



S.E.P.

S.E.S.T.N.M.

T.N.M.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS DOCTORAL

**“DIAGNÓSTICO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS
EN TRES SITIOS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS EN EL ESTADO DE MÉXICO”**

PRESENTA:

M. en C. LAURA VERÓNICA DÍAZ ARCHUNDIA

No. DE CONTROL 9628D0447

DIRECTORA:

DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL

CO-DIRECTOR:

DR. OTONIEL BUENROSTRO DELGADO

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, DICIEMBRE 2016



Metepec, Méx., 13/Diciembre/2016

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-2098/2016

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

C. LAURA VERÓNICA DÍAZ ARCHUNDIA
CANDIDATA AL GRADO DE DOCTORA
EN CIENCIAS AMBIENTALES
PRESENTE.

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado "DIAGNÓSTICO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN TRES SITIOS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL ESTADO DE MÉXICO" la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Educación, Integridad y Ciencia

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

JLGR/magj





Metepéc, Méx., 06/diciembre/2016

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

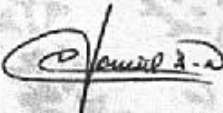
DEPI-395-1888/2016

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.

Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "DIAGNÓSTICO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN TRES SITIOS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL ESTADO DE MÉXICO", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctora en Ciencias Ambientales presenta la C. LAURA VERÓNICA DÍAZ ARCHUNDIA, con número de control 9628D0447 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad necesarios para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

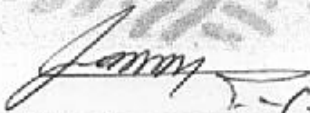

DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL
DIRECTORA DE TESIS


DR. OTONIEL BUENROSTRO DELGADO
CO DIRECTOR DE TESIS


DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ
REVISOR


DRA. MARÍA DEL CONSUELO MAÑÓN SALAS
REVISORA


DRA. MARÍA DE LA LUZ JIMÉNEZ NÚÑEZ
REVISORA


DR. JULIO CÉSAR GONZÁLEZ JUÁREZ
REVISOR


SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



*a mis hijos, Vero y Hannes.
Ustedes son el amor más puro
y sincero de mi vida.
Los amo.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme despertar día a día, por guiar mi camino y darme la oportunidad de decidir siempre de tu mano.

A la Dra. María del Consuelo por su invaluable apoyo y guía durante el desarrollo de esta tesis, especiales gracias por su cariño y amistad.

A mi comité evaluador, Dr. Otoniel, Dra. Consuelo, Dr. Isaías, Dra. Luz, Dr. Julio, por su apoyo, comentarios y enriquecedoras sugerencias.

A la empresa MASERA, muy en especial a Mari, Ing. José Miguel, Ing. Francisco, Contador Jesús, por estar siempre dispuestos a apoyar con este estudio. Al CONACyT por la beca otorgada para realizar mis estudios de doctorado. A la universidad de Cantabria, especialmente a Amaya y Miguel por su tiempo, apoyo y disposición para disipar cualquier duda.

A cada persona que estuvo siempre al pie del cañón en la etapa experimental, sin su ayuda esta tesis no habría sido posible, Diego, Isis, Mari, Toñita, Martín, Rosita, Quique, Mayte y a todos aquellos que me apoyaron en algún momento durante estos cuatro años, Armando, Sra. María, Sr. Armando, MariChuy, Quique, Vero, Martha.

A mis amigas y amigos, que durante esta etapa de mi vida siempre tuvieron palabras de aliento. A Elvira, Nancy, Mine, Mildred, Karina, Diana, Gis, Esme, mil gracias por su cariño y amistad, el tiempo compartido con ustedes lo valoro mucho.

A mis papás, no tengo palabras para agradecer el apoyo incondicional que me han brindado, por enseñarme el camino de la rectitud y a luchar siempre para salir adelante. Hermanos, cuñadas, cuñado, gracias por todo, por su cariño y por sus consejos, los quiero mucho.

RESUMEN

En México, el Relleno Sanitario (RESA) bajo la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 es la alternativa recomendada para la disposición de residuos sólidos urbanos (RSU), aunque existen otros sitios como los controlados (SC) y los tiraderos a cielo abierto (TCA). Debido a que la fracción orgánica de los RSU sobrepasa el 50%, su biodegradación genera biogás en cualquiera de los sitios de disposición final (SDF) mencionados. El biogás está compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de Carbono (CO_2), los cuales son Gases de Efecto Invernadero (GEI).

El presente trabajo tuvo por objetivo diagnosticar la generación de biogás en un RESA, un SC y un TCA del Estado de México. Para dicho diagnóstico se realizaron en cada SDF caracterizaciones físicas y químicas de RSU, lixiviados y biogás, en estiaje y lluvias durante los años 2013 a 2015. Las caracterizaciones de RSU fueron utilizadas para la estimación de CH_4 hasta 2040; con el Modelo Mexicano de Biogás v 2.0 (MMB) en los tres SDF y con MODUELO v.4 para el RESA y el SC; este último se utilizó con la operación convencional y con escenarios de recirculación en superficie y pozos.

