



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

FACULTAD DE CIENCIAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS

ESPECIALIDAD EN GESTIÓN AMBIENTAL

*“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DEL METANO
GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO DE ENSENADA, B.C.”*

Presenta

ERNESTINA KAREN VELÁZQUEZ GONZÁLEZ



Ensenada, B.C., a 6 de Agosto de 2010

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DEL METANO GENERADO
EN EL RELLENO SANITARIO DE ENSENADA, B.C.”**

TRABAJO TERMINAL
Que para obtener el diploma en

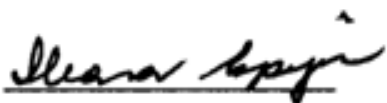
GESTIÓN AMBIENTAL

Presenta
ERNESTINA KAREN VELÁZQUEZ GONZÁLEZ

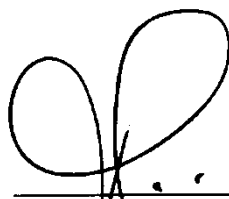
Aprobado por



Dra. Carolina Armijo de Vega
Directora



Dra. Martha Ileana Espejel Carbajal
Sinodal



Dr. José Luis Ferman Almada
Sinodal

Ensenada, B.C., a 6 de Agosto de 2010

AGRADECIMIENTOS

- ✓ A la Dra. Carolina Armijo por permitirme participar en el proyecto del cual fue parte esta tesina y por su apoyo en todo momento.
- ✓ A mis sinodales (Dra. Ileana Espejel y Dr. José Luis Fermán) por sus comentarios y observaciones.
- ✓ Al Ingeniero José Luis Arvizu F. del Instituto de Investigaciones Eléctricas por su paciencia, sus comentarios tan acertados, por aclarar mis dudas, finalmente por la información proporcionada, la cual me sirvió en gran medida para concluir la tesina.
- ✓ Al Ingeniero Rogelio Maldonado gerente del Relleno Sanitario de Ensenada, por su disponibilidad, su amabilidad y por facilitarme información sobre el relleno.
- ✓ A los Maestros en Ciencias Quetzali Aguilar y Paul Taboada, por el apoyo en la realización de las mediciones de campo.
- ✓ Al proyecto “Generación de energía eléctrica a través del aprovechamiento del gas metano proveniente de los rellenos sanitarios de Ensenada, B.C.” apoyado por el Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado.
- ✓ A CONACYT por otorgarme la beca que me permitió cursar el posgrado en Gestión Ambiental.

RESUMEN

La generación de residuos sólidos urbanos ha incrementado de manera paralela al crecimiento de las ciudades, cerca del 54% de estos residuos se confina de forma adecuada, es decir son depositados en sitios controlados en donde se llevan a cabo procesos de degradación por microorganismos anaerobios, debido a que los residuos están constituidos cerca de un 56% por materia orgánica. Esta degradación da como resultado la generación de biogás cuyos principales componentes son el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), este último es considerado como un Gas de Efecto Invernadero (GEI); cuyo potencial de calentamiento global es de aproximadamente veintiún veces mayor que el CO_2 . El CH_4 posee un poder calorífico elevado, por lo cual puede ser aprovechado para generar energía, producir gas natural, metanol, entre otros.

El contenido de metano en el biogás determinado en la celda uno del relleno sanitario activo ubicado en el municipio de Ensenada, Baja California, tuvo valores comprendidos entre 33% y 55% y un flujo sin extracción forzada estimado para las cuatro celdas del relleno de $340.5 \text{ m}^3/\text{h}$. De los escenarios simulados con el Modelo Mexicano de Biogás se puede concluir que la recuperación del 80% predice un flujo de biogás de $353 \text{ m}^3/\text{h}$ para 2009, valor similar al estimado para las cuatro celdas del relleno. Bajo este escenario, teóricamente el municipio tendría ingresos en el 2014 del orden de los \$ 16.7 millones de pesos a través de la utilización de la energía para alumbrado público, con una planta inicial de 1.1 MW de capacidad operando 8,000 horas al año. La captura y combustión del biogás para producir energía, generará una reducción de aproximadamente 44,473 ton de $\text{CO}_2\text{e/año}$ en el 2014, con un total de 1,281,616 toneladas de CO_2e hasta el 2030; que pueden representar ingresos para el municipio del orden de los 3.8 a los 12.8 millones de dólares del 2014 a 2030, dependiendo del valor de la tonelada de CO_2e . Por lo que sería recomendable efectuar pruebas dinámicas con bombeo, y el estudio que confirme los resultados anteriores basados en las mediciones estáticas sin bombeo y permita la captura del biogás a partir de 2014.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Residuos Sólidos	1
1.2. Rellenos sanitarios	2
1.3 Producción de biogás.....	3
1.4 Generación de energía	6
1.5 Recuperación de biogás	7
2. ANTECEDENTES	10
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	13
4. OBJETIVOS	14
4.1 General	14
4.2 Específicos.....	14
5. HIPÓTESIS	14
6. AREA DE ESTUDIO.....	15
6.1 Ubicación	15
6.2. Características generales	17
6.3 Tasa de disposición de residuos	21
6.4 Composición de residuos.....	21
7. METODOLOGÍA.....	23
7.1 Monitoreo de la composición de biogás	23
7.1.1 Equipo.....	23
7.1.2 Puntos de muestreo y monitoreo	25
7.2 Estimaciones de recuperación de biogás, capacidad eléctrica de la planta y reducción de emisiones de metano.....	26
7.3 Generación de biogás	30
8. RESULTADOS	32
8.1. Composición y calidad de biogás	32
8.2 Generación de biogás	34
8.2.1 Mediciones de campo	34
8.2.2 Modelo Mexicano de biogás	35

8.3 Recuperación de biogás.....	356
8.4 Estimaciones de capacidad eléctrica y reducción de emisiones de CH ₄	40
8.4.1 Capacidad eléctrica	41
8.4.2 Reducción de las emisiones de metano proyectadas	45
9. DISCUSION	46
10. CONCLUSIONES.....	51
11. RECOMENDACIONES	53
12. GLOSARIO DE TERMINOS.....	54
13. REFERENCIAS.....	57
ANEXOS	62
ANEXO I.....	63
ANEXO II.....	66
ANEXO III.....	75

ÍNDICES DE TABLAS

TABLA I. Composición básica de biogás.....	3
TABLA II. Disposición de residuos del Relleno Sanitario.....	21
TABLA III. Composición de residuos de la zona urbana de Ensenada.....	22
TABLA IV. Resumen de monitoreo Septiembre.....	32
TABLA V. Resumen de monitoreo Octubre.....	33
TABLA VI. Resumen de monitoreo Noviembre.....	33
TABLA VII. Proyecciones de flujo de biogás.....	34
TABLA VIII. Generación de biogás del 2009 al 2013.....	35
TABLA IX. Proyecciones de recuperación de biogás, eficiencia del 40%.....	36
TABLA X. Proyecciones de recuperación de biogás, eficiencia del 60%.....	37
TABLA XI. Proyecciones de recuperación de biogás eficiencia (80%).....	38
TABLA XII. Proyecciones de recuperación de biogás en el 2025 (80%).....	39
TABLA XIII. Valores de k y Lo, según la categoría de degradación de residuos...40	
TABLA XIV. Capacidad de planta de energía y reducción de emisiones (40%)....42	

TABLA XV. Capacidad de planta de energía y reducción de emisiones (60%).....	43
TABLA XVI. Capacidad de planta de energía y reducción de emisiones (80%)....	44
TABLA XVII. Capacidad de planta de energía y reducción de emisiones, 2025....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Fases de generación de biogás en rellenos sanitarios.....	5
FIGURA 2. Ubicación del vertedero activo de la ciudad de Ensenada, B.C.....	16
FIGURA 3. Construcción de la celda cuatro.....	17
FIGURA 4. Pozo de venteo	18
FIGURA 5. Sistema de recolección de lixiviados.....	19
FIGURA 6. Recubrimiento inferior de las celdas.....	20
FIGURA 7. Cobertura de residuos.....	20
FIGURA 8. Equipo GEM 2000.....	24
FIGURA 9. Accu-Flow.....	24
FIGURA 10. Distribución de los puntos de muestreo.....	25
FIGURA 11. Medición de biogás del tubo de venteo cuatro.....	26

ÍNDICES DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. Recuperación de biogás a 40% de eficiencia.....	68
GRÁFICA 2. Recuperación de biogás a 60% de eficiencia.....	70
GRÁFICA 3. Recuperación de biogás a 80% de eficiencia.....	72
GRÁFICA 4. Recuperación de biogás, 2025, 80% de eficiencia.....	74

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Residuos Sólidos

El volumen de desperdicios en las ciudades aumenta constantemente, por lo que hoy se plantea seriamente el problema de la recolección y eliminación de los residuos domiciliarios. Dicho cuestionamiento no sólo representa elevados costos para la sociedad, sino que constituye también una de las formas de deterioro del medio ambiente (Vaquero, 2004).

La generación de residuos y su composición depende de un número importante de variables económicas y demográficas, que a su vez están asociadas a preferencias y patrones de consumo. Entre las más relevantes se encuentra el nivel de ingreso, la propensión a consumir, crecimiento demográfico y nivel de urbanización de la sociedad (Quadri, *et al*, 2003), entre otras.

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son aquellos “generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que se consumen y de sus envases, embalajes o empaques, así como 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” (SEMARNATla, 2003).

De acuerdo con el compendio de estadísticas ambientales del 2008 de la SEMARNAT, en el país se ha modificado de manera sustancial la cantidad de RSU, ya que para el año 1998 se estimó una generación nacional de 30.5 millones de toneladas anuales de residuos y una generación *per cápita* de 0.85 kg/hab/día, mientras que para el 2002 se registraron 32.1 millones de toneladas y finalmente para el 2006 se generaron 36.1 millones de toneladas, con una producción por habitante de 0.92 kg/día. Esto significa que en México se generan alrededor de 99 mil toneladas diarias en el 2006.

En Baja California se generaron 834.99 mil toneladas en el año 1998; para el 2006 la cantidad de residuos fue de 1.22 millones de ton; asimismo para el 2007 se registró una generación de 1.24 millones de toneladas, de los cuales en el 2006 fueron recolectadas 3,122.36 toneladas al día (SEMARNAT, 2008).

La generación *per cápita* de residuos sólidos domésticos (RSD) en la ciudad de Ensenada para el 2009, fue de 0.958 ± 0.332 kg/día-hab considerando una población de 260,075 habitantes en la zona urbana del municipio Ensenada (Armijo *et al*, 2009).

1.2. Rellenos sanitarios

Existen distintos tratamientos que se dan a los residuos, como son incineración, reciclado, así como el uso de vertederos el cual destaca debido a su bajo costo, su disponibilidad y su aplicabilidad a grandes cantidades de residuos. Además, también es ambientalmente aceptable y se considera como un método de recuperación de energía del gas generado (Vaquero, 2004).

Los vertederos a cielo abierto siguen representado el método más usual y barato para desasirse de los residuos urbanos; sin embargo estos ocasionan gran deterioro al medio ambiente y a la población más próxima a los vertederos (Bautista, 1998).

Los rellenos sanitarios (RESA) son el método empleado para la correcta disposición de los RSU, por lo que, como toda obra de ingeniería, éste tiene que ser planteado y diseñado previamente para asegurar su correcta construcción y operación. La unidad básica de construcción del relleno es la celda diaria, que se define como el espacio necesario para confinar los residuos en un día de trabajo y está constituida por la cantidad de RSU que se disponen y el material de relleno necesario para cubrirlos (SEMARNAT, 2001).

1.3 Producción de biogás

Los RSU contienen una cantidad relativamente alta de materia orgánica, la cual se descompone por la acción de microorganismos bajo condiciones anaerobias para producir biogás (Hilkiah *et al*, 2008).

El biogás está compuesto de partes aproximadamente iguales de metano y dióxido de carbono, con rastros de concentraciones de componentes orgánicos volátiles (COV), contaminantes aéreos peligrosos (HAPs) y otros componentes como se muestra en la Tabla I (SCS Engineers, 2007, Seoáñez, 2000).

El alto contenido de metano, le proporciona al biogás un elevado poder calorífico (si está presente en un 60%, el poder calorífico es de 5. 600 Kcal/Nm³) por lo que puede convertirse en una fuente de energía alterna que supondría una rentabilidad económica importante en cuanto a la gestión de los vertederos (Bautista, 1998).

Tabla I. Composición básica de biogás
(Seoáñez *et al*, 2000)

Componente	% en volumen
Metano (CH ₄)	50-65
Dióxido de Carbono (CO ₂)	30-45
Hidrógeno (H ₂)	0.1-2
Oxígeno (O ₂)	0.1-5
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0.001-2
Agua (H ₂ O)	0.1-9
Nitrógeno (N ₂)	trazas
Hidrocarburos	trazas
Mercaptanos	trazas
Diversos productos organoclorados	trazas
Monóxido de Carbono (CO)	trazas
Amoníaco (NH ₃)	trazas

Según Shah (2000) generalmente la descomposición de los residuos en los rellenos ocurre en cinco fases sucesivas (Figura 1):

- ✓ La primera fase se produce en condiciones aeróbicas y dura el tiempo requerido para agotar el O_2 atrapado; suele durar de horas a una semana.
- ✓ La segunda fase comienza cuando las condiciones devienen anaeróbicas, y se degrada la materia orgánica presente; los nitritos y sulfatos son convertidos en Nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. Esta es conocida como la fase de transición. El principal gas producido es el CO_2 y tiene una duración de entre uno y seis meses.
- ✓ La tercera fase está marcada por la aparición gradual de metano y la disminución drástica del volumen de nitrógeno. A esta fase se la conoce como fase ácida y tiene una duración aproximada de tres meses a tres años.
- ✓ En la cuarta fase, la concentración de metano se estabiliza y es relativamente constante (60% en volumen de biogás), lo mismo que el dióxido de carbono (entre 35% en volumen de biogás). También se la denomina fase anaerobia de metanización estable y tiene una duración de ocho a cuarenta años.
- ✓ La última fase corresponde a la fase de maduración del vertedero. En este estadio, disminuye significativamente la producción de biogás, ya que la fracción biodegradable que se descompone rápidamente (comida, papel, etc.) ya se ha descompuesto, quedando únicamente la fracción de degradación lenta (cartón, madera, etc.).

