de oficina	Sí	
Cartón	Sí	
Plásticos ^a		
Textiles		Sí
Goma		Sí
Cuero		Sí
Residuos de jardín	Sí ^b	Sí ^c
Madera		Sí
Orgánicos misceláneos		Sí

^a Los plásticos generalmente son considerados como no biodegradables.

^b Hojas y recortes de césped. Normalmente, el 60 por 100 de los residuos de jardín son considerados como rápidamente biodegradables.

^c Porciones leñosas de los residuos de jardín.

6.6. Digestión Anaerobia

Para que los microorganismos puedan asimilar la materia orgánica ésta tiene que estar en solución acuosa. De modo que si se parte de un sólido particulado será necesaria una etapa de lisis de dicha partícula para pasar de la fase sólida a la líquida y posteriormente una hidrólisis de las moléculas complejas que las transforme en moléculas más simples que puedan ingresar al interior de las células. Posteriormente, ocurre una etapa de acidogénesis, y, en caso de que las distintas poblaciones anaerobias se establezcan, el proceso culmina con la metanogénesis en que se produce el biogás.

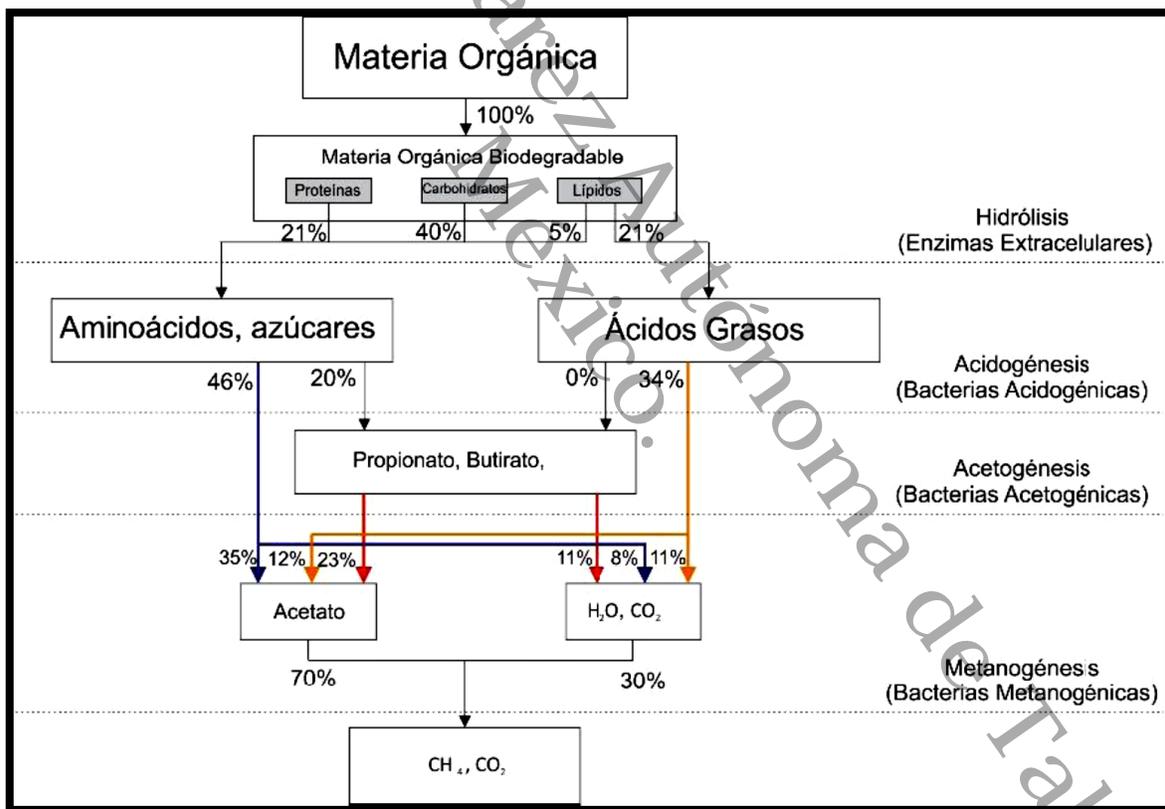


Figura 3. Proceso de degradación de compuestos orgánicos para la producción de biogás, de acuerdo con Gujer & Zehnder, 1983



En este modelo se considera un comportamiento homogéneo del material particulado y se restringe exclusivamente a la fracción orgánica. Se desprecia la incidencia de los microorganismos aerobios, suponiendo que el oxígeno atrapado inicialmente en los residuos se agota rápidamente y no se repone. Se asume una cinética global de hidrólisis de primer orden respecto al material particulado:

$$-\frac{dF}{dt} = k_h F$$

donde F = concentración de contaminante en la fase sólida (gDQO/LRSU húmedo)
y

kh = constante de hidrólisis del material particulado (d⁻¹)

La emisión de lixiviado y biogás varía tanto en caudal como en composición. Tomando un volumen de RSU puede seguirse la evolución de dichas emisiones en el tiempo. La forma general de las curvas se muestra en la figura 4, donde pueden identificarse cinco fases:

I) Fase de ajuste inicial. En esta fase ocurre la descomposición de los residuos mediante la acción de los microorganismos en condiciones aerobias

II) Fase de transición, se consume el oxígeno y se generan las condiciones anaerobias; comienza el descenso de pH;

III) Fase acidogénica, se alcanzan los picos de DQO (Demanda Química de Oxígeno) y AGV (Ácidos Grasos Volátiles) y el valor más bajo de pH;

IV) Fase metanogénica, se estabiliza la población metanogénica, las curvas descienden, debido a la degradación biológica que produce metano, se alcanzan valores de pH neutro;

V) Maduración, desciende la producción de biogás y en el lixiviado es baja la concentración de material biodegradable (Pohland y col., 1986).

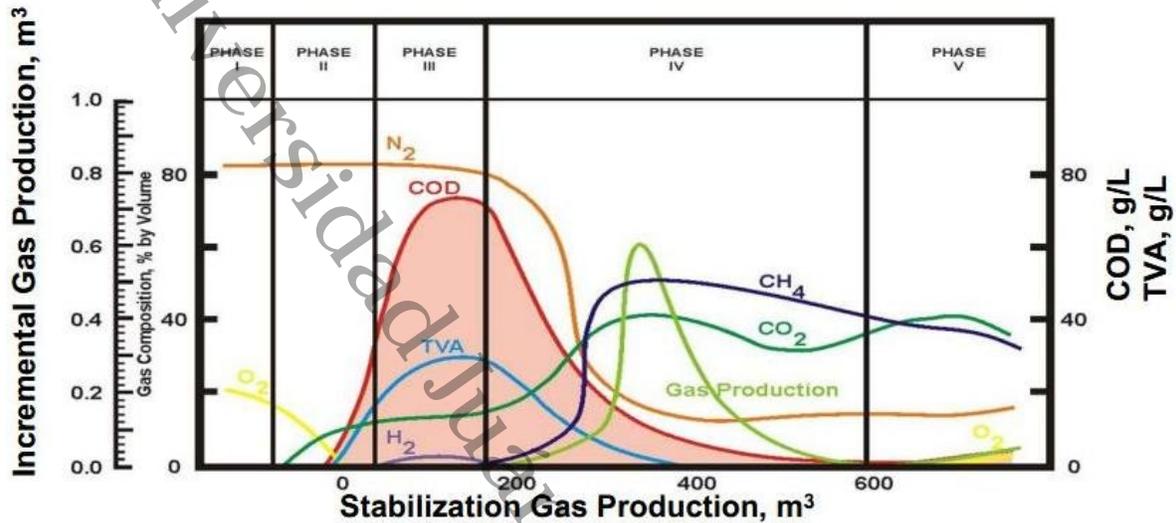


Figura 4. Curva de estabilización de la producción de biogás en un vertedero (Pohland y col., 1986)

Incremental gas production: incremento en la producción de gas

Gas composition: composición del gas

Phase I, II, III, IV, V: Fase I, II, III, IV, V

Stabilization gas production (m^3): estabilización de la producción de gas

COD: DQO (demanda química de oxígeno)

TVA: AVT (Ácidos volátiles totales)

6.7. Biogás

El biogás es una mezcla gaseosa resultado del proceso de descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos, constituida principalmente por metano y bióxido de carbono (Varnero, 2011).