Como máximo valor de concentración de CH_4 en pozos, el RESA presentó 59.25 %v/v, 53.75 %v/v el SC y 15.60 %v/v el TCA. En superficie, el valor de CH_4 emitido no superó 4.40 %v/v, elevándose hasta 38.90 %v/v en grietas sobre la celda. Con MMB la proyección total fue de 7,280,285 m^3/a para el RESA, 880,650 m^3/a para SC y 498,902.67 m^3/a para el TCA; mientras que con MODUELO las estimaciones para 2040 fueron de 25,547 m^3/a para el RESA convencional y 737.235 m^3/a para SC. Se estimó una recuperación del CH_4 del 65% con MMB. La recirculación de los lixiviados en superficie proyectó con MODUELO dos veces más de generación de CH_4 y en pozo 1.7 veces más con respecto a la operación convencional.

Las emisiones determinadas evidencian la necesidad de sanear sitios como el TCA y muestran la viabilidad energética del RESA y del SC. De no ser atendidas y aprovechadas las emisiones mencionadas, éstas continuarán impactando al ambiente.

ABSTRACT

In Mexico, according to NOM-083-SEMARNAT-2003 standard, landfill is the best alternative for MSW disposal. although other sites exist such as the controlled sites (CS) and the open dumps sites (UDS). Because the organic fraction of the MSW exceeds 50%, its biodegradation generates biogas at any of the mentioned final disposal sites (FDS). Biogas is composed mainly of methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2), which are Greenhouse Gases (GHG).

The objective of the present work was diagnoses biogas generation in a landfill, a CS and an UDS of the State of Mexico. For this diagnosis, physical and chemical characterization of MSW, leachate and biogas twice a year (dry season and rainy) during the years (2013 to 2015) were made. Characterizations were used to CH_4 estimation until 2040 using Biogas Mexican Model in the three FDS and MODUELO v 4 for the landfill and CS. Last one in conventional operation as well as in recirculation on surface and wells.

As maximum CH_4 concentration value in wells, landfill 59.25 %v/v, 53.75 %v/v the CS and 15.60 %v/v the UCS. In surface, the maximum value CH_4 issued did not exceed 4.40 %v/v, rising up until 38.90 % v/v in cracks on the cell.

With MMB, the total site projection for landfill was 7,280,285 thousand m^3/year , 880,650 thousand m^3/year for SC and 498,902.67 thousand m^3/year for UDS; While with MODUELO the estimates for 2040 were 25,547 m^3/year for conventional landfill and 737,235 m^3/year for CS. A CH_4 recovery of 65% was estimated with MMB. The surface leachate recirculation projected with MODUELO the double of generation of CH_4 and in well 1.7 times more with respect to the conventional operation.

The emissions show the need to clean sites such as the UDS and the energy viability of landfill and CS. If the emissions mentioned are not taken care of and taken advantage of, they will continue to impact the environment.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. FUNDAMENTOS	4
1.1 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	4
1.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	8
1.3 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL	12
1.4 DEGRADACIÓN ANAEROBIA	14
1.5 EMISIONES A PARTIR DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL	18
1.6 MODELACIÓN DE LA GENERACIÓN DE METANO	19
1.6.1 Modelo Mexicano de Biogás v.2.0 (MMB).	20
1.6.2 MODUELO v. 4	21
1.7 ESTADO DEL ARTE EN RSU y BIOGÁS	24
1.7.1 Estudios sobre RSU, lixiviados y biogás en SDF	25
1.7.2 Estudios sobre simulaciones de SDF	29
CAPITULO 2. PARTE EXPERIMENTAL	33
2.1 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	34
2.2 GESTIÓN PARA COLABORACIÓN CON LOS MUNICIPIOS	34
2.3 ANÁLISIS SOCIOECONÓMICO DE MUNICIPIOS	34
2.4 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN	36
2.5 CARACTERIZACIÓN EN EL SITIO	37
2.5.1 Caracterización de RSU	37
2.5.2 Caracterización de lixiviados	38
2.5.3 Caracterización de biogás	38
2.6 ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS	39
2.6.1 Modelo Mexicano de Biogás v 2.0 (MMB).	39
2.6.2 MODUELO v.4.	40
	iii