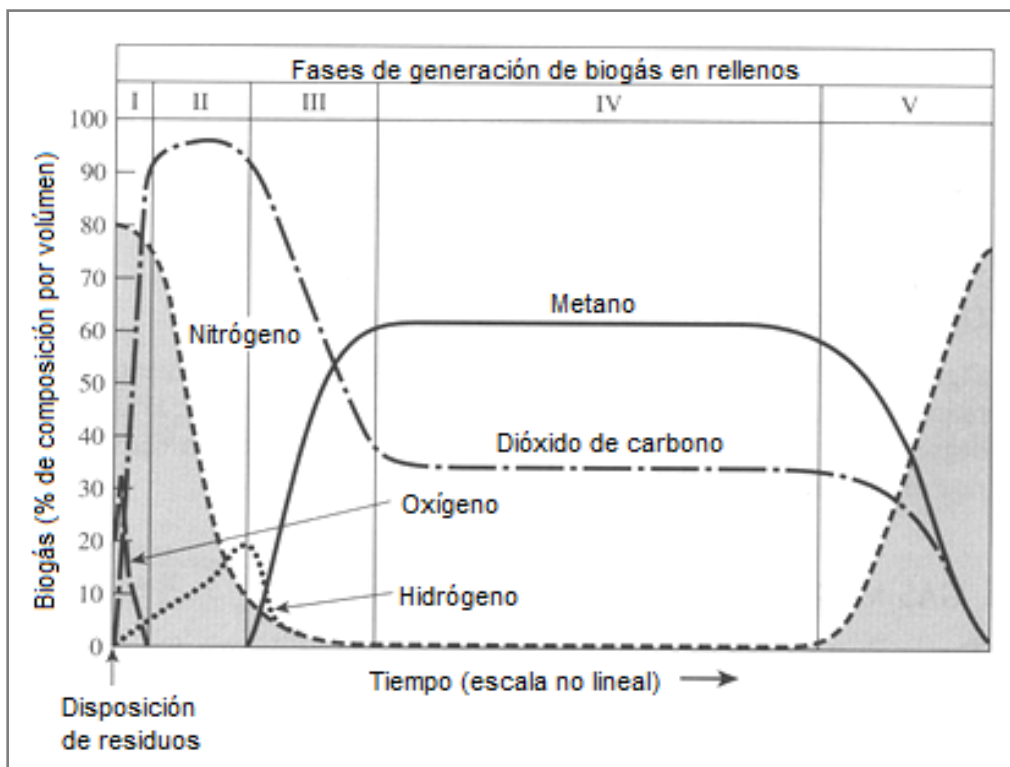


Figura 1. Fases de generación de biogás en rellenos sanitarios (Shah, 2000)

El metano presente en el biogás crudo es considerado un gas con efecto invernadero, más potente que el dióxido de carbono, con un potencial de calentamiento global de aproximadamente 21 veces mayor que el CO_2 (SCS Engineers 2005, 2007).

En México, la aportación de este gas al inventario nacional de emisiones es la segunda en importancia con un 23%; detrás del dióxido de carbono que proviene, principalmente, de la quema de combustibles fósiles y que contribuye con el 75% (Arvizu *et al*, 2003).

Aunque el índice de emisión de metano disminuye con la clausura del relleno (a medida que la fracción orgánica se vaya agotando), un relleno usualmente continua emitiendo metano durante muchos (20 años o más) años después de ser clausurado (SCS Engineers, 2007).

Las principales fuentes de metano a nivel mundial son: la ganadería, el cultivo del arroz, las minas de carbón, los rellenos sanitarios, la quema de biomasa, las fuentes de suministro de combustibles fósiles y el venteo en las plantas procesadoras de hidrocarburos (Arvizu *et al*, 2003).

Los factores cruciales en la producción de biogás son: las poblaciones microbianas, la composición química de los residuos (principalmente la biodegradabilidad de la materia orgánica y la relación C/N y C/P), la humedad de los residuos al interior del relleno, así como el grado de compactación y tamaño de partícula de los residuos (Robles, 2008), sin embargo existen muchos otros factores como son la recirculación de lixiviado, sistema de recubrimiento, así como la presencia de nutrientes e inhibidores, condiciones climáticas como temperatura y precipitación (Klusman *et al*, 2000, Vaquero, 2004, SCS Engineers, 2007).

Cuando el biogás no se controla, aprovecha y/o trata representa un riesgo para las poblaciones circunvecinas puesto que a concentraciones del 14% y en presencia de oxígeno es altamente explosivo, y para el ambiente (Hernández-Cano *et al*, 2006; Shah, 2000). La generación de biogás no sólo representa un factor de riesgo en función de su toxicidad y de su explosividad, sino que también aporta cantidades importantes de gases que contribuyen al efecto invernadero, entre los que se encuentran el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), que en exceso generan problemas ambientales tanto a la atmósfera, como al suelo y a los cuerpos de agua (SEMARNAT, 2001). Pérez y colaboradores (1997) estimaron que se emiten 1.2×10^9 ton de metano anualmente a la atmósfera y tiene un tiempo de residencia de 3.3 años.

1.4 Generación de energía

En el mundo, la energía juega un papel fundamental en diversos aspectos ya que sin ella la actividad humana, tal y como se entiende hoy en día, sería imposible. La

energía se necesita tanto para cocinar como para generar calor en una casa; así como para el transporte de personas o bienes, y para todos los procesos industriales. Para cubrir estas necesidades, la energía se obtiene de diversas fuentes tales como: petróleo, gas, carbón, combustibles nucleares y las llamadas fuentes renovables posibles (Jiménez, 2001).

La generación de energía en México se ha realizado en su mayoría por los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón); sin embargo, esto ha traído consecuencias negativas a nuestro ambiente causando el calentamiento global debido a los gases de efecto invernadero (GEI), por lo que el uso de energías alternas es una solución adecuada en la actualidad. Las energías alternas brindan la oportunidad de ofrecer energía útil en el presente y futuro con menos impactos ambientales que las fuentes convencionales, por ello la presente investigación trata sobre la captura de biogás, ya que está es considerada una fuente de energía alternativa (Aguilar-Virgen *et al*, 2009a).

Las energías alternas tienen la ventaja de no impactar el medio ambiente en forma negativa. De esta manera se presentan como grandes alternativas para sustituir aquellas tecnologías que mayormente inciden con gases de efecto invernadero y contaminantes por el uso de hidrocarburos. Un mayor nivel de ingreso generalmente se asocia a un mayor consumo de combustibles fósiles. Las emisiones de GEI por consumo de combustibles fósiles son de 350,414 Gg de CO₂ en el 2002, 25% por arriba de las registradas para el año de 1990 (SEMARNAT & INE, 2006).

1.5 Recuperación de biogás

Normalmente los gases que se han recuperado de un vertedero activo se queman o se utilizan para recuperar energía en forma de electricidad, o ambos. Este

procedimiento se inició en forma comercial en 1998, en Grenoble, Francia. La generación se efectúa a partir del metano, lo más puro posible (Jiménez, 2001).

La generación de energía eléctrica a través del aprovechamiento de biogás en los sitios de disposición final, ha tenido resultados aceptables a nivel mundial; el metano que se obtiene, se emplea para la combustión de equipos con el propósito de generar energía eléctrica. Para producir energía eléctrica se necesitan alrededor de 0.62 m^3 de biogás (60% CH_4) para producir 1 kW/h. Por cada tonelada diaria de basura orgánica, un relleno puede producir de 100 a 125 m^3 de biogás diario cuando la concentración de metano es del 55% (Deffis, 1991).

En nuestro país para el año 2006, solo se estaba recuperando el biogás para su utilización en dos rellenos sanitarios ubicados en los estados de Nuevo León y Aguascalientes, a partir de Febrero del presente año el relleno de Culiacán también está recuperando su biogás. Sin embargo en otros países se lleva a cabo esta recuperación de manera más intensa, por ejemplo, en Europa se recuperaron de 200 sitios el equivalente a 500 000 toneladas de petróleo en 1993, esto principalmente en el Reino Unido y en Alemania (Robles, 2008).

La recuperación de biogás representa beneficios adicionales más allá de la reducción de emisión de gas con efecto invernadero, ya que permite la mejora de la calidad de aire local a través de la destrucción de HAPs y COVs a través de su combustión (SCS Engineers, 2007). De acuerdo con la Environmental Protection Agency (EPA), también minimiza las emisiones locales de óxido de nitrógeno (NO_x) el cual es responsable – según Strevett *et al.* (2002) - de alrededor del 35% de la lluvia ácida y el principal contaminante del ozono, además de que permite el ahorro de la energía primaria derivada de combustibles fósiles (Aguilar-Virgen, *et al* 2009).

Cuando se ponen en práctica estrategias de recuperación y uso de biogás se reducen potencialmente las emisiones de CO₂ equivalente (CO₂e) que se liberan a la atmósfera. El mercado de bonos de carbono, es un mecanismo a través del cual se pueden obtener ganancias al disminuir las emisiones de CO₂e, el costo promedio de cada tonelada métrica de CO₂e reducido es de US\$11.00 (Flores *et al*, 2008).

Se estima que la demanda promedio de certificados de carbono según Haites en el 2004, para el año 2010 será de 250 Tg CO₂/años a un precio de US\$ 11 Mg CO₂, de esta manera proyectos que por sí solos no son rentables, pueden serlo mediante la venta de los certificados de carbono también conocidos como CER's (Certificados de Reducción de Emisiones) obtenidos por su implementación (Flores *et al*, 2008).

Las emisiones nacionales de GEI por tipo de gas en CO₂ equivalente, son las siguientes: 74% de CO₂, 23% de CH₄, 2% N₂O, y el restante 1% se compone por los HFCs, PFCs y SF₆. Las emisiones de CO₂ equivalente per cápita promedio para el país son de 5.4 ton/hab, con un crecimiento medio anual de 0.4% entre 1990 y 2002 (SEMARNAT & INE, 2006).

2. ANTECEDENTES

Los estudios realizados sobre el aprovechamiento de biogás generado en los rellenos sanitarios son numerosos. Dentro de los trabajos publicados se encuentra el estudio de Hilikian y colaboradores (2008) mismo que determinó las condiciones óptimas para la producción de gas, empleando un reactor al cual se le agregaron residuos sólidos municipales con diferentes concentraciones de sólidos totales, demostrando que entre mayor sea el porcentaje de Sólidos Totales en los RSU, mayor será la producción de biogás, aunque la producción óptima de biogás no puede ser determinada únicamente con la concentración de los Sólidos Totales, sino también del pH, la temperatura y la efectividad de los microorganismo en el proceso de descomposición.

Klusman, y Dick, (2000) determinaron la variación estacional de las emisiones de metano en rellenos ubicados en zonas con climas fríos y semiáridos; para lo cual midieron la cantidad de metano que se emite a la atmosfera, durante tres estaciones, en el relleno sanitario de Rooney Road, ubicado en la ciudad de Jefferson en el estado de Colorado, E.U.A.; finalmente se observó la relación entre rellenos sanitarios que no cuentan con un sistema de recuperación de gas y la emisión de metano a la atmósfera, mostrando una variabilidad sustancial tanto de manera espacial como temporal.

En el 2008 Weitz y colaboradores, estimaron las emisiones nacionales de metano en sitios de disposición de residuos sólidos en Panamá, dichos investigadores demostraron la posibilidad de incorporar los datos de recuperación de gas en vertederos y hacer proyecciones sobre generación de metano.

En Uruguay la empresa SCS Engineers realizó en el 2005, una prueba de extracción de biogás en el relleno sanitario de la Ciudad de Montevideo para determinar la pre-factibilidad para la recuperación de biogás y la producción de energía, esta investigación proporciona información respecto a la calidad y el

volumen de biogás disponible, al igual que información sobre las características de los residuos sólidos y los niveles de lixiviado en el lugar. Realizando también la factibilidad en términos económicos de la implementación de un sistema de recuperación.

En el año 2005 estudios de pre-factibilidad y utilización de biogás fueron realizados el relleno sanitario El Carrasco Bucaramanga, ubicado en Colombia, el Relleno “La Esmeralda” Manizales, Colombia, en Brasil en lugares como Río de Janeiro, Pernambuco, Gravataí y en Huaycoloro, Lima Perú, todos ellos elaborados para el banco mundial por la empresa SCS Engineers. De lo anterior se contempla el aprovechamiento de biogás para generar energía, para uso directo (como gas natural) o para la venta de bonos de carbono y la factibilidad económica para cada escenario. Proporcionando datos de reducción de emisiones, flujos de biogás así como la capacidad eléctrica de la planta de generación de energía.

En México existen estudios desarrollados sobre la evaluación técnico-económica del aprovechamiento de biogás, realizado por Pérez *et al* en 1997. El propósito de este trabajo fue evaluar la factibilidad técnica y económica de la implementación del proceso de conversión de metano generado en un Relleno Sanitario a un producto comercial denominado metanol o a la producción de energía eléctrica. Demostrando la viabilidad del aprovechamiento de biogás, para la generación de energía eléctrica y la producción de metanol, permitiendo que el gas de desechos generado ayude a disminuir el consumo de recursos combustibles.

Dentro de las investigaciones realizadas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se encuentra el trabajo de Hernández-Cano y Durán (2006) quienes llevaron a cabo un seguimiento monitorio de la generación de biogás en un relleno sanitario clausurado, obteniendo que la producción volumétrica de biogás es de aproximadamente 30 m³/h/pozo, con un contenido de metano de casi un 50% y una capacidad calorífica de 27.4 millones de kWh.

En el caso particular de Ensenada Baja California, existe un estudio que llevó a cabo SCS Engineers; en el cual se determinó la pre-factibilidad del relleno sanitario clausurado de dicha ciudad, para aprovechar el biogás del vertedero en la generación de energía eléctrica. De ahí, la realización de un monitoreo, así como un estudio económico sobre la implementación de la infraestructura necesaria para producir energía. Otros de los estudios realizados en México por esta empresa se hicieron en el RESA de Coahuila, Nuevo Laredo Tamaulipas y en el estado de Querétaro.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) se han realizado diversos proyectos sobre el aprovechamiento de biogás; el primero de ellos se efectuó en 1991 y consistió en la evaluación de la factibilidad de generación eléctrica con el biogás generado en los rellenos de desechos sólidos urbanos del Distrito Federal; los objetivos fueron: evaluar el potencial de generación de electricidad en nueve sitios a partir de información proporcionada por Servicios Urbanos, pruebas de basura fresca y sondeos en Santa Cruz Meyehualco y Santa Fe, demostrar en planta piloto el aprovechamiento de biogás para la generación de electricidad y por ultimo estimar la factibilidad técnica y económica de recuperar y aprovechar el biogás producido en los rellenos sanitarios del D.F. para generar electricidad.

De igual manera el IIE, estuvo a cargo del proyecto Emisiones de metano de los rellenos sanitarios a la atmósfera de desechos sólidos urbanos en el país. Otro estudio realizado por dicho Instituto, es la evaluación de las emisiones de biogás y caracterización de la potencia energética que se puede obtener del relleno Prados de la Montaña del Distrito Federal, cuyo objetivo fue conocer la viabilidad de aprovechar energéticamente el biogás producido en el sitio, con la posibilidad de generar energía eléctrica, desplazando el consumo de combustibles fósiles y reduciendo las emisiones de metano a la atmósfera, así como el costo energético para el DF.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente la generación de basura en los hogares y lugares de interés común, ha aumentado de manera considerable, debido a la tendencia actual para la construcción de grandes vertederos y el alto precio de la energía, la recuperación del gas de vertederos es un aspecto interesante. Los rellenos sanitarios también han sido la opción más barata para el depósito de material de desecho. Los residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios cuentan con una fracción orgánica importante (más del 50% en promedio en México).