Es un gas producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno). La generación de biogás forma parte de uno de los ciclos biogeoquímicos más importantes: el ciclo del carbono. La producción de metano es el resultado de una cadena de microorganismos que degradan material orgánico y devuelven los productos de la descomposición al medio ambiente. Este proceso que genera biogás es una fuente de energía renovable (Colmenares y col., 2014).



Se calcula que anualmente se liberan entre 590 y 880 millones de toneladas de metano a la atmósfera como consecuencia de la actividad microbiana. Cerca del 90% del metano emitido proviene de la descomposición de biomasa. El resto es de origen fósil, o sea relacionado con procesos petroquímicos (Varnero, 2011).

El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de alrededor de los 700 °C (Diésel 350 °C, gasolina y propano cerca de los 500 °C). La temperatura de la llama alcanza 870 °C (United Nations Environment Programme, 1981). El biogás está compuesto por alrededor de 60% de metano (CH_4) y 40% de dióxido de carbono (CO_2). El biogás contiene mínimas cantidades de otros gases, entre otros, 1% de ácido sulfhídrico (H_2S).

Entre más largo es el tiempo de retención, más alto es el contenido de metano, y con esto el poder calorífico. Con tiempos de retención cortos el contenido de metano puede disminuir hasta en un 50%. Con un contenido de metano mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable (United Nations Environment Program, 1981).

El biogás es una mezcla de gases compuesta principalmente de:

- ❖ Metano (CH_4): 40-70% del volumen.
- ❖ Dióxido de carbono (CO_2): 30-60% del volumen
- ❖ Otros gases: 1-5% del volumen, incluyendo hidrógeno (H_2): 0-1% y sulfuro de hidrógeno
- ❖ (H_2S): 0-3% y trazas de vapor de agua.

Como en cualquier otro gas, algunas de las propiedades características del biogás dependen de la presión y la temperatura además de ser afectadas por el contenido de humedad.

Los factores más importantes para caracterizar el biogás son los siguientes:

- ❖ Cómo cambia el volumen cuando cambian la presión y la temperatura,
- ❖ Cómo cambia el valor calorífico cuando cambian la temperatura, presión y/o contenido de agua, y



- ❖ Cómo cambia el contenido de vapor de agua cuando cambian la temperatura y/o la presión.

El valor calorífico del biogás es cerca de 6 kWh por metro cúbico. Es decir que un metro cúbico de biogás es equivalente a aproximadamente medio litro de combustible diésel (Monroy, 1990).

El biogás es explosivo e inflamable debido a su contenido de metano, por lo tanto, debe evacuarse de manera adecuada para evitar su dispersión e invasión a sitios colindantes al sitio de producción del biogás. De este modo se busca evitar incendios y explosiones, mismas que se han observado (Climate Action Reserve, 2009).

Si el CH₄ (metano) es explosivo en concentraciones entre 5 - 15 %, mientras que en concentraciones más elevadas de 15%, es inflamable. Otros impactos indeseables del gas de relleno consisten en la dispersión en el suelo, donde el metano puede dañar a las raíces de las plantas, impidiendo el suministro de la planta con oxígeno y aire. El metano también tiene un efecto tóxico en los seres humanos expuestos durante largo tiempo (por ejemplo, los obreros del relleno, recicladores trabajando en el relleno (Villarrubia y col., 2001). Además, el metano tiene alto impacto como gas de efecto invernadero.

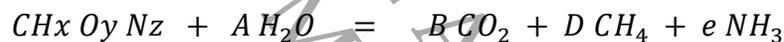


6.8. Método y modelos de generación de metano

La cantidad de los diferentes compuestos que forman el biogás se determinan utilizando la ecuación que rige la degradación de los RSM en la fase anaerobia, que es en la fase donde se produce la mayor parte del biogás. Cabe señalar que la producción de este gas no es a una misma tasa, ya que dependiendo del desarrollo de las condiciones anaerobias dentro de los RSM es la velocidad de producción. A continuación, se mencionan alguno de los modelos de generación de biogás existente.

6.8.1. Método de balance estequiométricos

1. Mediante Balances Estequiométricos a partir de la composición de la mezcla de residuos:



2. A partir de la Biodegradabilidad de los Materiales:

$$C_i = K * K' [W_t * (1 - M_i) * V_i] P_i$$

Donde:

C_i : Volumen de metano producido por el componente "i" (m^3)

W_t : Peso Total del residuo en base húmeda, (Kg)

P_i : Fracción del componente "i", con respecto al total del residuo en base húmeda.

M_i : Contenido de humedad, de la fracción del componente "i"

V_i : Fracción de los sólidos volátiles en base seca, del componente "i"

K : Constante (300 l de CH_4 /Kg de DQO)

K' : Constante (1.5 Kg de DQO/Kg de sólidos volátiles)



$$C = \sum C_i$$

Donde:

C : Volumen total de biogás que producen todos los componentes "i"

i : Indicador del componente respectivo

n : No. de componentes considerados

3. Empleando Modelos Matemáticos de 1er orden:

En una primera etapa la velocidad de producción de biogás, es directamente proporcional al volumen de gas producido.

$$dG / dt = K_1 G$$

Donde:

t : Tiempo en años

G : Volumen de gas producido antes de tiempo "t" (m³)

K1 : Constante de producción de gas en la primera etapa.

En la segunda etapa, la velocidad de producción de gas, es inversamente exponencial al tiempo.

$$dL / dt = -K_2 G$$

Donde:

L : Volumen de gas producido después del tiempo "t", (m³)

K2 : Constante de producción de gas en la segunda etapa.

Integrando las ecuaciones, se obtiene:

$$G = (L_0/2) \exp [-k_1 (t_1/2 - t)]$$

$$L = (L_0/2) \exp [-k_2 (t - t_1/2)]$$



Los valores Típicos para “t” y las constantes “K₁” y “K₂”, se indican a continuación:

Tabla 3. Valores típicos para t y las constantes K₁ y K₂

Tipo de Residuos	t	K ₁	K ₂
Residuos de fácil degradación	1	3.91	1.56
Residuos moderadamente degradables	2	1.96	0.978
Residuos recalcitrantes	20	0.196	0.0978

6.8.2. Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0

El modelo fue desarrollado por SCS Engineers bajo un contrato con el Programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la USEPA.

El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden, determinando que la generación de biogás llega a un pico después de cierto tiempo antes de generar metano. El modelo supone también que el periodo es de un año a partir de la colocación de los residuos y el comienzo de la generación de biogás. Supone que, por cada unidad de residuos, después de un año la generación disminuye exponencialmente mientras la fracción orgánica de los residuos es consumida (Aguilar y col., 2011).

Para sitios donde se conocen los índices de disposición año con año, el modelo permite estimar la generación de biogás en un año específico, por medio del uso de la siguiente ecuación publicada en el Código 40 de la Leyes Federales de los Estados Unidos, parte 60 Sección WWW (40 CFR 60 Subpart WWW)

$$Q_m = \sum_{i=1}^n 2KL_o M_i (e^{-kt_i})$$

Donde:

Q_m = Generación máxima de Biogás (m³/año)



$\sum_{i=1}^n$ = La suma desde el año de apertura +1 (i=1) hasta el año de producción

(n)

K = Índice de generación de metano (1/año)

Lo = Generación potencial de metano (m³/Mg)

Mi = Masa de residuos sólidos dispuestos en el año i (Mg)

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

La ecuación estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año. Proyecciones para años múltiples años, se desarrollan variando la proyección anual y luego iterando la ecuación (SCS Engineers, 2009).

El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición existente en los años finales). Con la excepción de los valores de K y Lo, el modelo mexicano de biogás requiere de datos específicos para producir las proyecciones de generación (Cárdenas y col., 2020).

Estos datos se obtienen mediante el llenado de cinco hojas de cálculo, la primera se alimenta con los datos del sitio de disposición final. La segunda con los datos de disposición y aprovechamiento de biogás, la tercera con la caracterización de los residuos y la cuarta y quinta con los resultados obtenidos del llenado de datos.

7. Materiales y método

7.1. Muestreo

Se acudió a una visita prospectiva a las instalaciones de la estación de transferencia del municipio de Centro para reconocimiento del sitio (figura 4).



Figura 5. Inicio del recorrido del sitio

Posteriormente se realizó el muestreo de los RSU en el relleno sanitario mediante el método descrito en la NMX-AA-15-1985, que establece el método de cuarteo para residuos sólidos municipales y la obtención de especímenes para los análisis en laboratorio (figura 5).



Figura 6. Relleno Sanitario del Municipio del Centro.