2.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS SIMULACIONES	40
CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	41
3.2 GESTIÓN PARA COLABORACIÓN CON LOS MUNICIPIOS	44
3.3 ANÁLISIS SOCIOECONÓMICO DE MUNICIPIOS	46
3.4 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN	54
3.5 CARACTERIZACIÓN EN SITIO	57
3.5.1 Análisis de RSU	57
3.5.2 Análisis de lixiviados	67
3.5.3 Análisis del biogás	72
3.6 ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS	82
3.6.1 Modelo Mexicano de Biogás v.2.0.	83
3.6.2 Estimación de la generación de CH ₄ con MODUELO v 4.	87
3.6.3 Análisis comparativo de las simulaciones	100
3.7 DIAGNÓSTICO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS	102
CONCLUSIONES	104
RECOMENDACIONES	106
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	107
REFERENCIAS	108
ANEXOS	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Emisiones globales de GEI, (EPA, 2016)	5
Figura 1. 2 Fases generales de la generación de biogás y lixiviados	15
Figura 1. 3. Alimentación de datos en el MMB	23
Figura 1. 4. Captura de datos en MODUELO v.4	24
Figura 2. 1 Metodología a seguir para el diagnóstico de la generación de biogás.....	33
Figura 3. 1 Localización del RESA de ZIN y cercanía con zonas urbanas.....	42
Figura 3. 2 Localización del RESA de VG y cercanía con zonas urbanas	43
Figura 3. 3 Localización del TCA de TV y cercanía con zonas urbanas	44
Figura 3. 4 Caracterización en el municipio de ZIN, 2015	51
Figura 3. 5 Composición de RSU por estrato del municipio de ZIN.....	52
Figura 3. 6 Toma de muestra de RSU en ZIN	58
Figura 3. 7 Toma de muestra de RSU en VG.....	59
Figura 3. 8 Toma de muestra de RSU en TV	60
Figura 3. 9 Determinación de peso volumétrico	61
Figura 3. 10 Fauna nociva en el Tiradero a Cielo Abierto de TV	64
Figura 3. 11 Toma de muestra de RSU con 10 años de ser dispuestos en la CS.....	65
Figura 3. 12 Toma de muestra de lixiviados en los tres SDF.	68
Figura 3. 13 Medición de biogás en los tres SDF	73
Figura 3. 14 Medición de biogás en superficie en los tres SDF	76
Figura 3. 15 Ejemplo de Distribución de cámaras estáticas	77
Figura 3. 16 Distribución de las cámaras estáticas, CSVG.....	79
Figura 3. 17 Distribución de las cámaras estáticas en el TCA de TV.....	80
Figura 3.18 Proyecciones de Generación y Recuperación de Biogás de ZIN	85
Figura 3.19 Proyecciones de Generación y Recuperación de Biogás de VG .	86
Figura 3.20 Proyecciones de Generación y Recuperación de Biogás de TV ..	86

Figura 3. 21 a) Plano de la C4Z en autocad, b) Curvas de nivel y c) Orden de llenado de RSU	87
Figura 3. 22 Vista interna y dimensiones de la celda (C4Z) con MODUELO v 4, a) Capa base, b) Capa de residuos y c) Capa de cobertura. 89	
Figura 3. 23 Generación de CH ₄ con recirculación.....	91
Figura 3. 24 Distribución de la humedad en la C4Z en 10 años de recirculación.....	93
Figura 3. 25 Máximo contenido de humedad en la C4Z	95
Figura 3. 26 Imágenes de modelo de la CS y C1 de VG con MODUELO v.4	96
Figura 3. 27 Generación de CH ₄ con recirculación y sin recirculación.....	97
Figura 3. 28 Máximo contenido de humedad en la celda C4Z	98
Figura 3. 29 Proyección de generación de CH ₄ con MMB y MODUELO en ZIN	101
Figura 3. 30 Proyección de generación de CH ₄ con MMB y MODUELO en VG	101
Figura 3. 31 Variables de entrada y Salida en en el diagnóstico de la generación de CH ₄ en los SDF	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Emisión de GEI con factores de Potencial de Calentamiento Global	7
Tabla 1. 2 Propiedades físicas de los RSU	9
Tabla 1. 3 Propiedades físicas de los RSU (continuación).	10
Tabla 1. 4 Propiedades químicas de los RSU	11
Tabla 1. 5 Propiedades biológicas de los RSU	11
Tabla 1. 6 Composición y características del biogás	18
Tabla 2. 1 Parámetros y técnicas a utilizar en el análisis de RSU	37
Tabla 2. 2 Parámetros y técnicas a utilizar en el análisis de lixiviados	38
Tabla 3. 1 Responsables del Manejo de RSU y respuestas para colaboración	45
Tabla 3.2 Información de municipios que depositan en Zinacantepec	48
Tabla 3.3 Información de municipios que depositan en VG	49
Tabla 3.4 Información de municipios que depositan en VG (continuación)	50
Tabla 3. 5 Información de municipios que depositan en TV	50
Tabla 3. 6 Caracterización en casa habitación	52
Tabla 3. 7 Material reciclable recuperado por los pepenadores en el RESA de ZIN	53
Tabla 3. 8 Evaluación de condiciones de operación conforme a la Lista de Verificación (LV)	55
Tabla 3. 9 Caracterización física de RSU en estiaje y lluvias, 2012-2015	62
Tabla 3. 10 Promedio de la caracterización física de RSU en los tres sitios,	63
Tabla 3. 11 Caracterización física de RSU en C1Z, estiaje 2014	65
Tabla 3. 12 Caracterización de RSU, temporada de estiaje y lluvias 2013-2015	66
Tabla 3. 13 Análisis fisicoquímico de Lixiviados de ZIN, estiaje y lluvias 2013-2015	69