En el momento en que los residuos son enterrados, éstos sufren una descomposición biológica natural que a su vez genera biogás. Uno de los componentes de este biogás es el metano (CH_4), un gas de efecto invernadero que podría ser aprovechado de diversas formas entre las que se encuentra la generación de energía. Este biogás dependiendo de la cantidad de metano, puede contener un alto poder calorífico.

Además se puede decir que la recuperación de biogás contribuye a la limitación del efecto invernadero ya que se disminuyen las emisiones de gas metano, puesto que los gases se incineran y éste se transforma en dióxido de carbono. Teniendo en cuenta que la acción de cada molécula de metano contribuye al efecto invernadero veintiún veces más que una molécula de CO_2 , y que la incineración de una molécula de CH_4 produce una de CO_2 , la disminución del efecto es considerable, de igual manera la energía de combustión se puede aprovechar disminuyendo el consumo de combustibles fósiles. Lo que se traduciría en beneficios para el municipio, tanto ambientales como económicos gracias al aprovechamiento de biogás. A pesar de este potencial, en Ensenada no se está aprovechando el metano, éste es liberado a la atmósfera con consecuencias ambientales negativas. Por lo que este trabajo está dirigido a los dirigentes del H. Ayuntamiento del municipio de Ensenada, para que puedan tomar la decisión correcta sobre el aprovechamiento del biogás del RESA.

4. OBJETIVOS

4.1 General

- Evaluar la factibilidad de la generación de energía eléctrica, a partir de biogás producido en el relleno sanitario activo de Ensenada Baja California, con base en la cantidad de metano que se genera.

4.2 Específicos

- Cuantificar el volumen de metano que se genera en la celda más antigua del relleno sanitario.
- Estimar la cantidad de energía que se podría generar a través del aprovechamiento de biogás.
- Cuantificar la reducción de emisiones de metano a la atmósfera, si se emplea el biogás del relleno de Ensenada, como fuente de energía.

5. HIPÓTESIS

La cantidad de metano que contiene el biogás producido en el relleno sanitario es alta, debido a que diariamente se disponen en él cerca de 450 toneladas de residuos, además de que éstos residuos contienen cerca de 70% de materia orgánica y puesto que la generación de biogás depende en gran medida de la cantidad de materia orgánica presente en los Residuos Sólidos Urbanos, resulta viable el aprovechamiento de biogás para generar energía.

6. AREA DE ESTUDIO

6.1 Ubicación

El estudio se llevó a cabo en el vertedero activo de la ciudad de Ensenada, cabecera del municipio del mismo nombre en el Estado de Baja California, ubicado al noroeste de México. El municipio está localizado entre los 28° 00' y los 32° 16' latitud Norte y los 112° 47' y los 116° 53' de longitud Oeste.

El clima que prevalece es de tipo mediterráneo, que corresponde al BS s, según la clasificación de Köppen modificada por García (1973), perteneciente al grupo de los climas secos o áridos, con lluvias en invierno y media anual menor a 300 mm. La diferencia de temperatura entre el registro del año más frío (16.8°C) y el del más caluroso (19.7°C) es de 2.9°C.

El relleno activo de Ensenada, es un relleno sanitario en donde se disponen los Residuos Sólidos Urbanos generados en la ciudad de Ensenada, el cual tendrá una vida útil de 20 años, cuya apertura fue en el año 2004 y su clausura será en el 2024.

El vertedero se ubica al Este de la ciudad de Ensenada (Figura 2), en terrenos pertenecientes según catastro al Rancho Buenos Aires, aproximadamente en el kilómetro 11+800 de la carretera federal a Ojos Negros.



Figura 2. Ubicación del vertedero activo de Ensenada Baja California

6.2. Características generales

Cuenta con una superficie de terreno de 35 ha, de las cuales 20 ha se utilizan como área de disposición de los residuos, mientras que las 15 ha restantes están destinadas a las oficinas y al almacén temporal de residuos.

Contempla la construcción y operación de quince celdas (Figura 3), una de ellas es considerada como celda de emergencia, la superficie de cada una es de 50x247 m, cada una tiene una capacidad total de 309 964 m³, por lo que el RESA tiene una capacidad aproximada de 4.5 millones de toneladas. Actualmente se está llenando la celda número cuatro y ninguna de las celdas ha sido clausurada hasta el momento.



Figura 3. Construcción de la celda número cinco

El relleno sanitario cuenta con un dren perimetral para desviar el agua de lluvia captada a la periferia del sitio, hacia zonas en donde no existen depósitos de residuos, así mismo cuenta con pozos de venteo de biogás (Figura 4), los cuales se instalan en cada una de las celdas, se colocan entre cuatro y cinco pozos y están separados por una distancia de 45 m aproximadamente; hasta la fecha no se cuenta con un sistema de recolección activa de biogás.



Figura 4. Pozo de venteo

En el caso de los lixiviados se construyó un drenaje de captación, para posteriormente ser re-circulados a las capas del relleno siempre y cuando el biogás no esté contaminado, de ser así debe recibir tratamiento antes de ser re-circulado (Figura 5).

Los lixiviados son removidos del relleno para prevenir la contaminación de aguas subterráneas. Por lo que el propósito del sistema de recolección de lixiviados es colectarlos para su tratamiento o para su disposición.



Figura 5. Sistema de recolección de lixiviados

Con la finalidad de que los lixiviados no se infiltren al suelo, se coloca una geomebrana acompañada de una capa de grava en la parte inferior de cada una de las celdas, antes de comenzar a depositar los residuos como se muestra en la figura 6.

Por otro lado los residuos son cubiertos con capas de tierra, actualmente el relleno presenta dos tipos de coberturas que son la cobertura diaria (Figura 7) y la intermedia, puesto que la cobertura final se coloca una vez clausuradas las celdas y hasta el momento ninguna ha sido clausurada.



Figura 6. Recubrimiento inferior de las celdas



Figura 7. Cobertura de residuos (cobertura diaria)

6.3 Tasa de disposición de residuos

El RESA cuenta con registros históricos de disposición de residuos desde su apertura es decir a partir del 11 de agosto de 2004, dicho registró fue proporcionado por el encargado del mismo. La cantidad de residuos para el 2010 sólo contempla de Enero a Junio (Tabla II). La tasa promedio diaria de aceptación de residuos es de alrededor de 450 toneladas métricas.

Tabla II. Disposición de residuos del Relleno Sanitario de Ensenada

Año	Disposición de Residuos Estimada (Toneladas Métricas)
2004	44,386
2005	130,435
2006	132,208
2007	137,005
2008	139,693
2009	128,761
2010	64, 964

6.4 Composición de residuos

Existen estudios de caracterización de residuos del RESA objeto de este estudio, en los que se muestra que los residuos depositados en el relleno contienen alto porcentaje de materia orgánica, cerca del 70% como se muestra en la Tabla III (Armijo *et al*, 2009), lo que resulta importante puesto que de la cantidad de materia orgánica biodegradable dependerá la cantidad de biogás que pueda generarse.

Tabla III. Composición de residuos de la zona urbana de Ensenada, B.C.
(Tomada de Armijo, *et al*, 2009)

Tipo de residuo	Porcentaje
<i>Reciclables orgánicos</i>	
• Residuos alimenticios	34.28
• Papel y cartón	22.49
• Textiles	6.58
• Otros orgánicos	3.46
Total	66.81
<i>Reciclables inorgánicos</i>	
• Plástico	12.53
• Vidrio	3.80
• Latas	2.23
• Aluminio	0.45
• Otros inorgánicos	0.30
Total	19.31
<i>No reciclables</i>	
• Pañal desechable	7.14
• Residuos finos	1.30
• Tetrapack	0.58
• Residuos electrónicos	0.41
• Varios	4.46
Total	13.89

7. METODOLOGÍA

El tratamiento y obtención de los datos obtenidos en campo, se realizó con base en la metodología descrita por Hernández-Cano *et al*, en el 2006, Pérez *et al*, 1997 y SCS Engineers 2005 y 2007, de este ultimo también se obtuvo la metodología a emplear para el trabajo de gabinete. Para obtener el primer objetivo específico se monitoreo la composición y flujo del biogás en la celda uno, se estimó para el resto del año con *minitab*, mientras que para el segundo y tercer objetivo se empleo el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2. Con el MMB V2 se simularon cuatro escenarios con diferentes porcentajes de recuperación de biogás 40%, 60% y 80%.

7.1 Monitoreo de la composición de biogás

7.1.1 Equipo

Para llevar a cabo el trabajo de campo y determinar la composición de biogás, se utilizó el equipo GEM 2000 (Figura 8) de la marca Landfill Control Technologies (LANDTEC) el cual fue diseñado específicamente para su uso en rellenos sanitarios.

El instrumento analiza, despliega y almacena información relacionada con la composición de biogás, proporciona datos específicos sobre el contenido de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y nitrógeno (Balance), también puede calcular el flujo de biogás, la temperatura, presión estática y diferencial, así como el contenido calorífico, entre otros.

En conjunto con el GEM 2000, se utilizó un cabezal Accu-Flow de Landtec (Figura 9), el cual se introduce en cada uno de los tubos de venteo o chimeneas y se conecta al GEM 2000 para poder dar inicio a las lecturas.



Figura 8. Equipo GEM 2000



Figura 9. Accu-Flow

7.1.2 Puntos de muestreo y monitoreo

Se establecieron puntos de muestreo, que comprendieron cuatro pozos de venteo ubicados en la celda número uno, la cual es la más antigua del relleno, los tubos se encuentran distribuidos como se muestra en la figura 10. La elección de los puntos se realizó con base en la accesibilidad de los mismos.



Figura 10. Distribución de los puntos de muestreo

El monitoreo (Figura 11) se realizó durante Septiembre, Octubre y Noviembre del año 2009. En este periodo se llevaron a cabo lecturas en cada uno de los pozos de venteo o pozos, a lo largo de una semana (lunes a domingo). Las mediciones se desarrollaron en condiciones estáticas, es decir sin extracción forzada de biogás con una bomba de vacío.

Cada medición se ejecutó por triplicado para finalmente obtener un promedio, para disminuir el grado de error. Los datos registrados por el equipo se vaciaron a una hoja de cálculo en Excel® para analizarlos posteriormente.



Figura 11. Medición de biogás del pozo de venteo cuatro

7.2 Estimaciones de recuperación de biogás, capacidad eléctrica de la planta y reducción de emisiones de metano

Para proyectar la tasa de producción y recuperación de biogás, así como para la estimación de las reducciones de CH_4 y la capacidad de generación de electricidad, se utilizó un modelo matemático, conocido como Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0.

El modelo fue desarrollado por SCS Engineers en el 2009 para el Programa Landfill Methane Outreach (LMOP), se hizo usando datos de composición de 31 ciudades en cuatro regiones de México y una recolección/recuperación real de biogás de dos rellenos en México.

Este modelo está elaborado en una hoja de cálculo en Excel® y se basa en una ecuación de degradación de primer orden (1), para estimar las emisiones anuales sobre un lapso de tiempo específico.

Ecuación de primer grado

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

(1)

En donde:

Q_{LFG} = flujo de biogás máximo esperado ($m^3/año$)

i =incremento en tiempo de un año

n = año del cálculo – año inicial de la disposición de residuos

j = incremento de tiempo en 0.1 años

k = índice de generación de metano ($1/año$)

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

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

t_{ij} = edad de la sección j de la masa de residuos M_i dispuestos en el año i (años decimales)

MCF = factor de corrección de metano

F = factor de ajuste por incendio

En dicha ecuación la generación de biogás total para todos los residuos es calculada como la suma de las cantidades de generación de biogás en cada categoría de residuos orgánicos (Residuos de degradación muy rápida, de degradación moderadamente rápida, moderadamente lenta y muy lenta). Cada una de las categorías tiene asignado un valor de k y L_0 que son usados en el cálculo.

El modelo calcula automáticamente algunos datos como: el índice de generación de metano (k), generación potencial de metano (L_0), factor de corrección de metano (MFC), la eficiencia de captura, al igual que el factor de ajuste por incendio, esto con base en la información que se ingresa al modelo.

El valor de k o índice de generación de metano, describe el índice al cual los residuos dispuestos en el relleno sanitario se degradan y producen metano, y está relacionado con el período de vida de los residuos. Está en función de los siguientes factores: (1) contenido de humedad en los residuos, (2) la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, (3) pH, y (4) temperatura.

La generación potencial de metano (L_0) de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producida por una tonelada de residuos cuando ésta se degrada y depende casi exclusivamente de la caracterización de los residuos en el relleno sanitario.

El factor de corrección de metano (MCF) es un ajuste de la estimación de la generación de biogás que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. El MCF varía dependiendo de la profundidad de los residuos y el tipo de relleno sanitario.

En el caso del factor de ajuste por incendio, el modelo descuenta de la generación de biogás el porcentaje del área impactada por incendios multiplicado por la severidad del impacto (1/3 para impacto bajo, 2/3 para impacto medio, y 1 para impacto severo).

La eficiencia de captura permite estimar la cantidad de biogás que puede ser recuperado para combustión o uso benéfico. El modelo calcula la eficiencia tomando en cuenta los siguientes factores: cobertura del sistema de captura, profundidad de los residuos, tipo de cobertura y extensión, recubrimiento inferior,

compactación de residuos, tamaño de área de disposición activa, manejo de lixiviados.

El modelo requiere que el usuario ingrese información específica del relleno como es: la cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario anualmente, el año de apertura y clausura del sitio, profundidad promedio del relleno, tipo de cobertura del área con residuos y la superficie de cada uno, área con sistema de captura, área con recubrimiento inferior, compactación de residuos, afloramiento de lixiviados, caracterización de residuos en caso de que esta última exista.

Los datos sobre el relleno sanitario que se ingresaron al modelo se obtuvieron a través de una entrevista con el gerente del RESA en Julio del 2010 y se trabajó bajo los siguientes criterios:

1. Se emplearon los datos de disposición que se muestran en el apartado 6.3 perteneciente al área de estudio de este documento.
2. El relleno comenzó a operar en el 2004 y será clausurado en el 2024.
3. La profundidad del RESA está entre 18 y 20 m.
4. Los residuos aun no tiene cobertura final, 80% presentan cobertura intermedia, 20% cobertura diaria, por otro lado no existen residuos sin cobertura.
5. Actualmente no se tiene sistema de captura de biogás.
6. Todas las celdas con residuos cuentan con cubierta inferior llamada geomembrana.
7. Los residuos son compactados con frecuencia.
8. No existen afloramientos de lixiviados.
9. La disposición de residuos se realiza en un área específica.
10. Hasta el momento no se ha registrado ningún incendio.
11. En cuanto a la composición de residuos, se utilizaron los porcentajes proporcionados por Armijo y colaboradores en el 2009 (Apartado 6.4).