Se tomaron 50 kg de muestra, que se obtuvo del primer cuarteo. Se seleccionaron los subproductos depositándolos en bolsas de polietileno, de acuerdo con la siguiente clasificación:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1. Algodón | 14. Material ferroso |
| 2. Cartón | 15. Material no ferroso |
| 3. Cuero | 16. Papel |
| 4. Residuo fino (todo material que pase la criba M 2.00) | 17. Pañal desechable |
| 5. Envase de cartón encerado | 18. Plástico rígido y de película |
| 6. Fibra dura vegetal | 19. Poliuretano |
| 7. Fibras sintéticas | 20. Poliestireno expandido |
| 8. Hueso | 21. Residuos alimenticios |
| 9. Hule | 22. Residuos de jardinería |
| 10. Lata | 23. Trapo |
| 11. Loza y cerámica | 24. Vidrio de color |
| 12. Madera | 25. Vidrio transparente |
| 13. Material de construcción | 26. Otro |



Los subproductos ya clasificados se pesaron por separado en una balanza granataria. El porcentaje en peso de cada uno de los subproductos se calculó con la siguiente fórmula:

$$PS = \frac{G_1}{G} \times 100$$

En donde:

PS = Porcentaje del subproducto considerado.

G₁ = Peso del subproducto considerado, en kg; descontando el peso de la bolsa empleada.

G = Peso total de la muestra (mínimo 50 kg). (NMX-AA-15-1985).



7.2. Método estequiométrico

Para la determinación del volumen de biogás generado por la fracción orgánica en los residuos sólidos urbanos del municipio de Centro, mediante el método estequiométrico, se realizaron las siguientes actividades:

7.2.1. Caracterización de los residuos

La Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental realizó un diagnóstico estatal integral (SERNAPAM, 2010), en el que se incluyó la caracterización de los RSU que ingresan al Relleno Sanitario del Municipio de Centro, por lo que se utilizó esta información disponible.

7.2.2. Análisis elemental

Se tomó una muestra compuesta de cada día de muestreo, se enviaron las muestras al laboratorio INTERTEK® para determinar los porcentajes de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre (CHONS) presentes en la composición de los residuos.

7.2.3. Cálculo de la estimación de producción de biogás

Conociendo la composición elemental de los residuos, se realizó un análisis de la composición química de la fracción orgánica presente en los RSU del municipio de Centro y se obtuvo una fórmula química siguiendo la metodología propuesta por George Tchobanoglous (1994). Se procedió al balance estequiométrico de la reacción para procesos anaerobios mediante una hoja de cálculo. Se obtuvo el porcentaje de los elementos principales presentes en los



RSU con y sin agua, y se calculó la composición molar, determinando las relaciones mol normalizadas.

7.3. Modelo Mexicano de Biogás 2.0

Para la determinación del volumen de biogás generado por la fracción orgánica en los residuos sólidos urbanos del municipio de Centro, mediante el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 (SCS Engineers, 2009), se realizaron las siguientes actividades:

7.3.1. Alimentación de la base de datos

El modelo mexicano de biogás comprende el llenado de una serie de datos obtenidos del funcionamiento del Relleno Sanitario del Municipio de Centro, contenidos en cinco hojas de cálculo de Excel®: la primera cuenta con 24 preguntas referentes a las condiciones del relleno sanitario, como nombre, ubicación, prácticas de diseño y manejo, año de apertura y estimado de clausura (figura 6). Se procedió al ingreso de los datos otorgados por el personal laboral del sitio, quienes proporcionaron la información correspondiente a las características y funcionamiento del sitio (figura 7).



Mexicano de Biogás v.2
Fecha: Marzo 2009

Modelo

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de EEUU



PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS			
PAGINA DE ALIMENTACION			
1	Nombre del Sitio:	Relleno Sanitario del Municipio de Centro	
2	Ciudad:	Villahermosa	
3	Estado:	Tabasco	
4	Región:	Sureste	1
5	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?	No	
6	Año de apertura del sitio:	1990	
7	Disposición anual del año más reciente:	100,000	Mg
8	Año de disposición (arriba):	2007	
9	Año de clausura o año de clausura proyectado:	2010	
10	Incremento anual estimado de la disposición:	2.0%	
11	Profundidad promedio del relleno sanitario:	12	M
12	Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario:	2	
13 ^a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	Si	
13b	Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en % del total:	30%	
13c	Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto del incendio:	1	
14	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):	2009	
15	Porcentaje del área con residuos con sistema de captura:	90%	
16	Porcentaje del área con residuos con cubierta final:	10%	
17	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:	20%	
18	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:	50%	
19	Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	20%	
20	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:	100%	
21	¿Se compactan los residuos regularmente?	Si	
22	¿La disposición de residuos se hace en un área específica?	No	
23 ^a	Existen afloramientos/bortes de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	No	
23b	Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?	No	
24	Eficiencia de captura estimada:	63%	

Figura 7. Hoja de alimentación del MMB

La hoja dos, referente a disposición y recuperación de biogás se llenó con los datos referentes a la eficiencia de captura y recuperación de biogás, obtenidos del sistema de captación ubicado en el relleno sanitario. Los datos fueron proporcionados por el personal.



Figura 8. Entrevista al personal del Relleno Sanitario del Municipio de Centro

Para el apartado de caracterización de residuos no se contaba con datos reales, por lo que se completó con datos obtenidos de estudios previos realizados por la Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental del estado de Tabasco, quien analiza la composición de los residuos en el caso específico del municipio de Centro, Tabasco dentro del Diagnóstico Integral Estatal (SERNAPAM, 2010).



Modelo Mexicano de Biogás v.2



Fecha: Marzo 2009

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de EEUU



Categoría de Residuo	Datos Específicos al Sitio
Comida	38.4%
Papel y Cartón	12.0%
Poda (jardines)	8.0%
Madera	1.0%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	1.0%
Textiles	4.0%
Papel Higiénico	3.0%
Otros Orgánicos	0.0%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	2.0%
Metales	3.0%
Construcción y Demolición	10.0%
Vidrio y Cerámica	5.0%
Plásticos	10.0%
Otros Inorgánicos	2.6%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	38.8%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	11.0%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	16.0%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	2.0%
Total Orgánicos	67.8%
Total Inorgánicos	32.2%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	70%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	50%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	7%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	12%
Residuos en Estados Unidos - % de orgánicos secos	
Lo de degradación rápida calculado	69
Lo de degradación moderadamente rápida calculado	115
Lo de degradación moderadamente lenta calculado	214
Lo de degradación lenta calculado	202

Figura 9. Hoja de caracterización de residuos del MMB

Las dos hojas restantes son las que arrojan los resultados del MMB de acuerdo a los datos de alimentación; en la hoja cuatro los resultados están concentrados en tablas, mientras que en la hoja cinco, están representados en gráficas.



8. Resultados y discusión

8.1. Determinación mediante el método estequiométrico, del volumen de biogás generado por la fracción orgánica.

8.1.1. Caracterización de residuos

De acuerdo con la caracterización realizada por la Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental (2010), los RSU en el municipio de Centro se componen de la siguiente manera (Tabla 4):

Tabla 4. Caracterización de residuos realizada por la SERNAPAM (2010).

Residuo	Porcentaje en peso (%)
Comida	15.87
Papel y Cartón	14.62
Poda (jardines)	12.50
Madera	1.12
Caucho, Piel, Huesos y Paja	1.98
Textiles	5.72
Papel Higiénico	4.25
Otros Orgánicos	0.01
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	6.84
Metales	3.25
Construcción y Demolición	2.20
Vidrio y Cerámica	3.69
Plásticos	10.5
Otros Inorgánicos	17.41
	100



De acuerdo con la caracterización, los residuos apropiados para la producción de biogás encontrados en el Relleno Sanitario son los que contienen una mayor fracción orgánica (Tabla 5).