Tabla 3. 14 Análisis fisicoquímico de Lixiviados de VG, estiaje y lluvia, 2013-2015	70
Tabla 3. 15 Análisis fisicoquímico de Lixiviados de TV 2013-2015	71
Tabla 3. 16 Caracterización de Biogás en pozos de venteo, lluvias 2013-estiaje 2014	74
Tabla 3. 17 Caracterización de Biogás en pozos de venteo, 2014-2015	75
Tabla 3. 18 Caracterización de Biogás en superficie C1Z	78
Tabla 3. 19 Caracterización de Biogás en superficie C3Z	78
Tabla 3. 20 Caracterización de Biogás en superficie CSVG	81
Tabla 3. 21 Caracterización de Biogás en superficie en la CA de TV	81
Tabla 3. 22 Caracterización de Biogás en superficie CSTV	82
Tabla 3. 23 Estimación de la generación de CH ₄ con MMB	84
Tabla 3. 24 Parámetros de simulación en los tres escenarios con y sin recirculación	90
Tabla 3. 25 Comparación de humedades y generación de CH ₄	99
Tabla C. 1 Caracterización de Biogás en superficie C1Z, 2013 – 2015.....	125
Tabla C. 2 Caracterización de Biogás en superficie C3ZIN, estiaje 2014	127
Tabla C. 3 Caracterización de Biogás en superficie CSVG, 2013 - 2015.....	128
Tabla C. 4 Caracterización de Biogás en superficie en TV.	130
Tabla C. 5 Caracterización de Biogás en superficie CSTV, estiaje 2014	132

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento demográfico en los últimos años ha desencadenado un deterioro ambiental conocido como cambio climático (CC). La población mundial actual es más de 7,000 millones de habitantes y la nacional de 119.5 millones en 2015 con crecimiento poblacional en los últimos cinco años del 1.4%, lo que revela un aumento en el consumo de productos y con esto, un incremento en la generación de residuos de todo tipo (INEGI, 2016; OCDE, 2016). Algunos de los problemas provocados por la actividad humana son la desertificación, el aumento de sequías, deforestación, erosión, desabasto de agua para riego y consumo humano, aumento de enfermedades, migración campo-ciudad, todo esto aunado a la concentración en ciertos centros urbanos (ICCEM, 2015; PECC, 2014)

El CC requiere la renovación de políticas, colaboración global con nuevas estrategias y acciones que se lleven a cabo con una visión a largo plazo. El interés de muchos países se ha visto reflejado con el desarrollo de diversas reuniones como la Conferencia de la Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano. El resultado de estas reuniones fue una Agenda Internacional, en la cual países como Alemania, Argelia, Argentina, Brasil, Canadá, Egipto, España y México, trabajan en cooperación multilateral, bilateral y regional (Kyoto 1998). El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial, establecieron el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) en 1988 manejado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), donde uno de los propósitos de dicho Panel es el analizar estrategias para la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI); (IPCC, 2016; OMM, 2015; Staines, 2007). Entre los principales GEI son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los clorofluorocarburos (CFC).

El potencial de calentamiento global de estos gases se contabiliza en términos de (CO₂) equivalente (CO₂e) (CICC, 2009; Kyoto, 1998). De acuerdo con la Organización para Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), la contribución mundial de las emisiones fue de 34,000 MtCO₂e de 2000 a 2014 y los países que más aportaron fueron China (29%) y Estados Unidos (16%) (CICC, 2009; (EPA 2016). En el caso de México, las emisiones para 2013 fueron de 665,303.92 Gigagramos de CO₂ equivalente (GgCO₂e) lo que representa el 1.4% de las emisiones globales. El sector que más emite (GEI) es el sector Fuentes móviles en el cual están inmersos: Vehículos, maquinaria, ferrocarril, marítimo y aviación. El Sector Residuos comprende, la disposición final de RSU, las plantas de tratamiento de aguas residuales, tratamiento biológico de residuos orgánicos, incineración de residuos peligrosos y quema a cielo abierto. La disposición de los RSU se da en tres tipos de sitios llamados “Tiraderos a Cielo Abierto” (TCA), en sitios de Tierra Controlado (TC) y en sitios llamados “Rellenos Sanitarios” (RESA). En 2012, se dispuso en RESA sólo el 67% (único dato de RSU en el conteo de emisiones debido al registro de información), y la contribución de este sector en 2013 fue de 30,902.987 GgCO₂e (INECC, 2013).