En el presente estudio se estimaron las tasas de recuperación de biogás proyectadas para el relleno sanitario hasta el año 2030. Se plantea que el aprovechamiento de biogás comenzará a partir del 2014, es decir cuando la mitad de su superficie del relleno este cubierta de residuos, y se corrió el modelo tomando en cuenta que la captura se realice con una eficiencia baja (40%), media (60%) y alta (80%).

De igual manera se plantea el aprovechamiento para el 2025, esto es una vez que el relleno haya sido clausurado, considerando que se instalará el sistema de captura en todo el relleno, mismo que contará con cobertura final en su totalidad, para dicho escenario únicamente se contempló una eficiencia del 80%.

7.3 Generación de biogás

En cuanto a la generación de biogás se obtuvo utilizando tanto los datos del monitoreo como los obtenidos por el modelo mexicano, ambos resultados fueron comparados para determinar que tanto varían.

Para ello se utilizaron los datos de flujo de biogás, en el caso de aquéllos obtenidos en campo, se ajustaron a un contenido de CH_4 del 50%, puesto que el modelo realiza los cálculos tomando en cuenta un valor constante de metano del 50%.

Esto se hizo con base en la metodología propuesta en los trabajos realizados por SCS Engineers y en el manual del modelo mexicano, en donde se plantean los siguientes pasos:

1. Multiplicar cada valor medido de flujo de biogás por el porcentaje de metano registrado en el momento en que se midió el flujo.
2. Convertir a flujo de biogás al 50% dividiendo el resultado entre 100 y finalmente multiplicando por dos.

Una vez obtenido el flujo de biogás al 50% para los datos de campo, se procedió a estimar el flujo de los meses en que no se tomaron mediciones para el año 2009, debido a que el dato de flujo que proporciona el modelo es anual y los resultados obtenidos de las mediciones en el relleno únicamente cubrieron tres meses.

La estimación del flujo de Enero a Agosto, se realizó empleando los datos de Septiembre a Noviembre, se obtuvo su desviación estándar para inferir el comportamiento de los meses anteriores a las mediciones, esto debido a la escasez de datos.

Para el caso del flujo de diciembre se obtuvo con el programa *minitab* versión 15, a través de un análisis de tendencia, para lo que simplemente se ingresaron las estimaciones de Enero a Agosto obtenidas anteriormente y los datos de Septiembre a Noviembre obtenidos en campo, el programa muestra la ecuación del análisis, la cual se sustituyó para inferir el flujo de biogás de Diciembre.

Posteriormente se calculó el error de las estimaciones o límites de significancia, empleando una función de auto-correlación con la ayuda del *minitab*, con la finalidad de verificar que tan certeros son los datos.

Debido a que el flujo calculado equivale simplemente a la producción de la celda uno, y puesto que sabemos que dicha celda contiene una masa de residuos de 309 964 ton, se extrapoló el flujo para el total de residuos dispuestos en el RESA en el 2009, multiplicando el flujo por la cantidad de residuos acumulada para ese año que fue de 712 488 toneladas.

Los datos de generación del modelo se obtienen de manera directa, ingresando la información requerida en la hoja de alimentación del programa. Una vez efectuado lo anterior se realizó la comparación de ambos flujos.

8. RESULTADOS

8.1. Composición y calidad de biogás

La producción promedio de metano osciló entre el 32.6 y 55.4 por ciento, como se puede observar en las tablas IV, V y VI, por lo que podemos decir que la calidad de biogás es buena.

A lo largo del monitoreo del relleno, se puede ver que la calidad de biogás difiere en cada uno de los pozos medidos, presentando el pozo tres una buena calidad puesto que presenta el mayor contenido de metano, menor cantidad de oxígeno y nitrógeno, por otra parte el biogás emitido en el tubo uno tiene una calidad más baja, presentando menor contenido de metano, mayor contenido de oxígeno y nitrógeno en comparación con los demás pozos.

Tabla IV. Resumen de monitoreo Septiembre

Pozo	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	Balance (%)	Flujo (m ³ /hr)	P. calor (kW)	Flujo 50% CH ₄
1	34.4	7.4	27	31.2	11.6	41.14	10.1
2	39.5	5.4	31.5	23.6	15.7	64.2	11.2
3	55.4	0.3	43.9	0.4	15.8	91.7	12.0
4	48.4	2.4	38.8	10.3	11.3	55.1	15.3

Tabla V. Resumen de monitoreo Octubre

Pozo	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	Balance (%)	Flujo (m ³ /hr)	P. calor (kW)	Flujo 50% CH ₄
1	32.6	8.2	26	33.1	12.2	41.8	8.0
2	38.6	6.2	30.6	24.6	14.7	59.5	11.4
3	55.0	0.2	44.7	0.2	16.8	96.8	18.5
4	49.2	2.7	38.7	10.1	10.0	51.3	9.8

Tabla VI. Resumen de monitoreo Noviembre

Pozo	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	Balance (%)	Flujo (m ³ /hr)	P. calor (kW)	Flujo 50% CH ₄
1	36.9	7.0	28.6	27.7	14.9	56.3	10.8
2	38.6	6.7	29.7	25.0	16.2	65.3	12.5
3	55.0	0.4	44.5	0.1	15.5	90.0	17.0
4	48.2	3.1	38	10.8	11.8	58.4	11.2

La tablas completas con los resultados para cada uno de los meses en que se realizó el monitoreo se encuentran disponibles en el Anexo 1.

8.2 Generación de biogás

8.2.1 Mediciones de campo

Partiendo del ajuste del flujo de biogás al 50% de metano (Tablas IV a VI), obtenido durante el monitoreo y de las proyecciones realizadas para los meses no monitoreados que se muestran en la tabla VII, el flujo total para el 2009 fue de 148.15 m³/hr, esto corresponde únicamente a la celda uno, por lo que se tendría un flujo para toda el área con residuos para ese año de 340.5 m³/hr. Las estimaciones de flujo mensuales, tienen un rango de confiabilidad del 95%.

Tabla VII. Proyecciones de flujo de biogás

Mes	Flujo de biogás (m ³ /hr)	Incremento	Desviación estándar
Enero	12.4399		0.0000
Febrero	9.0331	-0.2739	-3.4068
Marzo	10.7365	0.1886	-1.7034
Abril	12.4399	0.1587	0.0000
Mayo	14.1433	0.1369	1.7034
Junio	13.2916	-0.0602	0.8517
Julio	12.4399	-0.0641	0.0000
Agosto	11.5882	-0.0685	-0.8517
Septiembre	12.1500	0.0485	-0.2899
Octubre	12.1680	0.0015	-0.2719
Noviembre	13.0017	0.0685	0.5618
Diciembre	14.7220	0.0136	
Anual	148.1541		

8.2.2 Modelo Mexicano de biogás

Con base en el modelo, se estimó una generación de biogás de 353 m³/hr para el 2009 como se muestra en la tabla VIII, lo cual es similar al flujo inferido empleando los datos de campo, para el escenario de aprovechamiento con eficiencia de 80%.

En el caso del modelo se estimó la generación de biogás tanto en metros cúbicos por hora, en pies por minuto como en mmBTU por hora.

Tabla VIII. Generación de biogás del 2009 al 2013

Año	Biogás		
	(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)
2009	353	208	6.3
2010	416	245	7.4
2011	477	281	8.5
2012	536	315	9.6
2013	593	349	10.6

8.3 Recuperación de biogás

La recuperación proyectada de biogás en el 2014, contemplando la instalación del sistema de recolección, será de aproximadamente 338 m³/hr es decir 199 pies³/min, tomando en cuenta un escenario de eficiencia baja (40%); con una máxima en el 2025 de 770 m³/hr y disminuirá a 572 m³/hr para el 2030.

Tabla IX. Proyecciones de recuperación de biogás, eficiencia del 40%

Año	Recuperación de biogás		
	(m ³ / hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)
2014	338	199	6.0
2015	371	219	6.6
2016	406	239	7.3
2017	441	260	7.9
2018	478	281	8.5
2019	515	303	9.2
2020	554	326	9.9
2021	594	350	10.6
2022	636	374	11.4
2023	679	400	12.1
2024	724	426	12.9
2025	770	453	13.8
2026	724	426	12.9
2027	681	401	12.2
2028	641	378	11.5
2029	605	356	10.8
2030	572	337	10.2

Bajo un escenario de rango medio (60%) la recuperación será de 506 m³/hr (298 pies³/min), cuya máxima es de 1,155 m³/hr en el 2025, con una disminución paulatina a lo largo del tiempo hasta llegar a 858 m³/hr para el año 2030.

Tabla X. Proyecciones de recuperación de biogás, eficiencia de 60%

Año	Recuperación de biogás		
	(m ³ / hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)
2014	506	298	9.1
2015	557	328	10.0
2016	609	358	10.9
2017	662	390	11.8
2018	717	422	12.8
2019	773	455	13.8
2020	831	489	14.9
2021	891	525	15.9
2022	954	561	17.0
2023	1,018	599	18.2
2024	1,086	639	19.4
2025	1,155	680	20.6
2026	1,085	639	19.4
2027	1,021	601	18.2
2028	962	566	17.2
2029	908	535	16.2
2030	858	505	15.3

Bajo un escenario de rango medio (80%) la recuperación será de 675 m³/hr (397 pies³/min), cuya máxima es de 1,540 m³/hr en el 2025, con una disminución paulatina a lo largo del tiempo hasta llegar a 1,145 m³/hr para el año 2030.

Tabla XI. Proyecciones de recuperación de biogás, eficiencia de 80%

Año	Recuperación de biogás		
	(m ³ / hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)
2014	675	397	12.1
2015	743	437	13.3
2016	812	478	14.5
2017	883	520	15.8
2018	956	563	17.1
2019	1,031	607	18.4
2020	1,108	652	19.8
2021	1,189	700	21.2
2022	1,272	748	22.7
2023	1,358	799	24.3
2024	1,447	852	25.9
2025	1,540	907	27.5
2026	1,447	852	25.9
2027	1,361	801	24.3
2028	1,283	755	22.9
2029	1,211	713	21.6
2030	1,145	674	20.5

Considerando la recuperación de biogás una vez clausurado el relleno sanitario, tomando en cuenta la instalación del sistema de recuperación en todo el relleno y que todos los residuos tendrán cubierta final, además de una eficiencia de captura del 80%, la recuperación de biogás será de 1,540 m³/hr en el 2025, disminuyendo hasta 1,145 m³/hr para el 2030 (Tabla XII).

Tabla XII. Proyecciones de recuperación de biogás en el 2025 (80%)

Año	Recuperación de biogás		
	(m ³ / hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)
2025	1,540	907	27.5
2026	1,447	852	25.9
2027	1,361	801	24.3
2028	1,283	755	22.9
2029	1,211	713	21.6
2030	1,145	674	20.5

8.4 Estimaciones de capacidad eléctrica y reducción de emisiones de CH₄

El modelo consideró ciertos parámetros acerca del contenido de metano, el factor de correlación, junto con los valores de L_0 y k (Tabla XIII), para estimar la capacidad de la energía que podrá producirse así como la cantidad en que se reducirán las emisiones de metano partiendo de que en el 2014 se comience con el aprovechamiento de biogás y por otro lado que el aprovechamiento comience en el 2025. Las estimaciones se hicieron hasta el 2030.

Parámetros del modelo

Contenido de metano en el biogás: 50%

Factor de Corrección de Metano MCF= 1.0

Tabla XIII. Valores de k y L_0 , según la categoría de degradación de residuos

Categorías de residuos	Degradación Rápida	Degradación Moderadamente Rápida	Degradación Moderadamente Lenta	Degradación Lenta
Índice de generación CH ₄ (k)	0.100	0.050	0.020	0.010
Potencial de generación CH ₄ (L_0) (m ³ /Mg)	69	149	212	202

Observaciones

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

8.4.1 Capacidad eléctrica

Suponiendo un comienzo de generación de energía en el 2014, se estima que habrá suficiente biogás disponible como para alimentar una planta de energía de 0.6 MW si la eficiencia el sistema de captura fuera demasiado baja (Tabla XIV), lo cual resulta poco probable debido a que se planea colocar un sistema de captura en todo el área con residuos, disponible hasta esa fecha y debido a que se dará mantenimiento al sistema, así como una operación adecuada. Considerando el escenario de eficiencia media la planta tendrá una capacidad de 0.8 MW (Tabla XV), finalmente considerando una eficiencia alta la cual resulta ser la más probable, se tendrá una capacidad de 1.1 MW (Tabla XVI).

Tabla XIV. Capacidad de la planta de energía y reducción de emisiones, considerando una eficiencia del sistema de captura del 40%

Año	Capacidad máxima de electricidad (MW)	Reducción de emisiones (ton CO₂ e/año)
2014	0.6	22,236
2015	0.6	24,462
2016	0.7	26,737
2017	0.7	29,071
2018	0.8	31,471
2019	0.9	33,944
2020	0.9	36,497
2021	1.0	39,138
2022	1.1	41,873
2023	1.1	44,712
2024	1.2	47,659
2025	1.3	50,726
2026	1.2	47,648
2027	1.1	44,829
2028	1.1	42,244
2029	1.0	39,871
2030	0.9	37,692

Tabla XV. Capacidad de la planta de energía y reducción de emisiones, considerando una eficiencia del sistema de captura del 60%

Año	Capacidad máxima de electricidad (MW)	Reducción de emisiones (ton CO₂ eq/año)
2014	0.8	33,355
2015	0.9	36,693
2016	1.0	40,106
2017	1.1	43,606
2018	1.2	47,206
2019	1.3	50,915
2020	1.4	54,745
2021	1.5	58,706
2022	1.6	62,810
2023	1.7	67,067
2024	1.8	71,489
2025	1.9	76,088
2026	1.8	71,472
2027	1.7	67,243
2028	1.6	63,366
2029	1.5	59,807
2030	1.4	56,538

Tabla XVI. Capacidad de la planta de energía y reducción de emisiones, considerando una eficiencia del sistema de captura del 80%

Año	Capacidad máxima de electricidad (MW)	Reducción de emisiones (ton CO₂ eq/año)
2014	1.1	44,473
2015	1.2	48,923
2016	1.3	53,475
2017	1.5	58,142
2018	1.6	62,942
2019	1.7	67,887
2020	1.8	72,994
2021	2.0	78,275
2022	2.1	83,746
2023	2.2	89,423
2024	2.4	95,318
2025	2.5	101,451
2026	2.4	95,296
2027	2.3	89,657
2028	2.1	84,487
2029	2.0	79,743
2030	1.9	75,384

En caso de que se optara por implementar un sistema de captura de biogás hasta que el relleno haya sido clausurado, esto es en el año 2025, se tendrá que el biogás sería el necesario como para la operación de una planta de energía de 2.5 MW para una eficiencia alta (80%) (Tabla XVII).