Tabla 5. Por ciento en peso del total de residuos, clasificado por fuente generadora

Subproducto	Residencial	Media	Popular	Interés social	Rural	Promedio
	% en peso	% en peso	% en peso	% en peso	% en peso	% en peso
Algodón	0	0	0.1	0	0	0
Cartón	5.8	5.0	4.7	4.8	9.9	6.0
Cuero	0.6	0.3	0.7	0.3	0.5	0.5
Cartón encerado	3.0	2.1	2.1	2.3	4.5	2.8
Fibra dura vegetal	0	0	0	0	0	0
Hueso	0.3	1.0	0.4	0.8	1.6	0.8
Hule	0.2	0.1	0.6	1.0	1.8	0.7
Madera	0.4	1.2	0.9	2.0	1.1	1.1
Papel	4.8	7.0	7.0	5.2	5.0	5.8
Residuos alimenticios	16.2	16.4	16.2	18.1	12.5	15.9
Residuos de jardinería	14.5	11.4	12.4	11.8	12.3	12.5
Trapo	3.1	2.9	2.9	2.5	2.7	2.8
Papel higiénico	3.6	4.9	4.8	4.5	3.5	4.3
						53.2

Estos datos son coincidentes con lo reportado por López-Ocaña y col. (2008), que manejan porcentajes muy similares a los obtenidos por la SERNAPAM en 2010, con algunas variaciones que indican un ligero aumento en el porcentaje de residuos orgánicos, lo que puede deberse al incremento poblacional acaecido de 2008 a 2010.



8.1.2. Análisis elemental, cenizas y humedad

Los resultados enviados por el laboratorio Intertek (Anexo A) se concentraron en la siguiente tabla (tabla 6):

Tabla 6. Resultados del análisis elemental, cenizas y humedad

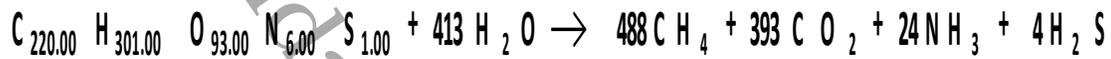
Compuesto		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Valor Promedio
		11-oct-10	12-oct-10	13-oct-10	14-oct-10	15-oct-10	16-oct-10	17-oct-10	
Carbono	C	47.88	51.67	48.74	49.98	50.89	51.23	50.67	50.15
Hidrogeno	H	5.50	5.94	5.60	5.75	5.85	5.89	5.85	5.77
Oxigeno	O	26.57	29.19	27.05	27.74	28.75	28.94	28.63	28.13
Nitrogeno	N	1.92	1.30	2.21	1.64	1.48	1.16	1.04	1.54
Azufre	S	0.53	0.47	0.63	0.64	0.71	0.61	0.69	0.61
Humedad	H ₂ O	69.49	68.27	75.32	69.64	72.03	77.08	61.14	70.42
Cenizas	Cen	16.02	10.02	14.51	12.57	8.75	8.99	8.43	11.33

El alto porcentaje de humedad y carbono sugieren la presencia mayoritaria de residuos de comida y de jardinería, que presentan mayor retención de agua, coincidente con los datos típicos publicados por Tchobanoglous (1994), lo que también se ve reflejado en los resultados de la caracterización de los residuos. Es importante mencionar que el muestreo se llevó a cabo en los meses de lluvias abundantes en la entidad, lo que puede influir en los porcentajes de humedad presentados. El alto contenido de humedad podría ser un factor que fomente la presencia de vectores biológicos en el relleno sanitario, lo que es un punto a considerar para el manejo del sitio.



8.1.3. Determinación de la cantidad teórica total de metano y dióxido de carbono.

La ecuación estequiométrica utilizada es la siguiente (Tchobanoglous, 1994):



Posterior al cálculo de la composición molar de los elementos y la determinación de las relaciones mol normalizadas, la ecuación quedó de la siguiente manera:



El peso seco de los residuos orgánicos se calculó restando el porcentaje de cenizas obtenido en los resultados proporcionados por laboratorio, quedando un peso total de 46.06 Kg/día. Tomando en cuenta que los pesos específicos del metano y dióxido de carbono son 0.718 y 1.978 Kg/m³, respectivamente, tenemos que:

$$\text{Producción de } CH_4 = (7832.4 \div 18201.36)(46.06) = 11.28 \text{ kg}$$

$$(11.28 \text{ Kg} \div 0.718 \text{ Kg/m}^3) = 15.71 \text{ m}^3 \text{ de } CH_4$$

$$\text{Producción de } CO_2 = (17296 \div 18201.36)(46.06) = 24.9 \text{ kg}$$

$$(24.9 \text{ Kg} \div 1.978 \text{ Kg/m}^3) = 12.59 \text{ m}^3 \text{ de } CO_2$$

$$\text{Producción de } NH_3 = (408.96 \div 18201.36)(46.06) = 0.589 \text{ kg}$$

$$(0.589 \div 0.7) = 0.84 \text{ m}^3 \text{ de } NH_3$$

$$\text{Producción de } H_2S = (136.36 \div 18201.36)(46.06) = 0.196 \text{ kg}$$

$$(0.196 \div 1.36) = 0.14 \text{ m}^3 \text{ de } H_2S$$



La cantidad teórica del gas generado por unidad en peso seco de la materia orgánica destruida es:

$$\begin{aligned} \text{Producción de biogás} &= \frac{15.71 \text{ m}^3 + 12.59 \text{ m}^3 + 0.84 \text{ m}^3 + 0.14 \text{ m}^3}{26.22 \text{ kg}} \\ &= 1.12 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{ de residuos} \end{aligned}$$

La cantidad teórica del gas generado por unidad en peso seco de la materia orgánica destruida es:

$$1.12 \frac{\text{m}^3}{\text{kg de residuos}}$$

La estimación que proporciona este método se basa en los residuos generados por día, lo que permite un cálculo basado específicamente en los datos reales obtenidos. Sin embargo, no permite realizar predicciones a mediano ni largo plazo.



8.2. Determinación de la producción teórica de biogás mediante el Modelo Mexicano de Biogás

Se realizó la estimación del biogás producido en el Relleno Sanitario del Municipio de Centro durante el año 2010 mediante el MMB,

Las hojas de resultados del MMB arrojan que, de acuerdo con los datos ingresados en la hoja de alimentación, disposición y recuperación de biogás y caracterización de residuos, la generación de biogás es de 881 m³/h.

Modelo Mexicano de Biogás v.2
Fecha: Marzo 2009
Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de EEUU

PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS
Relleno Sanitario del Municipio de Centro
Villahermosa, Tabasco

Año	Disposición (Mg/año)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Línea Base del Flujo de Biogás (m ³ /hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ eq/yr)
2007	168,000	168,000	0	0	0.0	100%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2008	169,700	337,700	355	209	6.3	100%	355	209	6.3	0.6	0	1,114	23,385
2009	171,400	509,100	643	379	11.5	100%	643	379	11.5	1.1	0	2,018	42,378
2010	173,100	682,200	881	519	15.7	100%	881	519	15.7	1.5	0	2,763	58,026
2011	174,800	857,000	1,080	636	19.3	100%	1,080	636	19.3	1.8	0	3,386	71,114
2012	176,500	1,033,500	1,249	735	22.3	100%	1,249	735	22.3	2.1	0	3,916	82,230
2013	178,300	1,211,800	1,394	821	24.9	100%	1,394	821	24.9	2.3	0	4,372	91,817
2014	180,100	1,391,900	1,522	896	27.2	100%	1,522	896	27.2	2.5	0	4,773	100,225
2015	181,900	1,573,800	1,635	963	29.2	100%	1,635	963	29.2	2.7	0	5,129	107,703
2016	183,700	1,757,500	1,738	1,023	31.1	100%	1,738	1,023	31.1	2.9	0	5,450	114,441
2017	185,500	1,943,000	1,831	1,078	32.7	100%	1,831	1,078	32.7	3.0	0	5,742	120,586
2018	187,400	2,130,400	1,917	1,128	34.3	100%	1,917	1,128	34.3	3.2	0	6,012	126,247
2019	189,300	2,319,700	1,997	1,175	35.7	100%	1,997	1,175	35.7	3.3	0	6,263	131,526
2020	191,200	2,510,900	2,072	1,220	37.0	100%	2,072	1,220	37.0	3.4	0	6,499	136,487
2021	193,100	2,704,000	2,144	1,262	38.3	100%	2,144	1,262	38.3	3.5	0	6,723	141,179
2022	195,000	2,899,000	2,211	1,302	39.5	100%	2,211	1,302	39.5	3.7	0	6,935	145,644
2023	197,000	3,096,000	2,276	1,340	40.7	100%	2,276	1,340	40.7	3.8	0	7,139	149,912
2024	199,000	3,295,000	2,339	1,377	41.8	100%	2,339	1,377	41.8	3.9	0	7,334	154,022
2025	201,000	3,496,000	2,399	1,412	42.9	100%	2,399	1,412	42.9	4.0	0	7,524	157,994
2026	203,000	3,699,000	2,457	1,446	43.9	100%	2,457	1,446	43.9	4.1	0	7,707	161,843
2027	205,000	3,904,000	2,514	1,480	44.9	100%	2,514	1,480	44.9	4.2	0	7,885	165,580
2028	0	3,904,000	2,569	1,512	45.9	100%	2,569	1,512	45.9	4.3	0	8,058	169,216
2029	0	3,904,000	2,186	1,286	39.1	100%	2,186	1,286	39.1	3.6	0	6,855	143,947
2030	0	3,904,000	1,883	1,108	33.7	100%	1,883	1,108	33.7	3.1	0	5,906	124,020
2031	0	3,904,000	1,642	967	29.3	100%	1,642	967	29.3	2.7	0	5,150	108,148
2032	0	3,904,000	1,448	852	25.9	100%	1,448	852	25.9	2.4	0	4,541	95,370
2033	0	3,904,000	1,290	759	23.1	100%	1,290	759	23.1	2.1	0	4,046	84,962
2034	0	3,904,000	1,160	683	20.7	100%	1,160	683	20.7	1.9	0	3,637	76,383
2035	0	3,904,000	1,051	610	18.8	100%	1,051	610	18.8	1.7	0	3,206	68,225