Puesto que México ha sumado esfuerzos en la mitigación de GEI, se han identificado medidas y áreas de oportunidad en las estrategias nacionales para la reducción de sus emisiones, medidas que han servido de base para el “Plan Nacional de Desarrollo” y el “Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018” (PECC, 2014; PND, 2016; PNUMA, 2016). Una forma de presentar las emisiones de cada sector en México y con el que se pueden armar estrategias para tomar acciones, es por medio del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. El equipo del Cambio Climático del Instituto Nacional de Ecología (INE), estimó que México podría reducir hasta 30% sus emisiones en 2020 y 53% en 2030 y, en forma particular en el sector de residuos, se espera reducir hasta 20% en 2020 y 41% en 2030 (INE, 2010). Una de las iniciativas de México es el aprovechamiento y/o quema del biogás en los RESA, por lo que resulta fundamental evaluar su producción y contribución a los GEI. Sin

embargo, la evaluación de las emisiones de biogás de los RESA resulta compleja, debido a que se trata de múltiples fuentes con una alta variabilidad espacial y temporal (Camargo&Vélez, 2009; Kyoto, 1998; Mohammed *et al*, 2009).

En diversas partes del mundo se han realizado estudios sobre la generación de biogás a partir de puntos establecidos y/o medibles en una celda, como los de Camargo&Vélez, (2009), López-Martínez, (2010), Machado *et al*. (2008), Mohammed *et al*, (2009) entre otros; en los que se delimitan los factores que influyen en dicha generación; sin embargo, solo algunos autores consideran las emisiones que resultan de las laderas y pozos de venteo. Entre los trabajos realizados en México, se encuentran los de Arizu (2007), Kiss *et al*. (2007), Aguilar (2012) y González-Razo (2012); los cuales reportan la generación de CH₄ y CO₂ en RESA y, aunque algunos mencionan la existencia de emisiones difusas en taludes y superficie de las celdas, no las determinan. Aunado a lo anterior, los estudios sobre emisiones difusas en rellenos sanitarios (RESA) o en tiraderos a cielo abierto (TCA) son escasos, lo cual resulta preocupante en cuanto al Inventario Nacional de Emisiones GEI, debido a que en el país de 2000 a 2013 se incrementó el número de RESA de 48 a 238 y, SEMARNAT reporta que en el 2012 se depositaron 21% de los RSU generados en TCA (SEMARNAT 2016).

Conforme a lo anterior y con fin de contribuir con información que permita cuantificar con mayor precisión las emisiones de biogás generado en sitios de disposición, esta tesis describe los fundamentos, la metodología y los resultados del diagnóstico de la generación de CH₄ en tres SDF (un RESA, un STC y un TCA) ubicados en el centro del Estado de México y así contribuir en el desarrollo de mejores estrategias en cuanto a su operación y proyectar un aprovechamiento más eficiente del CH₄.

CAPITULO 1. FUNDAMENTOS

Después de la Revolución Industrial, el constante aumento de la población, la intensificada demanda de bienes y servicios y la desmedida generación de residuos, han provocado que los GEI como el CO₂, CH₄ y otros presentes en la atmósfera se incrementen ocasionando el Calentamiento Global (IPCC 2016; OMM 2015)

1.1 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

La capa más baja de la atmósfera, conocida como tropósfera contiene los gases que tienen efecto directo en el cambio climático y se consideran los responsables del calentamiento global según el PECC 2014-2018 son: metano (CH₄), Carbono Negro (CN), precursores del ozono troposférico (compuestos orgánicos volátiles no metánicos, (COVNM), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), y en menor medida, CH₄ y algunos hidrofluorocarbonos (PECC 2014; IPCC 2016). El Panel intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) considera el CH₄ y CC como los más relevantes por su contribución en la absorción de la radiación solar y en el forzamiento radiactivo antropógeno total. La EPA considera la siguiente contribución: dióxido de Carbono (CO₂) 76%, metano (CH₄) 16%, óxido de nitrógeno (N₂O) 6%, clorofluorocarbonos (CFCs), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafloruro de azufre (SF₆) estos últimos contribuyen con el 2%.

En 2013 las emisiones de GEI reportadas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OCDE) y el PICC alcanzaron de forma global, 34,000 MtCO₂e, donde los principales emisores per cápita en toneladas hasta el 2014 son Australia con 22.2, Estados Unidos con 21.5 y Canadá con 20.5. Los tres países con mayor emisión hasta 2014 según la OCDE fueron¹: Estados Unidos con 6,870,454.4 miles de toneladas de

¹ Estos datos excluyen el rubro de cambio de uso de suelo y Silvicultura (CUSS)

CO₂e, Rusia¹ con 2,812,310.3 y Japón con 1,363,862.3. Para el año 2013, México contribuyó con 632 880 miles de toneladas de CO₂e y esto representó el 3% de las emisiones en dicho año (INECC, 2013; IPCC, 2014; OCDE, 2015).