Tabla XVII. Capacidad de la planta de energía y reducción de emisiones, considerando una eficiencia del sistema de captura del 80%, 2025

Año	Capacidad máxima de electricidad (MW)	Reducción de emisiones (ton CO₂ eq/año)
2025	2.5	101,451
2026	2.4	95,296
2027	2.3	89,657
2028	2.1	84,487
2029	2.0	79,743
2030	1.9	75,384

8.4.2 Reducción de las emisiones de metano proyectadas

Un proyecto de generación de energía en el relleno representaría una reducción de emisiones de metano de aproximadamente 640,810 ton CO₂e durante el periodo de 2014 a 2030 considerando una eficiencia de 40% en el sistema de captura (Tabla XIV), si la eficiencia fuera de 60% las reducciones serían cerca de 961, 212 ton CO₂e (Tabla XV) y tomando en cuenta una eficiencia de 80% se tendría una reducción de 1,281 616 ton CO₂e (Tabla XVI). De lo contrario con un proyecto de generación de energía implementado en el 2025, podrían reducirse 526, 018 ton CO₂e, considerando únicamente un periodo de cinco años (Tabla XVII).

Las tablas completas en donde se muestran los resultados de recuperación de biogás, capacidad eléctrica de la planta y la estimación de las reducciones de metano, para cada uno de los escenarios se encuentran en el Anexo 2.

9. DISCUSION

A pesar de que actualmente el relleno aun no llega a la producción máxima de metano, la cantidad que se genera actualmente resulta ser suficiente como para generar energía, alimentando de manera inicial una planta de 1.1 MW.

Se ha demostrado que un biogás de buena calidad es aquel que contiene alto contenido de metano y bajos niveles de oxígeno y nitrógeno, autores como Flores *et al*, 2008; SCS Engineers, 2005, 2007 y 2009; Hernández-Cano *et al*, 2006; Vaquero, 2004; Bautista, 1998 y Shah, 2000, concuerdan con ello; establecen que en la mayoría de los casos el metano producido en los rellenos sanitarios oscila entre 50% y 60%, mientras que el nitrógeno y oxígeno debe ser cercano al cero por ciento. La calidad de biogás varía en cada uno de los pozos monitoreados, teniendo así que el tres y el cuatro cumplen con las características de un gas de buena calidad, mientras que los pozos uno y dos registraron cantidades de metano inferiores a 40%.

Esta diferencia puede atribuirse a la ubicación de los tubos, puesto que los pozos tres y cuatro se encuentran en lugares con mayor cantidad de residuos, mientras que el uno y dos están localizados en la periferia de la celda, siendo menor la cantidad de residuos dispuesta, de igual manera los pozos tres y cuatro deben tener una profundidad mayor a la del uno y dos, y por tanto las partes menos profundas son más susceptibles a la infiltración de aire, lo que influye directamente en la calidad de biogás.

Como se mencionó en el capítulo uno, la producción de biogás depende de varios factores, entre los principales se encuentra la composición de los residuos; en el relleno sanitario de Ensenada cerca del 70% de los residuos son orgánicos, por lo que se esperaba que el biogás producido tuviera más de 50% de metano. Si se toman en cuenta las fases de generación de metano propuestas por Shah (2000) y por Flores *et al* (2008), se puede decir que la producción de biogás de la celda

monitoreada se encuentra terminando la fase III o fase ácida, por lo que la producción de biogás debería estar por alcanzar el mayor contenido de CH_4 posible, debido a que está por comenzar la fase metanogénica la cual puede durar hasta 40 años, sin embargo existen valores aun muy bajos principalmente para los pozos uno y dos, esto puede deberse a su ubicación dentro de la celda y a la profundidad.

Además, el clima y la humedad también juegan un papel importante, pues la falta de humedad provoca una disminución en la generación de metano, mientras que temperaturas altas favorecen la descomposición de los residuos. Siendo así otoño e invierno, cuando se registran cantidades menores de metano en comparación con aquellas generadas en periodos con temperaturas más altas como es primavera y principalmente verano. Es importante mencionar que debido a que los residuos se disponen en diferente tiempo, la producción de metano en cada celda se encuentra en una fase diferente de descomposición por lo que la producción máxima de metano se originará en diferentes periodos.

El flujo de biogás obtenido con cada uno de los métodos (de manera directa y a través del modelo) es similar bajo el escenario de recuperación alta del modelo, ya que ambos consideran parámetros como profundidad del relleno, edad de los residuos y su composición entre otros, ya que estos resultan determinantes en la producción de biogás como lo mencionan Klusman *et al*, 2000; Vaquero, 2004; SCS Engineers, 2005, 2007 y Flores 2008. Por otro lado el monitoreo de los pozos de venteo se llevó a cabo únicamente en un área limitada del relleno (celda número uno) y se generalizó para las demás celdas con residuos al igual que como lo hace el modelo.

Cierto es que en cada celda variará la generación de metano dependiendo de la edad de la misma, sin embargo en ambos métodos está suponiéndose que la composición de los residuos sería similar en todas las celdas porque las fuentes generadoras de residuos son las mismas. Se asume que todas las celdas están

expuestas a las mismas variaciones climáticas, por lo tanto responderán a las mismas condiciones, por otro lado el modelo considera una producción constante de biogás pues no toma en cuenta variaciones a lo largo del año, siendo que la generación de biogás es diferente según la estación del año, mientras que esta divergencia está reflejada en las mediciones de campo.

Aun con proyecciones de recuperación obtenidas de un modelo matemático, seguirá existiendo cierto grado de incertidumbre en los resultados, ya que en ocasiones resulta difícil modelar la generación y recuperación de biogás en forma exacta debido a las limitaciones en la información disponible para alimentar el modelo.

Resulta complejo comparar los resultados obtenidos en los diferentes trabajos realizados sobre pre-factibilidad del aprovechamiento de metano de los rellenos sanitarios, debido a que cada relleno tiene características particulares, por lo que los flujos de biogás, la capacidad eléctrica, los costos de la implementación y la reducción de emisiones de metano, pueden variar considerablemente, de ahí que resulta conveniente realizar estudios de pre-factibilidad en el relleno para poder determinar su viabilidad.

Los flujos de recuperación de biogás de proyectos existentes varían según el proyecto, en este caso el flujo máximo registrado se encuentra entre 1,155 y 1,540 m^3/hr contemplando únicamente los escenarios de recuperación de 60% y 80% respectivamente. Willumsen en el 2004, realizó un listado de los proyectos de aprovechamiento de biogás a nivel mundial, el cual podemos tomar como base para determinar el flujo máximo y mínimo que presenta cada uno de los proyectos.

Por ejemplo para el caso de Monterrey, el relleno tiene un flujo de 3,800 m^3/hr lo que representa un flujo mayor que el relleno de Ensenada, sin embargo existen países como Sudáfrica en el cual existen cuatro plantas de extracción de biogás teniendo una recuperación total de 1,600 m^3/hr , es decir que aproximadamente

cada una de ellas es capaz de recuperar cerca de 400 m³/hr, por lo que la proyección realizada para Ensenada sería equivalente a la producción de las cuatro plantas de Sudáfrica, siendo cada planta por separado inferior al relleno objeto de este estudio y sin embargo estos proyectos ya están operando y fueron considerados como viables. SCS Engineers (2007) en su informe sobre la prueba de extracción y estudio de pre-factibilidad del relleno clausurado de Ensenada, concluye en que el flujo de recuperación será de 560 m³/hr, en el 2006, con lo que podemos decir que el flujo del relleno activo es mayor, puede deberse en parte a las dimensiones del relleno y por tanto a la capacidad máxima de disposición de residuos.

Al igual que la recuperación de biogás, la capacidad eléctrica de cada proyecto difiere, teniendo así que países como China, Suiza, Dinamarca, Noruega, Polonia y República Checa, entre otros, tienen sistemas de recuperación con una capacidad de 1 MW o menor, mientras que países como Estados Unidos, Canadá y México cuentan con sistemas de recuperación de 7 MW o más (Willumsen, 2004), por lo que las proyecciones para el relleno de Ensenada son viables y se encuentran dentro de los rangos de recuperación de biogás según los proyectos de esta índole de todo el mundo. Por ello es que resulta importante realizar proyectos de pre-factibilidad en los rellenos en los que se contemple el monitoreo en campo de ser posible considerando la condición activa de extracción de biogás.

La capacidad del relleno clausurado de Ensenada es menor a 1 MW según SCS Engineer (2007), aun tomando en cuenta una eficiencia del 90%, por lo que se concluyó que no es viable la generación de energía pero si la utilización de biogás de manera directa, esto es, como gas natural al igual que la venta de CER's. Por esto, en primera instancia es viable la utilización de biogás del relleno activo de Ensenada para generar energía, ello sin considerar estudios económicos, en caso de realizarse dichos estudios resultando poco viable la instalación del sistema de captura con base en la inversión requerida, puede optarse por el uso directo de biogás, así como por la venta de bonos de carbono.

El principal beneficio que trae consigo el aprovechamiento de biogás es la reducción de emisiones de metano, los cuales aun de manera individual (por proyecto) representan reducciones considerables como en el caso del relleno de Ensenada en el cual las reducciones serían de 1, 281,616 ton CO₂e del 2014 al 2030, en el escenario planteado para el 2014 y de 526, 018 ton CO₂e del 2025 al 2030, para el planteado en el 2025.

La venta de los bonos de carbono representaría ingresos para el municipio del orden de de los 3.8 a los 12.8 millones de dólares de 2014 a 2030, comenzado el aprovechamiento de biogás en el 2014, por el contrario si se aprovecha a partir del 2025 será de entre 1.6 y 5.3 millones de dólares de 2025 a 2030.

En los proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) parte de las estrategias del Protocolo de Kioto para la reducción de emisiones desarrollados en México, las reducciones oscilan entre 41, 681 ton CO₂e/año para proyectos pequeños (Tultitlán, en el Estado de México) y 225, 323 ton CO₂e/año para aquellos más grandes como Monterrey; por lo que las reducciones estimadas en el relleno de Ensenada resultan considerables. Se tienen contemplados 11 proyectos (Aguascalientes, Ags, Ecatepec, Tecamac, y Tultitlán en el Edo Mex, Zapopan y Puerto Vallarta, en Jalisco, Ciudad Juárez, Chih, Mérida, Yucatan, Durango, Dgo, Milpilllas, Morelos, Monterrey, NL) los cuales en conjunto representarían una reducción de 1,399, 915 ton CO₂e/año.

10. CONCLUSIONES

- ✓ En el relleno sanitario activo de Ensenada, B.C. se genera la cantidad suficiente de metano para generar energía eléctrica, alimentado inicialmente una planta de 1.1 MW.
- ✓ El contenido de metano en el biogás medido en la celda uno, tuvo valores entre 33% y 55% y un flujo sin extracción forzada estimado para las cuatro celdas del relleno de 340.5 m³/h.
- ✓ De los escenarios simulados con el Modelo Mexicano de Biogás se puede concluir que la recuperación del 80% predice un flujo de biogás de 353 m³/h para 2009, valor similar al determinado en campo.
- ✓ La recuperación de biogás para el 2014 bajo el escenario de eficiencia de captura de 80%, el cual resulta ser el más probable, será de aproximadamente 675 m³/hr, con un máximo de 1,540 m³/hr en el 2025. La tasa de recuperación disminuirá en el 2027 a 1,361 m³/hr, hasta 1,145 m³/hr en el 2030.
- ✓ Si el aprovechamiento se plantea para el 2014, con una eficiencia alta, se estima que habrá suficiente biogás disponible como para alimentar una planta de energía de 1.1 MW, mientras que la capacidad será de 2.5 MW, si se aprovecha en el 2025. Sin embargo en cualquiera de estos escenarios se perderá energía disponible por lo que sería mejor iniciar su aprovechamiento lo antes posible.
- ✓ Bajo el escenario de 80% de captura de biogás, teóricamente el municipio tendría un ahorro en el 2014 del orden de los \$ 16.7 millones de pesos a través de la utilización de la energía producida en el relleno, contemplando que el costo de la energía para la categoría de servicios (alumbrado público) según el Sistema de Información Energética, en mayo de 2010 fue de 1.836 pesos/kWh,

tomando en cuenta que la capacidad de la planta sea de 1.1 MW operando 8,000 horas al año.

- ✓ En el escenario de aprovechamiento en el 2025, con una eficiencia de captura de 80%, el municipio tendría un ahorro de \$38 millones de pesos en dicho año, a través de la utilización de la energía producida en el relleno, considerando que el costo de la energía es de 1.836 pesos/kWh.
- ✓ Bajo el escenario de 80% la captura y combustión del biogás para producir energía, generará una reducción de aproximadamente 44, 473 ton de CO₂e/año en el 2014, con un total de 1, 281,616 toneladas de CO₂e hasta el 2030. Que pueden representar ingresos adicionales para el municipio del orden de los 3.8 a los 12.8 millones de dólares del 2014 a 2030, dependiendo del valor en que se venda la tonelada de CO₂e a \$US 3/ton CO₂e ó a \$US 10/ton CO₂e.
- ✓ En el supuesto de que la recuperación sea a partir del 2025 las reducciones serían de alrededor de 101, 451 ton CO₂e/año, con un total de 526, 018 ton CO₂e tomando en cuenta las reducciones estimadas hasta el 2030. Que puede representar un ingreso adicional para el municipio del orden de 1.6 y 5.3 millones de dólares del 2025 al 2030, dependiendo de si se vende la tonelada de CO₂e a \$US 3/ton CO₂e ó a \$US 10/ton CO₂e.
- ✓ La utilización de biogás traerá consigo beneficios ambientales, debido tanto a las reducciones de manera directa que se obtendrá de la combustión de biogás como por el posible desplazamiento de combustibles convencionales.

11. RECOMENDACIONES

Continuar con las mediciones en el relleno, con la finalidad de obtener una mayor cantidad de registros. Así como la realización de pruebas empleando bombas de vacío con la finalidad de determinar el radio de influencia de los pozos y simular la extracción dinámica de biogás y contar con datos lo más cercano posible a el funcionamiento real de la recuperación de biogás.

Llevar a cabo un estudio de pre factibilidad económica, sobre la implementación de un proyecto de generación eléctrica tomando en cuenta los costos de infraestructura, así como su operación y mantenimiento, para determinar la viabilidad de la implementación tomando en cuenta la inversión requerida.

Realizar una investigación de los posibles compradores de energía, principalmente aquellos cercanos al relleno con la finalidad de disminuir los costos de distribución, así como sus necesidades y los costos que estas dispuestos a pagar, puesto que este es un punto fundamental a considerar si el proyecto no solamente se implementa para solventar las necesidades del relleno sino para la venta de la energía.