Alimentación | Disposición y Recup. de Biogás | Caracterización de Residuos | **Resultados-Tabla** | Resultados-Gráfica

Figura 10. Resultados de tabla MMB



Se puede apreciar que, el máximo de generación de biogás es de 2,569 m³/h, valor obtenido para el año 2028 (figura 11), año estimado para el abandono del Relleno Sanitario. A pesar de no contar con datos de disposición de RSU para este año, el MMB predice un aumento en la producción de biogás. Esto sucede porque el MMB supone que la generación en un sitio de disposición final aumenta entre mayor sea el tiempo de operación, incluso considerando que después de su operación, la producción continúa. Esto puede deberse a que aún después del cierre del sitio, los residuos se seguirán descomponiendo poco a poco (Cárdenas, 2014).

Proyecciones de Generación y Recuperación de Biogás del relleno sanitario del municipio de Centro, Tabasco.

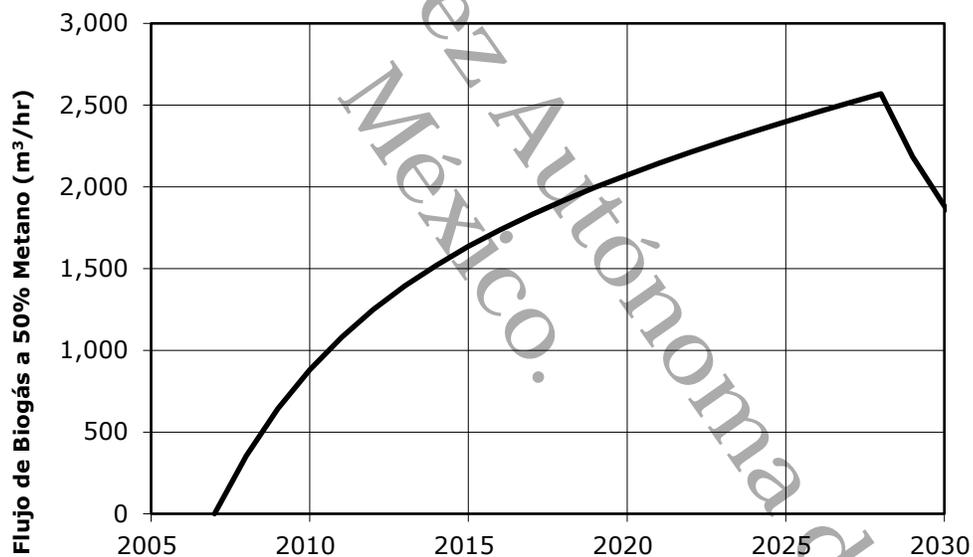


Figura 11 Proyección de generación de biogás al cierre del relleno sanitario del municipio de Centro, Tabasco, expresada en m³/h.



8.3. Comparativa de la estimación de ambos métodos

De acuerdo con lo reportado por la SERNAPAM (2010), en el municipio de Centro cada día se generan 672,057 kg de residuos, de los cuáles el 53.19% (tabla 5) son residuos utilizables para la producción de biogás (357,467 kg/día), estos contienen 71.04% (tabla 6) de humedad (103,522.48 kg/día) y 10.56% (tabla 6) de cenizas resultando 92,590.50 kg/día de residuos base seca sin cenizas, equivalente a 3,857.94 kg/h.

Si se considera que, de acuerdo con los resultados del método estequiométrico se producen 1.12 m³/kg, se obtiene una producción de 4,320.90 m³/h de biogás.

Se realizó la comparativa de los resultados obtenidos de la estimación de la producción de biogás, para poder evaluar las consideraciones y metodología que plantea cada método y de este modo optar por el método que permita una estimación más certera de la producción de biogás en el relleno sanitario del municipio de Centro, lo que nos conducirá a disminuir la incertidumbre en las producciones y orientar los recursos a la recolección y uso del biogás generado.

En la figura 11 se observa que el método estequiométrico estima una producción mayor de biogás, por encima de lo estimado mediante el MMB.

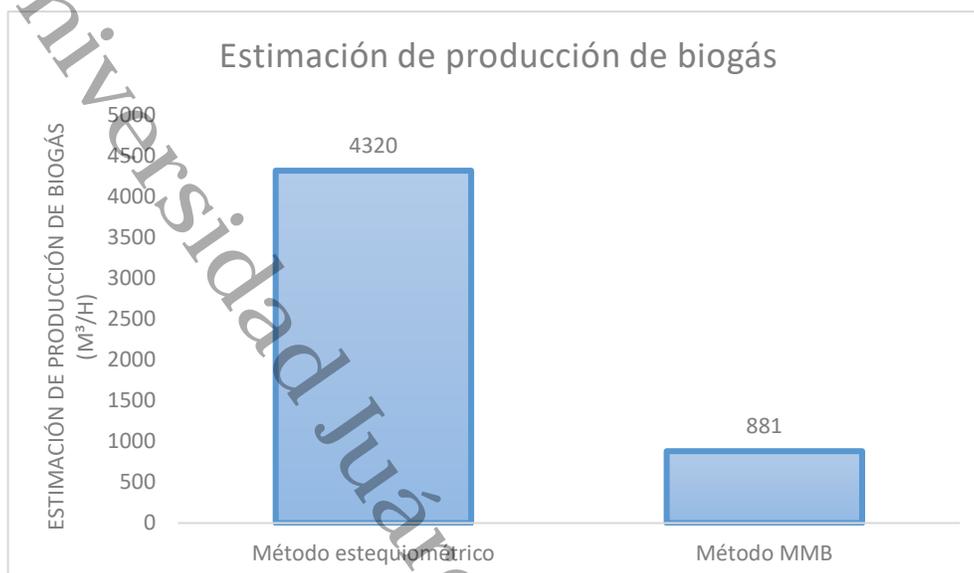


Figura 12. Comparativa de la estimación de la producción de biogás obtenida en el MMB para el año 2010 y el método estequiométrico, expresada en m³/h

Esto puede ser debido a que el método estequiométrico considera una producción de biogás bajo condiciones ideales, ignorando factores climáticos y ambientales, basando la estimación únicamente en el contenido elemental de los RSU.

Por otro lado, el MMB realiza una estimación de la producción de biogás de acuerdo con la ubicación geográfica, estiaje y temporada de lluvias, lo que proporciona datos con amplia diferencia entre ambas metodologías de estimación (Aguilar y col., 2011). Es importante aclarar que la precisión de la estimación en el MMB dependerá de los datos específicos del sitio, así como de la caracterización de los residuos ingresados, lo que permitirá la obtención de datos más precisos.



9. Conclusiones

1. El método estequiométrico estima una producción de biogás de 4,320.90 m³/h para el municipio de Centro.
2. De acuerdo con el MMB, la producción de biogás en el año 2010 es de 881 m³/h en el relleno sanitario del municipio de Centro.
3. De acuerdo con el MMB, la producción máxima de biogás es de 2,569 m³/h en el relleno sanitario del municipio de Centro, valor alcanzado en el año 2028.
4. Comparando ambos resultados, la estimación obtenida mediante el método estequiométrico es visiblemente mayor a la del MMB, posiblemente porque el método estequiométrico supone condiciones ideales, ignorando aspectos medioambientales.
5. Ninguno de los métodos para estimación de producción de biogás toma en cuenta las condiciones socioeconómicas que tienen impacto en la producción de residuos y que fluctúan con el paso del tiempo y la modificación de estilos de vida y actividades económicas regionales.
6. La producción de biogás a partir de los RSU depositados en el relleno sanitario del municipio de Centro es una fuente de energía que puede ser aprovechada implementando los elementos necesarios para su uso.