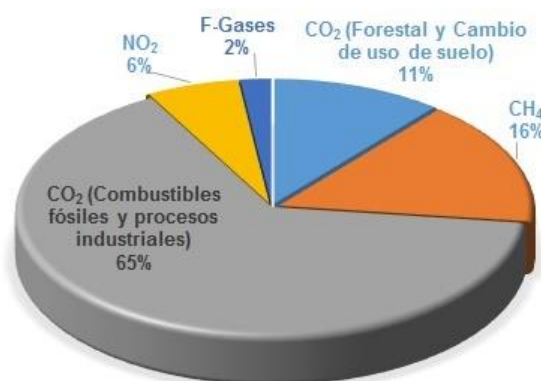


Figura 1. 1 Emisiones globales de GEI, (EPA, 2016)

Países como Alemania y Japón se han comprometido a reducir sus propias emisiones, al igual que países que no han firmado o ratificado los tratados internacionales como Estados Unidos. Los países con un muy alto Índice de Desarrollo Humano (IDH) son los que más contribuyen a las emisiones de CO₂, mientras que los países con un alto, medio y bajo IDH, aportan más de las tres cuartas partes de dichas emisiones desde 1970 con tendencia ascendente (PNUD, 2014).

Las emisiones de los países que pertenecen a la OCDE representan actualmente sólo un tercio de las emisiones mundiales y si bien algunos países miembros redujeron su generación, el aumento de las emisiones globales continuó. Entre los países que disminuyeron sus emisiones per cápita están Alemania (23%), Estados Unidos (2%) y Japón (2%); y entre los que incrementaron sus emisiones se encuentra México (5%), India (6%) y China (9%). Cabe mencionar que Estados Unidos sigue siendo el mayor emisor con 17.35 toneladas de CO₂ por habitante, a pesar de una ligera reducción

¹ No forma parte de las economías de la OCDE

debido principalmente a tres factores, la recesión en 2008-2009, los altos precios del petróleo y un mayor uso del gas natural como fuente de energía (OCDE, 2016; UE, 2012). En México conforme a lo establecido en los artículos 4 y 12 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se elabora periódicamente el Inventario Nacional de Emisiones GEI, el cual es un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire, ya que permite conocer las fuentes emisoras de contaminantes antropogénicos, así como el tipo y cantidad de contaminantes que emite cada una de ellas. Este inventario se ha actualizado tres veces desde su creación.

De acuerdo con el último Inventario Nacional de Emisiones GEI (2012-2013), la contribución de las emisiones de los GEI de los diferentes sectores en términos de CO₂eq fue: Sector Petróleo y gas (80,501.42), Sector Generación Eléctrica (126,407.19), Sector Residencial y Comercial (25,639.35), Sector Industria (114,949.19), Sector Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura o forestal (32,424.85), Sector Agropecuario (80,169.09), Sector Fuentes Móviles o transporte (174,156.53) y Sector Residuos (30,902.99). La tabla 1.1 muestra un cálculo que realizó el PECC las emisiones de estos sectores, tomando en cuenta el potencial de calentamiento global (PCG) a 20 años y una proyección a 100 años.

En México se reconoce al Cambio Climático (CC) como un problema global que requiere la acción de todos los países. Con una producción de 663.43 miles de tCO₂e, México se ubica a nivel mundial en el número 13 de los principales emisores de GEI, detrás de China, Estados Unidos, India, Brasil, Rusia, Japón, Canadá, Alemania, Rep. Dem. de Congo, Indonesia, Australia y República de Corea (WB, 2016). En ese sentido, se han establecido metas voluntarias de reducción de emisiones de GEI hacia el 2020, 2030 y 2050, mismas que se espera alcanzar mediante acciones en eficiencia energética, sustitución de combustibles y uso de tecnologías bajas en carbono, modernización de infraestructura y servicios, captura de carbono, reducción de

deforestación y degradación de bosques y suelos, entre otras (OCDE, 2016; PNUD, 2014).