Considerar la clausura de las celdas conforme se van llenando, lo que permitirá recuperar el biogás, generar energía y mitigar emisiones, lo antes posible, es decir antes del 2014, si fuera posible, y evitar así la pérdida de biogás.

Puesto que se ha demostrado que el aprovechamiento de biogás de los vertederos para diferentes fines (energía, etanol, gas natural, entre otros) es una alternativa que permite la disminución de gases contaminantes, resulta conveniente que se planteen estrategias a nivel nacional y local que impulsen la viabilidad de la utilización de biogás como fuente alterna energética, particularmente en rellenos de grandes dimensiones y con altos contenidos de materia orgánica.

12. GLOSARIO DE TERMINOS

Anaerobio: proceso bioquímico que ocurre en ausencia de oxígeno. También se nombra con este término a los microorganismos que no requieren oxígeno para vivir.

BTU: Unidad Térmica Inglesa, es la cantidad de calor que se requiere para incrementar en un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua pura bajo condiciones normales de presión y temperatura. Una BTU equivale a 0,252 kcal.

Biogás: mezcla de gases resultado del proceso de descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos, constituida principalmente por metano y dióxido de carbono.

Celdas: es la conformación geométrica que se le da a los residuos sólidos municipales y al material de cubierta, debidamente compactados.

Combustibles fósiles: Materiales comburentes de origen orgánico que incluyen los hidrocarburos, el gas natural y el carbón.

CO₂ equivalente: concentración de dióxido de carbono que podría causar el mismo grado de forzamiento radiativo que una mezcla determinada de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero.

Disposición: se refiere al depósito permanente de los residuos sólidos tanto en sitios habilitados total o parcialmente para minimizar los impactos negativos a la salud pública y al ambiente (rellenos sanitarios y rellenos de tierra controlados), como en sitios no controlados (tiraderos a cielo abierto).

Descomposición: el decaimiento de los residuos orgánicos por medios bacterianos, químicos o térmicos.

Efecto invernadero: Propiedad de la atmósfera de dejar entrar de una manera fácil la radiación solar, pero que a la vez dificulta la salida del calor. Este fenómeno se acentúa por la acumulación de gases en el aire producidos por la combustión de hidrocarburos y otras actividades humanas.

Factor de emisión: corresponde a la unidad de conversión para estimar emisiones a partir de datos de actividad; el factor de emisión se expresa en unidades de cantidad de emisiones por unidad de masa de la actividad o fuente generadora de gases de efecto invernadero.

Fuente de Emisión: proceso o mecanismo que libera algún gas de efecto invernadero.

Forzamiento radiativo: cambio en la irradiación neta vertical (expresada en W/m^2).

Gas de Efecto Invernadero: se refiere a cualquier constituyente gaseoso de la atmósfera que tiene la capacidad de absorber y re-emitir radiación infrarroja. Esos gases pueden clasificarse en aquellos generados de manera natural o aquellos emitidos como resultado de las actividades socioeconómicas del hombre.

Gg: unidad de medida de masa equivalente a 109 gramos, empleada para las emisiones de GEI. Un gigagramo equivale a 1,000 toneladas.

Lixiviado: líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua.

Metano: es un gas incoloro, más ligero que el aire, poco soluble en el agua y tiene por fórmula CH_4 . Es el más simple de todos los compuestos orgánicos, lo cual explica su abundancia en la naturaleza, ya que se desprende de los materiales orgánicos en estado de descomposición. El metano se forma por combinación del hidrógeno con el carbono, es poco oloroso, se consume como combustible.

Potencial de calentamiento global: índice relativo empleado para comparar el impacto que tiene en el clima la emisión de un kilogramo de un gas de efecto invernadero comparado con la emisión de un kilogramo de dióxido de carbono.

Relleno Sanitario: es una obra de infraestructura que, siguiendo los requisitos que marca la NOM-083-SEMARNAT-2005, aplica métodos de ingeniería para evitar la contaminación del suelo, agua y aire que provoca la basura. Se utiliza para la disposición final de los residuos sólidos urbanos, los cuales se depositan, esparcen, compactan y se cubren con una capa de tierra.

Relleno controlado: sitio destinado para la disposición de RSU, que cuenta parcialmente con inspección, vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas.

Tiradero a cielo abierto: son aquellos sitios en donde ilegalmente se depositan y acumulan los RSU sin ningún control técnico. Estos sitios pueden ser lotes baldíos, barrancas, ríos y otros cuerpos de agua.

Tg (teragramo): medida de masa que es igual a un billón de gramos (10^{12} gr).

Componente traza: es aquel que se encuentra a un nivel de concentración inferior a 100 ppm (100 $\mu\text{g/g}$; 0,01%).

Vida útil: periodo de tiempo en el que el sitio de disposición final será apto para recibir los residuos sólidos urbanos.

13. REFERENCIAS

Aguilar-Virgen, Q., Armijo- de Vega, C., & Taboada-González, P. (2009). El potencial energético de los residuos sólidos municipales. *Revista académica de la FI-UADY Ingeniería, ISSN 1665-529X* , 59-62.

Aguilar-Virgen, Q., Armijo-de Vega, C., & Taboada-González, P. (2009 a). II Encuentro de expertos en residuos sólidos. *Captura de biogás del relleno sanitario de Ensenada, B.C. Morelia, Michoacán.*

Armijo, C., Aguilar, Q., Taboada, P., Lozano, G., & Buenrostro, O. (2009). II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. *Comparación de la composición de los residuos sólidos de una comunidad urbana y una rural de Baja California, México: Retos para su manejo adecuado.* Baranquilla, Colombia.

Arvizu, J. (1997). Energía a partir de la basura.Tendencias Tecnologicas. *Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas*, 273-279.

Arvizu, J., & Huacuz, J. (2003). Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. *Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas* , 118-123.

Bautista, C. (1998). *Residuos. Guía técnico jurídica.* España: Mundi Prensa.

Deffis, A. (1991). *La basura es la solución.* México: Concepto, S.A.

FIRA. (2008). *Reporte de inventario corporativo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2008 de FIRA-Banco de México.* México.

Flores, R., Muñoz-Ledo, R., Flores, B., & Cano, K. (2008). Estimación de la generación de energía a partir de la biomasa para proyectos del Programa de Mecanismo de Desarrollo Limpio. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* , 35-39

Hernández-Cano, G., & Durán-de-Bazúa, C. (2006). Productividad de biogás en un relleno sanitario clausurado. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales* .

Hilkiah, A., Abowei, M., Ayotamuno, M., & Eze, C. (2008). Effect to total solids concentration of municipal solid waste on the biogas produced an anaerobic continuous digester. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal* , 1-10.

Jimenez, B. (2001). *La contaminación Ambiental en México: causas, efectos y tecnologías apropiadas*. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C, Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA.

Klusman, R., & Dick, C. (2000). Seasonal variability in CH₄ Emissions from a Landfill a cool, semiarid climate. *Journal of the Air and Waste Management Association* , 1632-1636.

LandTec. (2005). *GEM TM 2000 Operation Manual*. Estados Unidos de América.

Pérez, J., Chávez, J., & Cebada, B. (1997). XI Congreso Nacional de FEMISCA. *Evaluación Técnico-Económica de dos alternativas de aprovechamiento de biogás en un Relleno Sanitario*. México.

Quadri, G., Wehenpohl, G., Sánchez, J., López, A., & Nyssen, A. (2003). *La basura en el limbo: Desempeño de gobiernos locales y participación privada en el manejo de residuos urbanos*. México.

Robles, F. (2008). *Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios*. México: Instituto Politécnico Nacional.

Sanderson, J., Hettiaratchi, P., Hunte, P., Hurtado, O., & Keller, A. (2008). Methane balance of a bioreactor Landfill Latin America. *Journal of the air and waste management association* , 620-628.

SENER. Sistema de Información Energética, Precios medios facturados por tarifa en la Comisión Federal de Electricidad. Disponible en <http://sie.energia.gob.mx/sie/> Consultada en Julio 2010.

SCS, E. (2005). *Reporte de prueba de bombeo y estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás de energía en el relleno sanitario de Montevideo, Montevideo Uruguay*. Uruguay.

SCS, E. (2005a). *Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía relleno sanitario Queretaro, Queretaro México*. Disponible en <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/>. Consultada Mayo 2010

SCS, E. (2005b). *Estudio de pre-factibilidad de recuperación y utilización en el relleno sanitario de Chihuahua, Chihuahua, México*. Disponible en <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/>. Consultada Mayo 2010

SCS, E. (2007). *Informe de la prueba de extracción y estudio de pre-factibilidad para recuperación y utilización de biogás en el relleno sanitario de Ensenada, Ensenada, México*. México.

SCS, E. (2009). *Manual del usuario, Modelo Mexicano de biogás versión 2.0*. Disponible en <http://epa.gov/lmop/international/mexicano.html>. Consultada Abril 2010.

SEMARNAP. (1997). *Estadísticas e indicadores de inversión sobre residuos sólidos municipales en los principales centros urbanos de México*. México: Santaló, Estudios y Proyectos S. A. de C. V.

SEMARNAT. (2008). *Compendio de estadísticas ambientales 2008*. México. Disponible en http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/. Consultada en Mayo de 2010.

SEMARNAT. (2001). *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos en los municipios*. México.

SEMARNAT. (8 de Octubre de 2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. *Diario Oficial de la Federación* , págs. 1-28.

SEMARNAT. (2 de Octubre de 2009). Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012. *Diario Oficial* , págs. 1-113.

SEMARNAT. (29 de Enero de 1999). Reglamento para el control de la calidad ambiental del municipio de Ensenada, Baja California. *Periodico Oficial No. 5, Tomo CVI* , págs. 1-33.

SEMARNAT, & INE. (2006). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*. México.

Seoáñez, M., Bellas, E., Lactaria, P., & Seoáñez, P. (2000). *Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos*. Madrid: Colección Ingeniería del Medio Ambiente.

Shah, K. (2000). *Basics of solid and hazardous waste management technology*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

Vaquero, D. (2004). *Manual de diseño y construcción de vertederos de residuos sólidos urbanos*. Madrid: Gráficas Arias Montaña S.A.

Willumsen, H. (2004). Land Fill Gas overy Plants- looking at types and numbers worldwid; WMW, *Review Issue* 2004-2005.

Weitz, M., Coburn, J., & Salinas, E. (2008). Estimating national landfill methane emissions: an application of the 2006 intergovernmental panel on climate change waste model in Panama. *Journal Air & Waste Management Association* , 636-640.

U.S Energy Information Administration. International Energy Statistics. Disponible en <http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=5&pid=5&aid=8>. Consultada en Julio de 2010.

ANEXOS

ANEXO I. COMPOSICIÓN DE BIOGÁS

Monitoreo mes de septiembre

COMPOSICIÓN, FLUJO Y PODER CALORÍFICO DE BIOGÁS									
Pozo	Fecha	CH ₄ %	CO ₂ %	O ₂ %	Balance %	Temp °C	Flujo m ³ /h	P. cal kW	P. Est. (mb)
P-01	9/16/2009	37.0	28.8	6.7	27.4	32.4	10.4	40	0.1
P-01	9/17/2009	34.1	27.3	7.7	31.0	33.1	10.3	36	0.1
P-01	9/18/2009	33.8	26.4	7.8	32	33.4	8.8	30.8	0
P-01	9/19/2009	32.4	26.2	7.7	33.8	33.1	13.3	44.5	0.1
P-01	9/20/2009	34.8	26.2	7.3	31.7	35.4	15.0	54.4	0.2
P-02	9/16/2009	33.6	26.6	8.1	31.8	34.4	14.8	51.5	0.2
P-02	9/17/2009	43.3	34.2	4.5	18.0	38.6	15.9	71.8	0.2
P-02	9/18/2009	42.6	32.9	5.0	19.4	37.8	6.4	28.4	0
P-02	9/19/2009	38.4	31.6	5.1	25.0	38.3	19.1	77	0.3
P-02	9/20/2009	39.8	32.1	4.5	23.6	39.2	22.3	92.5	0.5
P-03	9/16/2009	55.5	43.7	0.7	0.2	43.7	17.4	100.5	0.3
P-03	9/17/2009	55.1	44.4	0.3	0.13	45.5	19.1	110.3	0.3
P-03	9/18/2009	55.1	44.6	0.2	0.2	45.7	5.8	33.6	0
P-03	9/19/2009	55.3	43.2	0.2	1.3	46.0	23.3	135	0.5
P-03	9/20/2009	55.9	43.7	0.2	0.3	46.7	13.5	79.2	0.1
P-04	9/16/2009	47.2	38.2	3.0	11.6	41.1	6.6	32.0	0
P-04	9/17/2009	49.2	39.2	2.5	9.2	40.9	9.7	49.8	0
P-04	9/18/2009	51.3	40.4	2.1	6.3	40.9	4.2	22.8	0
P-04	9/19/2009	43.9	37.0	2.7	16.4	41.2	26.5	121.2	0.7
P-04	9/20/2009	50.5	39.5	1.9	8.2	41.5	9.5	49.6	0.0

Monitoreo mes de octubre

COMPOSICIÓN, FLUJO Y PODER CALORÍFICO DE BIOGÁS									
Pozo	Fecha	CH ₄ %	CO ₂ %	O ₂ %	Balance %	Temp. °C	Flujo m ³ /h	P. cal kW	P. Est. (mb)
P-01	10/12/2009	27.9	21.7	10.1	40.3	28.0	9.3	26.8	0
P-01	10/13/2009	26.3	20.6	10.8	42.3	29.3	13.0	35.5	0.1
P-01	10/14/2009	38.1	30.7	6.1	25.2	33.6	14.3	57.3	0.2
P-01	10/15/2009	33.9	27.3	7.8	31.1	30.1	10.2	36	0
P-01	10/16/2009	26.6	21.1	10.1	42.2	32.9	11.9	32.7	0.07
P-01	10/17/2009	40.2	32.8	5.1	21.9	34.0	11.9	49.8	0.1
P-01	10/18/2009	35.4	28.1	7.4	29.1	32.1	14.6	54.6	0.2
P-02	10/12/2009	32.8	25.8	8.5	32.9	33.1	8.7	29.5	0
P-02	10/13/2009	33.3	26.3	8.3	32.2	33.7	13.4	46.2	0.1
P-02	10/14/2009	36.3	29.0	6.9	27.8	36.1	19.5	74.3	0.3
P-02	10/15/2009	41.3	33.0	5.2	20.5	38.0	15.6	67.3	0.2
P-02	10/16/2009	41.0	33.5	4.7	20.8	38.1	16.7	71.3	0.2
P-02	10/17/2009	41.5	33.6	4.6	20.3	38.7	18.3	80	0.3
P-02	10/18/2009	43.8	33.5	5.1	17.7	38.8	10.5	48	0.1
P-03	10/12/2009	54.5	45.1	0.2	0.2	44.3	7.5	42.3	0
P-03	10/13/2009	54.7	44.7	0.4	0.2	45	12.2	69.7	0.1
P-03	10/14/2009	55.0	44.8	0.1	0.2	46	22.3	128.3	0.4
P-03	10/15/2009	54.8	44.9	0.1	0.2	46	18.5	106	0.3
P-03	10/16/2009	55.3	44.3	0.2	0.2	46.0	19.4	111.7	0.3
P-03	10/17/2009	55.6	44.1	0.2	0.1	46.7	22.5	131	0.4
P-03	10/18/2009	54.9	44.7	0.3	0.2	47.0	15.4	88.3	0.2
P-04	10/12/2009	44.3	35.9	4.1	15.8	39.9	-	-	0
P-04	10/13/2009	46.4	37.6	3.3	12.7	40.4	7.5	36.3	0
P-04	10/14/2009	48.4	38.6	3.3	9.8	41.5	10.6	53.3	0.05
P-04	10/15/2009	49.8	39.6	2.3	8.4	41.2	8.4	43.8	0
P-04	10/16/2009	48.2	39.8	2.1	9.9	41.6	10.6	53.3	0.1
P-04	10/17/2009	50.6	39.9	1.8	7.8	42.3	10.8	57.3	0.1
P-04	10/18/2009	51.8	39.5	2.4	6.3	42.1	11.8	64	0.1