7. Recomendaciones

- Se recomienda al Organismo operador del Sistema de Manejo Integral del RSU en el Municipio de Centro, implementar la estimación de la producción de biogás como parte del manejo del relleno sanitario para poder generar un sistema de recolección de biogás que permita el aprovechamiento de este.
- Es importante el desarrollo de un método de estimación de producción de biogás que tome en cuenta los cambios en las condiciones sociales del municipio, lo que influye de manera considerable en la potencial producción de biogás en el relleno sanitario.
- Elaborar un estudio de aprovechamiento del potencial eléctrico del biogás generado va a permitir cuantificar los beneficios económicos del aprovechamiento de la producción estimada del biogás en el relleno sanitario del municipio de Centro, por lo que se recomienda su aplicación.
- Es recomendable que el H. Ayuntamiento del municipio de Centro tome en consideración la implementación de sistemas eléctricos híbridos para el aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario del municipio de Centro.



8. Referencias bibliográficas

Aguilar V., Q., Taboada G., P. A., Ojeda B., S., 2011. Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 15, No. 1, ISSN 1665-

Andrade, A., Restrepo, A., Tibaquirá, J.E., 2018. Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia. Entre Ciencia e Ingeniería, año 12 (vol 12), no. 23, página 40-47.

Arvizu F., J.L., Huacuz V., J.M., Saldaña M., J.L., 2006. Evaluación del potencial energético de los rellenos sanitarios. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica. Vol. 1 No. 1.

Cárdenas M., P.R., 2014. Estimación de biogás y lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos del Estado de México. Tesis de Maestría en Ciencias en Bioprocesos. Instituto Politécnico Nacional.

Cárdenas M., P.R., Piña G., A. B., Robles M., F., 2020. Estimación del biogás generado en sitios de disposición final del Estado de México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental Universidad Nacional Autónoma de México 37, 27-38.

Chávez, D. M., Duarte, O. M., Ramón, J. A., 2019. Valorización energética del biogás en un relleno sanitario. Revista ambiental Agua, aire y suelo. ISSN 1900-9178 Volumen 2. España.



Climate Action Reserve., 2009. Protocolo de Reporte de Proyectos en Rellenos Sanitarios en México. Ciudad de México: Climate Action Reserve.

Colmenares M., W., Santos B, K., 2014. Ingeniería Química. Recuperado de http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/relleno_sanitario

Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) México-USA, Asociación Internacional de Administración de Ciudades y Condados (ICMA) Latinoamérica, 2011. Guía para el Aprovechamiento o Quema del Biogás en Rellenos Sanitarios. Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de América.

Echeverri A., A., 2019. Determinación del potencial de producción de biogás y bioetanol del residuo de naranja. Tesis de licenciatura. Universidad de los Andes. Colombia.

Escamilla G., P.E., 2019. Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios. La Granja: revista de ciencias de la vida. pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596. Universidad Salesiana. Ecuador.

Guevara T., A. J., 2021. Evaluación del potencial de aprovechamiento energético del biogás residual generado por el relleno sanitario complejo ambiental Chasinato de la EPM-GIDSA. Tesis de licenciatura. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.



Gujer, W., Zehnder, A. (1983). Conversion Processes in Anaerobic Digestion. Water Science and Technology, 15(8-9), 127-167.

Instituto Nacional de Geografía y Estadística, 2020. Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente. Comunicado de prensa Núm 266/2020.

López O., G., Hernández B., J.R., Chacón N., J. G., Bautista M., R.G., 2008. La generación de residuos sólidos urbanos en el municipio de Centro, Tabasco. Kuxulkab' Revista de divulgación de la División académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Volumen XIV Número 26: 55-64 ISSN 1665-0514.

Madrigal P., G.B., Quispe S., J.J., Vargas H., 2018. Cálculo de la generación de biogás para el relleno sanitario de la ciudad de Juliaca, utilizando el modelo LandGEM Versión 3.02 de la USEPA y estimación del potencial de producción eléctrica. Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo Volumen 4 Número (2): 42 – 55.

Monroy H. O. y G. Viegra G. 1990. Biotecnología para el Aprovechamiento de los Desperdicios Orgánicos. Ed. AGT EDITOR, S.A. México. 260 pp.

Organización de las Naciones Unidas. 1998. Protocolo de Kyoto sobre Cambio Climático. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>



Pohland, F.G. y Harper, S., 1986. Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production from Landfills. EPA-600/2-86-073. Washington D.C

Sáez, A., Urdaneta G., J. A., 2014. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Omnia, 20 (3), 121-135

SCS Engineers (2009). Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0. USEPA. Tomado de:

http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/manual_del_usuario_modelo_mexicano_de_biogas_v2_2009.pdf 07/12/2009

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1985. Norma mexicana NMX-AA-015-1985. Contaminación del suelo- residuos sólidos municipales – muestreo- método de cuarteo. Dirección general de normas. México.

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1985. Norma mexicana NMX-AA-019-1985. Método de prueba para determinar el peso volumétrico de los residuos sólidos. Dirección general de normas. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017. Blog informativo. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>. México.



Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Tabasco, 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. México.

Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, 2009. Diagnóstico Integral Estatal y 3 Estudios de Factibilidad Técnica, Financiera, Ambiental y Evaluación Socioeconómica. Gobierno del Estado de Tabasco.

Suárez C., V.D., López D., I., Álvarez G., M., 2018. Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. Revista Centro Azúcar vol. 46. Cuba.

Tasneem, A, Tauseef, SM y Abbasi, SA, 2012. Digestión anaeróbica para el control del calentamiento global y la generación de energía: una descripción general ", Revisiones de energía renovable y sostenible , Elsevier, vol. 16(5), páginas 3228-3242.

Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S.A., 1994. Gestión integral de residuos sólidos Vol. 1. McGrawHill.

Urrego M., E. y Rodríguez M., J.P., 2016. Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario Doña



Juana, Bogotá, Colombia. Universidad Salud, Pasto, v. 18, n. 2, pág. 338-344, agosto de 2016. Colombia.

Varnero, M.T., 2011. Manual de biogás. Proyecto CHI/00/G32 "Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables". Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility.

Villarrubia, M., Villarrubia, J., 2001. Producción de biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU). Montajes e instalaciones. Madrid. Vol.31, no.355.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



Anexo A

Resultados de Muestras Analizadas por Intertek Testing Services, Laboratorios Ambientales, México.



REPORTE DE RESULTADOS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

RESULTADOS DE MUESTRAS ANALIZADAS POR
INTERTEK TESTING SERVICES
LABORATORIOS AMBIENTALES
MÉXICO

ABREVIATURAS UTILIZADAS EN ESTE REPORTE

REPORTE ELABORADO PARA: Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.
Sindicato Agrario No. 309, Adolfo López Mateos (Centro),
Villahermosa, Tabasco

ATENCIÓN: Paolina Barradas
FECHA DE MUESTREO: 2010-10-11,12

[Handwritten signature]
Signatario / Cargo

Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V.
Poniente 134 No. 860, Col. Industrial Vallejo
C.P. 02300, Del. Azcapotzalco, México, D.F. Tel: 50912150
www.intertek.com

REPORTE DE RESULTADOS

Empresa:	Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.	No. de Orden de Trabajo:	MX10-2375
Dirección:	Sindicato Agrario No. 309, Adolfo López Mateos (Centro), Villahermosa, Tabasco	Fecha de Reporte:	2010-12-03
Contacto:	Paolina Barradas	Recepción de muestras:	2010-10-14
Muestras Tomadas Por:	Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.	Fecha de Muestreo:	2010-10-11,12
Nombre del Proyecto:	NP		
Sitio de Muestreo:	NP		

ABREVIACIONES UTILIZADAS EN ESTE REPORTE

- LC = Limite de cuantificación.
- LCE = Limite de Cuantificación Estimado.
- LR = Limite Reportable
- NA = No Aplica
- ND = No Detectado al nivel del LC o al LCE reportado.
- NR = No Referenciado
- NC = No Calculable.
- NP = No Proporcionado.
- IM = Interferencia de Matriz.
- @ = Identificación tentativa por Interferencia de Matriz
- % de Sólidos = El resultado se expresa con base a la masa de la muestra total.
- HC = Hidrocarburos
- + = Prueba subcontratada.
- ▲ = Prueba contratada.
- Ω = No acreditado.
- + = En proceso de acreditación.
- = En proceso de acreditación.



La Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002 establece como separador decimal la coma (,).

Se anexa cadena de custodia original, en caso contrario la cadena traerá un comentario.

Para cualquier duda sobre su reporte favor de contactarnos a nuestras oficinas en México; estamos a sus órdenes.

Agradecemos a usted por haber considerado a Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V., como su Laboratorio de Análisis, y quedamos a sus órdenes para cualquier servicio analítico ambiental que usted y su empresa necesiten.

Atentamente

Wing Lopez
Coor. de Area

Signatario / Cargo

Aprobación: No. CNA-GSCA-537

Aprobación: DF/MEX/QRO/REDLA033/AAR/AEA/MER/2010

Acreditamiento: EMA No. A-187-008/07, R-0044-003/07, FF-0043-002/07, AG-188-051/07 Vigencia 2007-05-16 a 2011-05-16

Alcance: ver página www.ema.org.mx

Estos acreditamientos sólo aplican para métodos listados en los mismos. No garantiza que todo lo que se encuentra contenido en este reporte esté acreditado

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este documento, así como cualquier modificación o alteración en ninguna de sus partes sin la autorización previa de Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V. En caso contrario Intertek se reserva el derecho de proceder de forma legal en contra de quien(es) resulten responsable(s).

Los resultados que aparecen en este reporte pertenecen únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).

Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V.

Poniente 134 No. 860, Col. Industrial Vallejo

C.P. 02300, Del. Azcapotzalco, México, D.F. Tel.: 50912150

www.intertek.com



[Handwritten signature]

Reporte de Resultados

Fecha de recepción de muestras: 2010-10-14

Fecha de Reporte : 2010-12-03

Nombre del Proyecto: NP
Sitio de muestreo: NP
Muestras Tomadas por: Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.
Cliente: Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.
Dirección: Sindicato Agrario No. 309, Adolfo López Mateos (Centro), Villahermosa, Tabasco
Atención a: Paolina Barradas
Matriz de la muestra: Sólido
Reporte No.: MX10-2375-01
Fecha de muestreo: 2010-10-11
Identificación de la muestra: Muestra compuesta Mpio. centro
Fecha de análisis: 2010-10-19, 2010-11-10

▲ Parámetros	Unidades	Metodo de Análisis	Resultado
Carbón	%	NMX-AA-067-1985	47,875
Hidrogeno	%	NMX-AA-068-1986	5,503
Oxígeno	%	NMX-AA-080-1986	26,571
Nitrógeno	%	NMX-AA-024-1984	1,920
Azufre	%	NMX-AA-092-1984	0,527
Humedad	%	NMX-AA-016-1984	69,490
Cenizas	%	NMX-AA-018-1984	16,015

Reporte No.: MX10-2375-02

Fecha de muestreo: 2010-10-12

Identificación de la muestra: Muestra compuesta Mpio. centro

Fecha de análisis: 2010-10-19, 2010-11-10

▲ Parámetros	Unidades	Metodo de Análisis	Resultado
Carbón	%	NMX-AA-067-1985	51,668
Hidrogeno	%	NMX-AA-068-1986	5,939
Oxígeno	%	NMX-AA-080-1986	29,192
Nitrógeno	%	NMX-AA-024-1984	1,297
Azufre	%	NMX-AA-092-1984	0,467
Humedad	%	NMX-AA-016-1984	88,270
Cenizas	%	NMX-AA-018-1984	10,016

FIN DEL REPORTE

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este documento, así como cualquier modificación o alteración en ninguna de sus partes sin la autorización previa de Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V. En caso contrario Intertek se reserva el derecho de proceder de forma legal en contra de quien(es) resulten responsable(s).
 Los resultados que aparecen en este reporte pertenecen únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).

Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V.

Poniente 134 No. 660, Col. Industrial Vallejo

C.P. 02300, Del. Azcapotzalco, México, D.F. Tel.: 50912150

www.intertek.com



Reportar a: Compañía: IDEM
 Dirección: Sindicato Agrario #309
Adolfo Lopez Mateos (Centro) Villahermosa
 Contacto: Paulina Barradas
 Tel/Fax: _____
 e-mail: _____
 Cotización: _____

Facturar a: _____
 Dirección: _____
 Contacto: _____
 Teléfono: _____
 Pedido: _____
 R.F.C.: _____

Nombre del proyecto: _____

Analisis / Métodos Solicitados
 Humedad / MXA A 016
 Cenizas / MXA A 018
 Nitrogeno / MXA A 024
 Azufre / MXA A 031
 Hidrogeno / MXA A 068
 Oxigeno / MXA A 080
 (Carbon) NPKA-A-67
 Nitrogeno NPKA-A-24

Para uso exclusivo del Laboratorio.
 Fecha de recepción: 2010-10-14
 Termómetro No. 174-702-050
 Temp. de Hielera en la recepción (°C):
 2° 3 4° 5 5° 6
 Muestras con Hielo 199
 Hielera
 Sello de Custodia
 Muestras con Sello de Custodia

① Matriz	Fecha (aarrmmdd)	Hora (hh:mm)	Muestra Comp. Simple	Identificación de la muestra	No. tipo de cont. ②			Id. Muestra (Para uso exclusivo del Lab.)
					P	VT	VA	
SD	10/10/11	—	✓	Muestra Compuesta mpio centro	1	—	—	MX10-2375-1
SD	10/10/12	—	✓	Muestra compuesta mpio centro	1	—	—	11 -2

Revisó: ppp
 Verificó: ac

FAVOR DE INDICAR EL METODO PARA CADA UNO DE LOS ANALISIS REQUERIDOS

NOTA: "Debe coordinarse junto con el Área de Proyectos"

Tiempo de entrega de resultados: Prioridad 1 ó Estándar (12 días hábiles) Prioridad 2 ó 50%* (3 días hábiles) Prioridad 3 ó 100%* (3 días hábiles)

Muestreado por: (Nombre/Firma y Empresa) El Cliente
 Recibido por: (Nombre y Firma) _____
 Entregado por: (Nombre y Firma) _____

Fecha: _____ Hora: _____
 Fecha: _____ Hora: _____
 Fecha: _____ Hora: _____

NOTA: "Debe coordinarse junto con el Área de Proyectos"
 Fecha: 2010-15 10:00 Hora: _____
 Fecha: _____ Hora: _____
 Fecha: _____ Hora: _____

Observaciones:
Cc. llevado en labo
Todo es Reg Nat 021
14 OCT 2010
LABORATORIO

Al entregar las muestras al Laboratorio, el cliente acepta las condiciones y términos especiales en la cotización.
 Favor de solicitar los cambios por escrito vía Fax al 55 40 78 53

**RESULTADOS DE MUESTRAS ANALIZADAS POR
INTERTEK TESTING SERVICES
LABORATORIOS AMBIENTALES
MÉXICO**

REPORTE ELABORADO PARA: Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.
Sindicato Agrario No. 309, Adolfo López Mateos (Centro),
Villahermosa, Tabasco

ATENCIÓN: Paolina Barradas

FECHA DE MUESTREO: 2010-10-13,14,15,16,17

REPORTE DE RESULTADOS

Empresa:	Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.	No. de Orden de Trabajo:	MX10-2440
Dirección:	Sindicato Agrario No. 309, Adolfo López Mateos (Centro), Villahermosa, Tabasco	Fecha de Reporte:	2010-11-12
Contacto:	Paolina Barradas	Recepción de muestras:	2010-10-19
Muestras Tomadas Por:	Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.	Fecha de Muestreo:	2010-10-13,14,15,16,17
Nombre del Proyecto:	NP		
Sitio de Muestreo:	NP		

ABREVIACIONES UTILIZADAS EN ESTE REPORTE

LC	= Limite de cuantificación.
LCE	= Limite de Cuantificación Estimado.
LR	= Limite Reportable
NA	= No Aplica
ND	= No Detectado al nivel del LC o al LCE reportado.
NR	= No Referenciado
NC	= No Calculable.
NP	= No Proporcionado.
IM	= Interferencia de Matriz.
@	= Identificación tentativa por Interferencia de Matriz
% de Sólidos	= El resultado se expresa con base a la masa de la muestra total.
HC	= Hidrocarburos
♦	= Prueba subcontratada.
▲	= Prueba contratada.
Ω	= No acreditado.
+	= En proceso de acreditación.