Tabla 1. 1 Emisión de GEI con factores de Potencial de Calentamiento Global (PCG) a 100 y 20 años

SECTOR	EMISIONES DE GEI EN 2012		PROYECCIÓN DE EMISIONES DE GEI AL 2020	
	PCG 100	PCG 20	PCG 100	PCG 20
	GEI (MtCO _{2e})	GEI (MtCO _{2e})	GEI (MtCO _{2e})	GEI (MtCO _{2e})
Transporte	205.2	206.9	272.2	273.3
Petróleo y Gas	81.8	171.5	111.9	228.8
Industria	125.9	152.4	191.5	228.4
Residuos	48.5	139.8	72	199.6
Agropecuario	101.4	181.5	111.1	198.8
Generación eléctrica	135.5	135.9	161.7	162.2
Forestal	59.6	59.6	59.6	59.6
Residencial	25.6	25.7	29.3	29.3

Fuente: (PECC, 2014)

El Sector de Residuos comprende las emisiones de RESA y aguas residuales, donde su incremento fue resultado del aumento de RESA para la adecuada disposición de los RSU y de plantas de tratamiento de aguas residuales (INECC, 2013).

El 11 de diciembre de 2009, México se declaró listo para asumir el compromiso de alcanzar una reducción respecto de su tendencia de emisiones de GEI, 20% en 2020 y en 50% en 2050, esto si se cuenta con el financiamiento y la transferencia de tecnologías necesarias (INE, 2010; INECC, 2013; PNUMA, 2013; PECC, 2014). Como se proyecta que el sector de Desechos emita 199.60 MtCO_{2e} para 2020, se considera de valioso interés cualquier iniciativa que se tome.

1.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Un desecho o residuo como lo maneja la norma, es un material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (LGPGIR, 2012)

Un residuo se clasifica de acuerdo a su origen, al manejo y al riesgo que representan al ambiente y al ser humano en: Residuos Peligrosos (RP), Residuos de Manejo Especial (RME) y RSU. Los RSU son los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales de los productos que consumen; 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 (PNPGIR, 2012; Rodríguez, 2015). Respecto a la generación nacional de los RSU, el INEGI reportó que para el año 2013, se tuvo una generación de 42,923.3 de miles de toneladas de RSU de las cuales, 28,503 fueron dispuestas en RESA, 3 459.6 en SC, 8 733.4 en TCA y 2 227 se reciclaron¹ (INEGI, 2016b).

El manejo integral de los RSU comprende la generación, el almacenamiento temporal, el barrido, la recolección, la transferencia, el transporte, el tratamiento (reciclaje, composteo, incineración, tratamiento químico, físico, biológico y térmico) y la disposición final. Un sitio de disposición final (SDF) es el lugar donde se depositan los RSU y de Manejo Especial en forma definitiva, y en donde la normatividad señala que hay que realizar caracterizaciones de los RSU (NOM-083-SEMARNAT-2003). La caracterización realizada en el presente estudio para los RSU comprende las determinaciones fisicoquímicas y biológicas que se enlistan en las tablas 1.2, 1.3 y 1.4.

¹ Los datos se refieren a los residuos generados en las ciudades, lo cual incluye residuos generados en casa habitación, comercios, instituciones, lugares de recreación y otros

Tabla 1. 2 Propiedades físicas de los RSU

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	FORMULA	NORMA
Temperatura	Es la medida del grado calorífico en los RSU y tiene que ver con la velocidad de la degradación, con medición directa.	$T=T_1+T_2+T_3$ T =Temperatura T_1, T_2 y T_3 =Temperatura	Este parámetro carece de norma para su medición por lo que se usa la NMX-AA-007-SCFI- 2013.
Potencial de Hidrógeno (pH)	Es la actividad de los iones hidrógeno presentes en una solución acuosa. Indica si un RSU es ácido o básico. El pH es alterado por procesos de formación de amonio y CO ₂ .	$pH=pH_1+pH_2+pH_3$ pH =Potencial de Hidrogeno pH_1, pH_2 y pH	NMX-AA-013-SCFI-2006.
Peso volumétrico in situ	Se ocupa para dimensionar los recipientes y equipos de almacenamiento, recolección y capacidad de los RESA.	$P_v=PV$ P_v =Peso volumétrico del RSU (kg/m ³) P =Peso del RSU (kg) V =Volumen (m ³)	MNX-AA-019-1985

Fuente: (SEMARNAT-a 2016; Tchobanoglous *et al.*, 1994)

Tabla 1. 3 Propiedades físicas de los RSU (continuación).