Monitoreo mes de noviembre

COMPOSICIÓN, FLUJO Y PODER CALORÍFICO DE BIOGÁS									
Pozo	Fecha	CH ₄ %	CO ₂ %	O ₂ %	Balance %	Temp. °C	Flujo m ³ /h	P. cal kW	P. Est. (mb)
P-01	11/10/2009	42.2	32.2	5.4	20.2	30.2	10.8	47.3	0.03
P-01	11/11/2009	35.6	28.2	6.7	29.6	32.8	20.8	77	0.4
P-01	11/13/2009	34.1	26.2	8.3	31.4	27.8	15.5	55	0.2
P-01	11/15/2009	35.6	27.7	7.4	29.2	31.8	12.4	46	0.1
P-02	11/10/2009	44.8	34.1	5.3	15.9	35.7	14.7	69	0.2
P-02	11/11/2009	42.7	33.6	4.6	19.0	37.4	18.3	81.7	0.3
P-02	11/13/2009	31.8	24.2	9.2	34.9	31.3	15.1	49.8	0.2
P-02	11/15/2009	35.1	27.1	7.7	30.1	34.3	16.6	60.7	0.3
P-03	11/10/2009	54.6	44.8	0.5	0.1	44.3	14.7	84	0.2
P-03	11/11/2009	55.0	44.7	0.2	0.2	45.4	14.3	82.3	0.1
P-03	11/13/2009	55.2	44	0.6	0.2	44.1	13.6	78	0.2
P-03	11/15/2009	55.0	44.6	0.2	0.1	44.2	19.4	115.7	0.4
P-04	11/11/2009	50.7	39.7	2.1	7.5	39.8	9.2	48.7	0.03
P-04	11/13/2009	44.4	35.5	4.4	15.7	37.6	15.4	71.3	0.2
P-04	11/15/2009	49.4	38.7	2.7	9.2	40	10.7	55.3	0.1

ANEXO II. PROYECCIONES DE LA GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DEL RELLENO DE ENSENADA

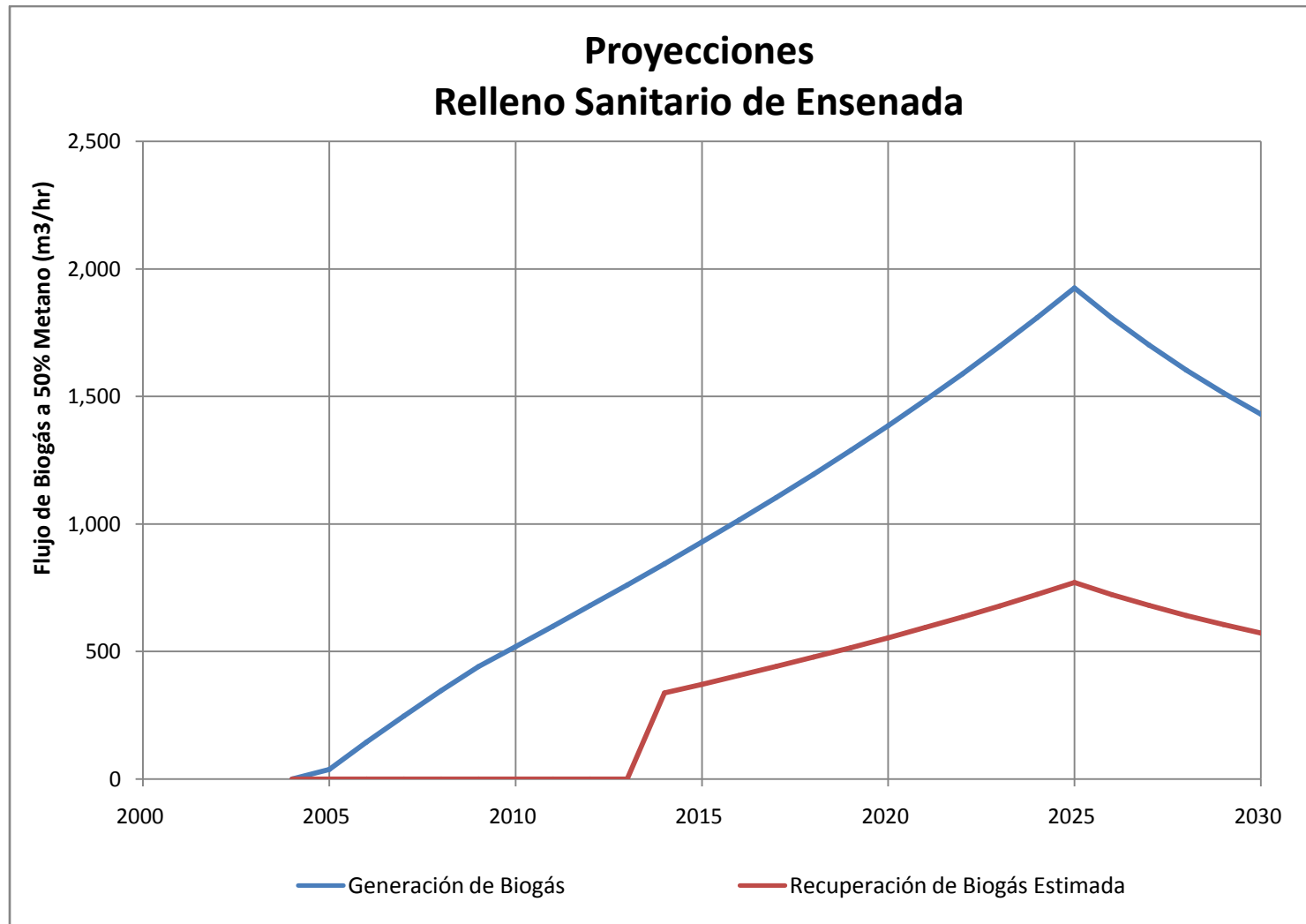
Disposición de biogás obtenido con el Modelo

Año	Disposición de Residuos Estimada (Toneladas Métricas)	Toneladas Métricas Acumuladas
2004	44,386	44,386
2005	130,435	174,821
2006	132,208	307,029
2007	137,005	444,034
2008	139,693	583,727
2009	128,761	712,488
2010	135,200	847,688
2011	142,000	989,688
2012	149,100	1,138,788
2013	156,600	1,295,388
2014	164,400	1,459,788
2015	172,600	1,632,388
2016	181,200	1,813,588
2017	190,300	2,003,888
2018	199,800	2,203,688
2019	209,800	2,413,488
2020	220,300	2,633,788
2021	231,300	2,865,088
2022	242,900	3,107,988
2023	255,000	3,362,988
2024	267,800	3,630,788

Proyecciones generación y recuperación de biogás, para el 2014, eficiencia de captura de 40%, con el Modelo Mexicano

Año	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad (MW)	Reducción de Emisión Estimadas	
	(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(m ³ / hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(ton CH ₄ /año)	(ton CO ₂ eq/año)
2004	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2005	38	22	0.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2006	145	86	2.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2007	247	145	4.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2008	346	204	6.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2009	441	259	7.9	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2010	520	306	9.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2011	599	353	10.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2012	680	400	12.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2013	761	448	13.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2014	844	497	15.1	40%	338	199	6.0	0.6	1,059	22,236
2015	929	547	16.6	40%	371	219	6.6	0.6	1,165	24,462
2016	1,015	597	18.1	40%	406	239	7.3	0.7	1,273	26,737
2017	1,104	650	19.7	40%	441	260	7.9	0.7	1,384	29,071
2018	1,195	703	21.3	40%	478	281	8.5	0.8	1,499	31,471
2019	1,289	758	23.0	40%	515	303	9.2	0.9	1,616	33,944
2020	1,385	815	24.8	40%	554	326	9.9	0.9	1,738	36,497
2021	1,486	874	26.5	40%	594	350	10.6	1.0	1,864	39,138
2022	1,590	936	28.4	40%	636	374	11.4	1.1	1,994	41,873
2023	1,697	999	30.3	40%	679	400	12.1	1.1	2,129	44,712
2024	1,809	1,065	32.3	40%	724	426	12.9	1.2	2,269	47,659
2025	1,926	1,133	34.4	40%	770	453	13.8	1.3	2,416	50,726
2026	1,809	1,065	32.3	40%	724	426	12.9	1.2	2,269	47,648
2027	1,702	1,002	30.4	40%	681	401	12.2	1.1	2,135	44,829
2028	1,604	944	28.7	40%	641	378	11.5	1.1	2,012	42,244
2029	1,514	891	27.0	40%	605	356	10.8	1.0	1,899	39,871
2030	1,431	842	25.6	40%	572	337	10.2	0.9	1,795	37,692

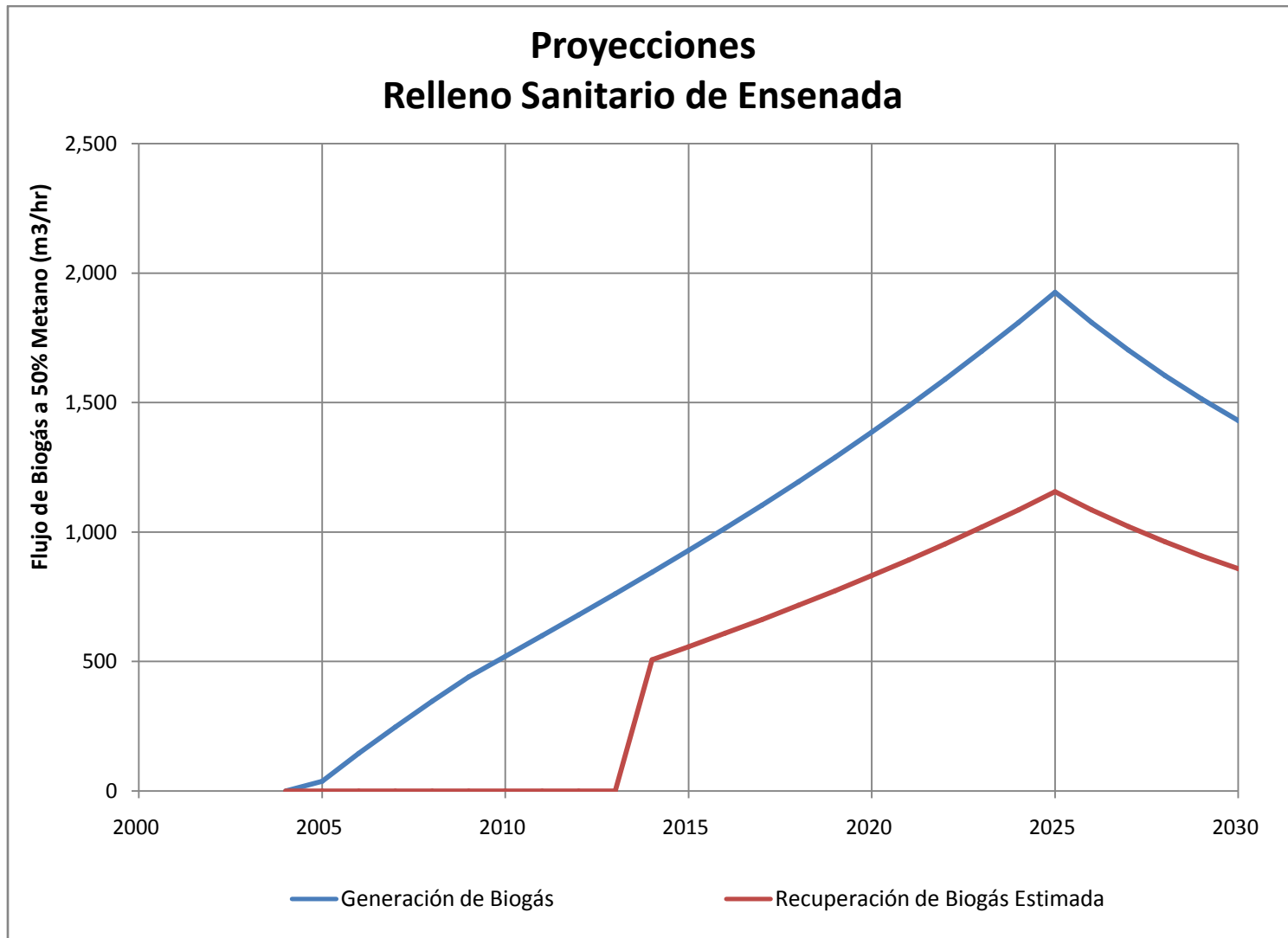
Gráfica 1. Proyecciones de generación y recuperación de biogás a una eficiencia de captura de 40%



Proyecciones generación y recuperación de biogás, en el 2014, eficiencia de captura de 60%, con el Modelo Mexicano