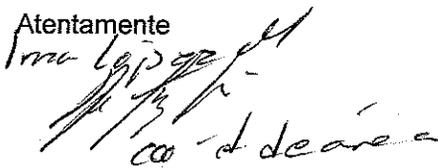
La Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002 establece como separador decimal la coma (,).

Se anexa cadena de custodia original, en caso contrario la cadena traerá un comentario.

Para cualquier duda sobre su reporte favor de contactarnos a nuestras oficinas en México; estamos a sus órdenes.

Agradecemos a usted por haber considerado a Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V., como su Laboratorio de Análisis, y quedamos a sus órdenes para cualquier servicio analítico ambiental que usted y su empresa necesiten.

Atentamente


Signatario / Cargo

Aprobación: No. CNA-GSCA-537

Aprobación: DF/MEX/QRO/REDLA033/AAR/AEA/MER/2010

Acreditamiento: EMA No. A-187-008/07, R-0044-003/07, FF-0043-002/07, AG-188-051/07 Vigencia 2007-05-16 a 2011-05-16

Alcance: ver página www.ema.org.mx

Estos acreditamientos sólo aplican para métodos listados en los mismos. No garantiza que todo lo que se encuentra contenido en este reporte esté acreditado.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este documento, así como cualquier modificación o alteración en ninguna de sus partes sin la autorización previa de Testing Services de México, S.A. de C.V. En caso contrario Intertek se reserva el derecho de proceder de forma legal en contra de quien(es) resulten responsable(s).

Los resultados que aparecen en este reporte pertenecen únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).

Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V.

Poniente 134 No. 660, Col. Industrial Vallejo

C.P. 02300, Del. Azcapotzalco, México, D.F. Tel.: 50912150

www.intertek.com



1 de 4

ILT-A/002/CL5.10-F3

Handwritten initials

Reporte de Resultados

Fecha de recepción de muestras: 2010-10-19

Fecha de Reporte : 2010-11-12

Nombre del Proyecto: NP
Sitio de muestreo: NP
Muestras Tomadas por: Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.
Cliente: Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.
Dirección: Sindicato Agrario No. 309, Adolfo López Mateos (Centro), Villahermosa, Tabasco
Atención a: Paolina Barradas
Matriz de la muestra: Sólido
Reporte No.: MX10-2440-01
Fecha de muestreo: 2010-10-14
Identificación de la muestra: Muestra Comp. Mpio. Centro
Fecha de análisis: 2010-10-21, 2010-11-10

▲	Parámetros	Unidades	Metodo de Análisis	Resultado
	Carbón	%	NMX-AA-067-1985	49,978
	Hidrogeno	%	NMX-AA-068-1986	5,745
	Oxigeno	%	NMX-AA-080-1986	27,738
	Nitrógeno	%	NMX-AA-024-1984	1,644
	Azufre	%	NMX-AA-092-1984	0,637
	Humedad	%	NMX-AA-016-1984	69,64
	Cenizas	%	NMX-AA-018-1984	12,573

Reporte No.: MX10-2440-02
Fecha de muestreo: 2010-10-13
Identificación de la muestra: Muestra Comp. Mpio. Centro
Fecha de análisis: 2010-10-21, 2010-11-10

▲	Parámetros	Unidades	Metodo de Análisis	Resultado
	Carbón	%	NMX-AA-067-1985	48,742
	Hidrogeno	%	NMX-AA-068-1986	5,603
	Oxigeno	%	NMX-AA-080-1986	27,052
	Nitrógeno	%	NMX-AA-024-1984	2,212
	Azufre	%	NMX-AA-092-1984	0,633
	Humedad	%	NMX-AA-016-1984	75,32
	Cenizas	%	NMX-AA-018-1984	14,511

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este documento, así como cualquier modificación o alteración en ninguna de sus partes sin la autorización previa de Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V. En caso contrario Intertek se reserva el derecho de proceder de forma legal en contra de quien(es) resulten responsable(s).
Los resultados que aparecen en este reporte pertenecen únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).

Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V.

Poniente 134 No. 660, Col. Industrial Vallejo

C.P. 02300, Del. Azcapotzalco, México, D.F. Tel.: 50912150

www.intertek.com



Reporte de Resultados

Fecha de recepción de muestras: 2010-10-19

Fecha de Reporte : 2010-11-12

Nombre del Proyecto: NP

Sitio de muestreo: NP

Muestras Tomadas por : Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.

Cliente: Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.

Dirección: Sindicato Agrario No. 309, Adolfo López Mateos (Centro), Villahermosa, Tabasco

Atención a: Paolina Barradas

Matriz de la muestra: Sólido

Reporte No.: MX10-2440-03

Fecha de muestreo: 2010-10-17

Identificación de la muestra: Muestra Comp. Mpio. Centro

Fecha de análisis: 2010-10-21, 2010-11-10

▲ Parametros	Unidades	Metodo de Analisis	Resultado
Carbón	%	NMX-AA-067-1985	50,667
Hidrogeno	%	NMX-AA-068-1986	5,850
Oxigeno	%	NMX-AA-080-1986	28,627
Nitrógeno	%	NMX-AA-024-1984	1,040
Azufre	%	NMX-AA-092-1984	0,687
Humedad	%	NMX-AA-016-1984	61,14
Cenizas	%	NMX-AA-018-1984	8,428

Reporte No.: MX10-2440-04

Fecha de muestreo: 2010-10-15

Identificación de la muestra: Muestra Comp. Mpio. Centro

Fecha de análisis: 2010-10-21, 2010-11-10

▲ Parametros	Unidades	Metodo de Analisis	Resultado
Carbón	%	NMX-AA-067-1985	50,892
Hidrogeno	%	NMX-AA-068-1986	5,850
Oxigeno	%	NMX-AA-080-1986	28,754
Nitrógeno	%	NMX-AA-024-1984	1,482
Azufre	%	NMX-AA-092-1984	0,714
Humedad	%	NMX-AA-016-1984	72,03
Cenizas	%	NMX-AA-018-1984	8,754

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este documento, así como cualquier modificación o alteración en ninguna de sus partes sin la autorización previa de Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V. En caso contrario Intertek se reserva el derecho de proceder de forma legal en contra de quien(es) resulten responsable(s).

Los resultados que aparecen en este reporte pertenecen únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).

Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V.

Poniente 134 No. 660, Col. Industrial Vallejo

C.P. 02300, Def. Azcapotzalco, México, D.F. Tel.: 50912150

www.intertek.com



Reporte de Resultados

Fecha de recepción de muestras: 2010-10-19

Fecha de Reporte : 2010-11-12

Nombre del Proyecto: NP

Sitio de muestreo: NP

Muestras Tomadas por : Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.

Cliente: Gestión y Asesoría Jurídico Ambiental, S.C.

Dirección: Sindicato Agrario No. 309, Adolfo López Mateos (Centro), Villahermosa, Tabasco

Atención a: Paolina Barradas

Matriz de la muestra: Sólido

Reporte No.: MX10-2440-05

Fecha de muestreo: 2010-10-16

Identificación de la muestra: Muestra Comp. Mpio. Centro

Fecha de análisis: 2010-10-21, 2010-11-10

▲	Parametros	Unidades	Metodo de Análisis	Resultado
	Carbón	%	NMX-AA-067-1985	51,225
	Hidrogeno	%	NMX-AA-068-1986	5,888
	Oxigeno	%	NMX-AA-080-1986	28,942
	Nitrógeno	%	NMX-AA-024-1984	1,160
	Azufre	%	NMX-AA-092-1984	0,605
	Humedad	%	NMX-AA-016-1984	77,08
	Cenizas	%	NMX-AA-018-1984	8,986

FIN DEL REPORTE

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este documento, así como cualquier modificación o alteración en ninguna de sus partes sin la autorización previa de Intertek

Testing Services de México, S.A. de C.V. En caso contrario Intertek se reserva el derecho de proceder de forma legal en contra de quien(es) resulten responsable(s).

Los resultados que aparecen en este reporte pertenecen únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).

Intertek Testing Services de México, S.A. de C.V.

Poniente 134 No. 660, Col. Industrial Vallejo

C.P. 02300, Del. Azcapotzalco, México, D.F. Tel.: 50912150

www.intertek.com