Año	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad (MW)	Reducción de Emisión Estimadas	
	(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(m ³ / hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(ton CH ₄ /año)	(ton CO ₂ eq/año)
2004	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2005	38	22	0.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2006	145	86	2.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2007	247	145	4.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2008	346	204	6.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2009	441	259	7.9	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2010	520	306	9.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2011	599	353	10.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2012	680	400	12.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2013	761	448	13.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2014	844	497	15.1	60%	506	298	9.1	0.8	1,588	33,355
2015	929	547	16.6	60%	557	328	10.0	0.9	1,747	36,693
2016	1,015	597	18.1	60%	609	358	10.9	1.0	1,910	40,106
2017	1,104	650	19.7	60%	662	390	11.8	1.1	2,076	43,606
2018	1,195	703	21.3	60%	717	422	12.8	1.2	2,248	47,206
2019	1,289	758	23.0	60%	773	455	13.8	1.3	2,425	50,915
2020	1,385	815	24.8	60%	831	489	14.9	1.4	2,607	54,745
2021	1,486	874	26.5	60%	891	525	15.9	1.5	2,796	58,706
2022	1,590	936	28.4	60%	954	561	17.0	1.6	2,991	62,810
2023	1,697	999	30.3	60%	1,018	599	18.2	1.7	3,194	67,067
2024	1,809	1,065	32.3	60%	1,086	639	19.4	1.8	3,404	71,489
2025	1,926	1,133	34.4	60%	1,155	680	20.6	1.9	3,623	76,088
2026	1,809	1,065	32.3	60%	1,085	639	19.4	1.8	3,403	71,472
2027	1,702	1,002	30.4	60%	1,021	601	18.2	1.7	3,202	67,243
2028	1,604	944	28.7	60%	962	566	17.2	1.6	3,017	63,366
2029	1,514	891	27.0	60%	908	535	16.2	1.5	2,848	59,807
2030	1,431	842	25.6	60%	858	505	15.3	1.4	2,692	56,538

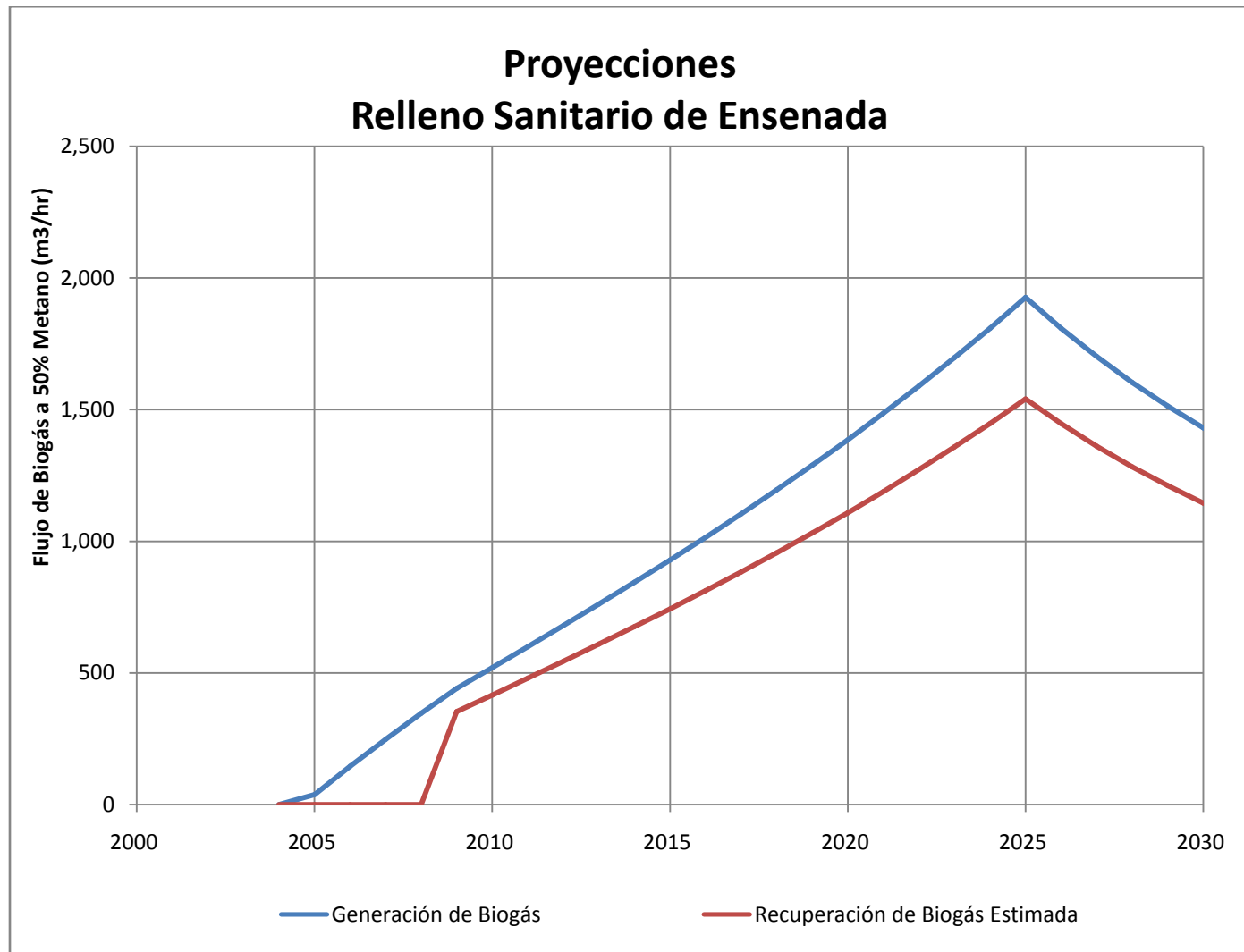
Gráfica 2. Proyecciones de generación y recuperación de biogás a una eficiencia de captura de 60%



Proyecciones generación y recuperación de biogás, en el 2014, eficiencia de captura de 80%, con el Modelo Mexicano

Año	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad (MW)	Reducción de Emisión Estimadas	
	(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(m ³ / hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(ton CH ₄ /año)	(ton CO ₂ eq/año)
2004	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2005	38	22	0.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2006	145	86	2.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2007	247	145	4.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2008	346	204	6.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2009	441	259	7.9	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2010	520	306	9.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2011	599	353	10.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2012	680	400	12.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2013	761	448	13.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2014	844	497	15.1	80%	675	397	12.1	1.1	2,118	44,473
2015	929	547	16.6	80%	743	437	13.3	1.2	2,330	48,923
2016	1,015	597	18.1	80%	812	478	14.5	1.3	2,546	53,475
2017	1,104	650	19.7	80%	883	520	15.8	1.5	2,769	58,142
2018	1,195	703	21.3	80%	956	563	17.1	1.6	2,997	62,942
2019	1,289	758	23.0	80%	1,031	607	18.4	1.7	3,233	67,887
2020	1,385	815	24.8	80%	1,108	652	19.8	1.8	3,476	72,994
2021	1,486	874	26.5	80%	1,189	700	21.2	2.0	3,727	78,275
2022	1,590	936	28.4	80%	1,272	748	22.7	2.1	3,988	83,746
2023	1,697	999	30.3	80%	1,358	799	24.3	2.2	4,258	89,423
2024	1,809	1,065	32.3	80%	1,447	852	25.9	2.4	4,539	95,318
2025	1,926	1,133	34.4	80%	1,540	907	27.5	2.5	4,831	101,451
2026	1,809	1,065	32.3	80%	1,447	852	25.9	2.4	4,538	95,296
2027	1,702	1,002	30.4	80%	1,361	801	24.3	2.3	4,269	89,657
2028	1,604	944	28.7	80%	1,283	755	22.9	2.1	4,023	84,487
2029	1,514	891	27.0	80%	1,211	713	21.6	2.0	3,797	79,743
2030	1,431	842	25.6	80%	1,145	674	20.5	1.9	3,590	75,384

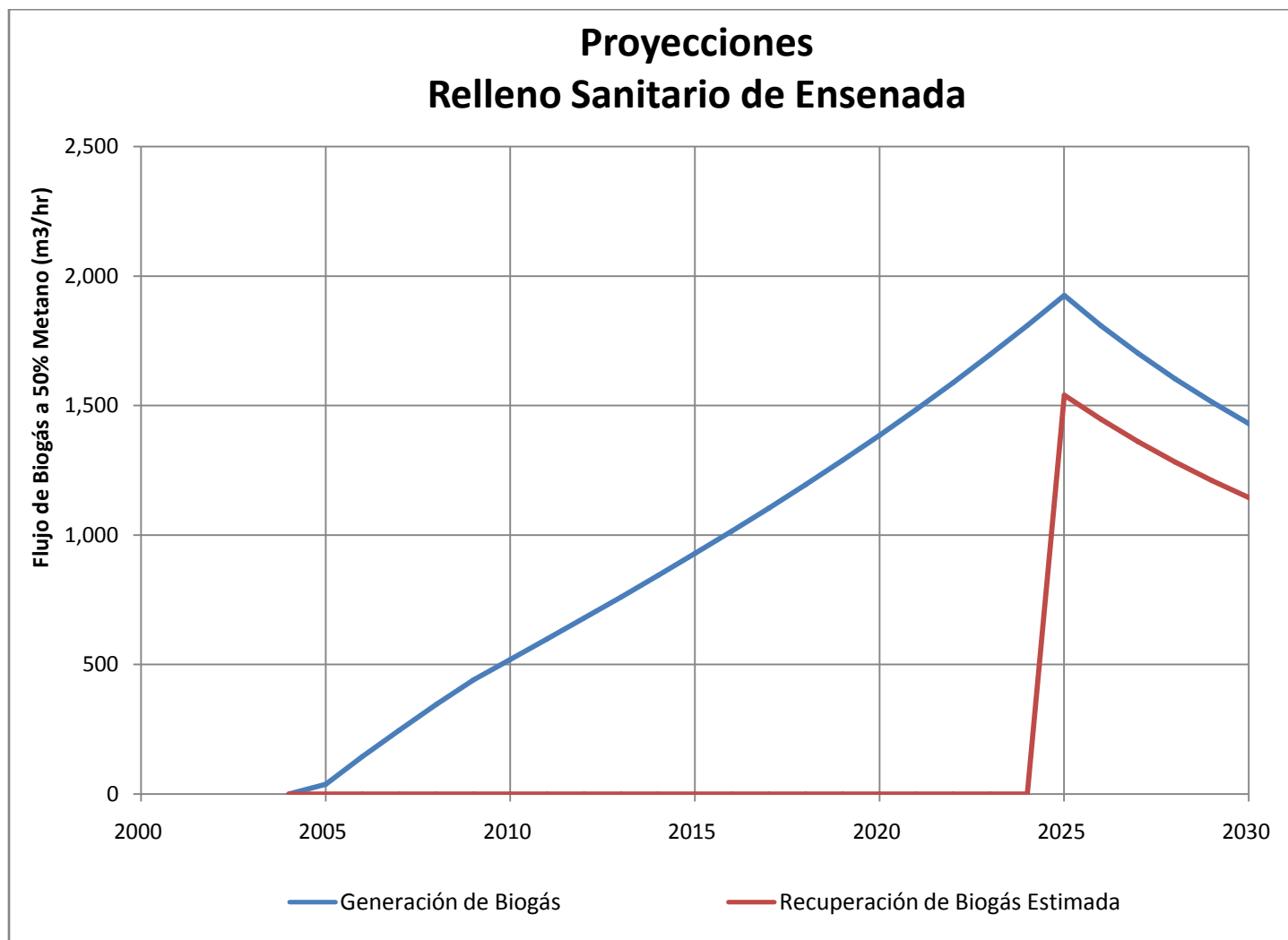
Gráfica 3. Proyecciones de generación y recuperación de biogás, eficiencia de captura de 80% desapercibidas (2014)



Proyecciones generación y recuperación de biogás, en el 2025, eficiencia de captura de 80%, con el Modelo Mexicano

Año	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad (MW)	Reducción de Emisión Estimadas	
	(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(m ³ / hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(ton CH ₄ /año)	(ton CO ₂ eq/año)
2004	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2005	38	22	0.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2006	145	86	2.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2007	247	145	4.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2008	346	204	6.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2009	441	259	7.9	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2010	520	306	9.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2011	599	353	10.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2012	680	400	12.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2013	761	448	13.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2014	844	497	15.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2015	929	547	16.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2016	1,015	597	18.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2017	1,104	650	19.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2018	1,195	703	21.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2019	1,289	758	23.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2020	1,385	815	24.8	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2021	1,486	874	26.5	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2022	1,590	936	28.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2023	1,697	999	30.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2024	1,809	1,065	32.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0
2025	1,926	1,133	34.4	80%	1,540	907	27.5	2.5	4,831	101,451
2026	1,809	1,065	32.3	80%	1,447	852	25.9	2.4	4,538	95,296
2027	1,702	1,002	30.4	80%	1,361	801	24.3	2.3	4,269	89,657
2028	1,604	944	28.7	80%	1,283	755	22.9	2.1	4,023	84,487
2029	1,514	891	27.0	80%	1,211	713	21.6	2.0	3,797	79,743
2030	1,431	842	25.6	80%	1,145	674	20.5	1.9	3,590	75,384

Gráfica 4. Proyecciones de generación y recuperación de biogás, eficiencia de captura de 80% desapercibidas



ANEXO III. CALCULO DE INGRESOS POR LA VENTA DE ELECTRICIDAD Y BONOS DE CARBONO

Ingresos por venta de energía, eficiencia de 80%

Año	MW	kW	MP/año
2014	1.1	1117.314609	16.7
2015	1.2	1229.125282	18.3
2016	1.3	1343.475428	20.0
2017	1.5	1460.725149	21.8
2018	1.6	1581.32062	23.6
2019	1.7	1705.564507	25.4
2020	1.8	1833.850631	27.3
2021	2.0	1966.545948	29.3
2022	2.1	2103.992888	31.4
2023	2.2	2246.62352	33.5
2024	2.4	2394.72959	35.7
2025	2.5	2548.808887	38.0
2026	2.4	2394.169094	35.7
2027	2.3	2252.50446	33.6
2028	2.1	2122.614704	31.6
2029	2.0	2003.413086	29.9
2030	1.9	1893.915613	28.2

Ingresos por venta de bonos de carbono en el 2014, eficiencia 80%

Año	Ton CO ₂ /año	\$US3/tonCO ₂	\$US5/tonCO ₂	\$US10/tonCO ₂
2014	44,473	133419	222365	444730
2015	48,923	146769	244615	489230
2016	53,475	160425	267375	534750
2017	58,142	174426	290710	581420
2018	62,942	188826	314710	629420
2019	67,887	203661	339435	678870
2020	72,994	218982	364970	729940
2021	78,275	234825	391375	782750
2022	83,746	251238	418730	837460
2023	89,423	268269	447115	894230
2024	95,318	285954	476590	953180
2025	101,451	304353	507255	1014510
2026	95,296	285888	476480	952960
2027	89,657	268971	448285	896570
2028	84,487	253461	422435	844870
2029	79,743	239229	398715	797430
2030	75,384	226152	376920	753840
Total	1,281,616	3,844,848	6,408,080	12,816,160

Ingresos por venta de bonos de carbono en el 2025, eficiencia 80%

Año	Ton CO ₂ /año	\$US3/tonCO ₂	\$US5/tonCO ₂	\$US10/tonCO ₂
2025	101,451	304353	507255	1014510
2026	95,296	285888	476480	952960
2027	89,657	268971	448285	896570
2028	84,487	253461	422435	844870
2029	79,743	239229	398715	797430
2030	75,384	226152	376920	753840
Total	526,018	1,578,054	2,630,090	5,260,180