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN	FORMULA	NORMA
Capacidad de campo	Es la cantidad total de humedad que puede ser retenida por una muestra de RSU, sometida a la acción de la gravedad. Dato necesario para determinar la formación de lixiviados.	$Cc = (H * Pv * V100) + (Si - Di) * \partial [Pv * V * (1 - H100)]$	
		Cc =Capacidad de campo	
		H =% de humedad	
Contenido de humedad	Es la pérdida de peso a 60°C por 2h. Algunos autores reportan 50°C durante 12h. Aporta datos para la cantidad de lixiviados y biogás.	Si =Agua introducida (L)	
		Di =Agua drenada (L)	
		∂ =Densidad de agua (kg/L)	
Permeabilidad de los residuos compactados	Determina el movimiento de líquidos y gases dentro de un RESA. Los valores típicos de k de los RSU compactados se encuentran entre 10^{-11} m ² en la dirección vertical y unos 10^{-10} m ² en la dirección horizontal. El término $Cd2$ se conoce como k , la cual depende de las propiedades del material sólido, incluyendo la distribución del tamaño de poro y la superficie específica.	Pv y V	
		$H = (G - G1G) * 100$	
		H =Humedad en %	
Permeabilidad de los residuos compactados		G =Peso inicial de muestra húmeda (g)	NMX-AA-16-1984
		$G1$ =Peso de muestra seca (g)	
		$K = Cd2\gamma\mu$	
Permeabilidad de los residuos compactados		$K = k\gamma\mu$	
		K =Coeficiente de permeabilidad.	
		C =Constante adimensional	
Permeabilidad de los residuos compactados		d =Tamaño medio de los poros.	
		γ = Peso específico del agua.	
		μ = Viscosidad dinámica del agua.	
Permeabilidad de los residuos compactados		k = impermeabilidad intrínseca	

Fuente: (SEMARNAT-a 2016; Tchobanoglous *et al.*, 1994)

Tabla 1. 4 Propiedades químicas de los RSU

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN	FORMULA
Sólidos volátiles totales (SVT)	Determina el contenido de ceniza y SVT que resulta de la incineración de la muestra a 800°C por una hora en un crisol. Los SVT se utilizan como una medida de biodegradabilidad de la FO de los RSU.	$C = (G_3 - G_1 G_2 - G_1) * 100$ $C = \% \text{ de ceniza en base seca.}$ $G_1 = \text{Peso del crisol}$ $G_2 = \text{Peso del crisol más muestra seca}$ $G_3 = \text{Peso del crisol más muestra calcinada}$
		NMX-AA-018-1984

Fuente: (SEMARNAT-a, 2016; Tchobanoglous *et al.*, 1994)

Tabla 1. 5 Propiedades biológicas de los RSU

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN	FORMULA
Fracción orgánica (FO)	Casi todos los componentes orgánicos excepto el plástico, goma y cuero pueden convertirse en gases y sólidos orgánicos e inorgánicos relativamente inertes, compuestos de azúcares, aminoácidos, AGV, hemicelulosa, celulosa, lípidos, alcoholes, lignina, lignocelulosa y proteínas.	$FO = a + b + c + d + e$ $a = \text{Residuos de comida}$ $b = \text{Papel}$ $c = \text{Cartón}$ $d = \text{Residuos de jardín}$ $e = \text{Madera}$
Biodegradabilidad ¹	Algunos constituyentes orgánicos son altamente volátiles pero bajos en biodegradabilidad, por lo que el uso de SV como factor de biodegradabilidad es erróneo, debido a lo anterior se usa el contenido de lignina de un residuo	$BF = 0.83 - 0.028LC$ $BF = \text{Fracción biodegradable.}$ $LC = \text{Contenido de lignina expresado en \% de peso seco.}$

¹ Se menciona esta propiedad porque el MODUELO lo toma en consideración para la estimación de CH₄, sin embargo, no se realizó el cálculo de manera independiente. Fuente: (SEMARNAT-a, 2016; Tchobanoglous *et al.*, 1994)

1.3 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

Las categorías de los Sitios de Disposición Final (SDF) de RSU son: Relleno Sanitario (RESA), es una infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de RSU y de manejo especial, a fin de controlar a través de la compactación e infraestructura adicional sus impactos ambientales, adicional a esto, se consideran fuentes evaporativas de emisiones según el Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, (SEMARNAT.b, 2013). Sitios Controlados (SC): se define como un sitio inadecuado de disposición final que cumple con las especificaciones de un RESA en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización. Sitios no Controlados (SNC) o tiraderos a cielo abierto (TCA): es un sitio inadecuado de disposición final que no cumple con los requisitos establecidos en la Norma. En 2012, México contaba con 1883 SDF de los cuales, 1645 eran SC y TCA (NOM-083-SEMARNAT-2003; SEMARNAT-INECC, 2012). En estos sitios es donde se da el proceso de degradación de los RSU y la generación de CH₄, CO₂, entre otros.

Los RESA se pueden clasificar de acuerdo a su operación y diseño en (SEMARNAT-a 2016; SEMARNAT & GTZ, 2004):

- a) RESA tradicional o Humedo: previo la disposición de RSU, se prepara el suelo del sitio con un plástico de alta densidad para evitar la infiltración, así como la construcción de los pozos de venteo y fosas o cárcamos para la recolección de lixiviados. Los residuos se colocan en capas compactadas cubriendo con suelo propio del terreno utilizando maquinaria pesada, se debe realizar un monitoreo constante de asentamiento, lixiviados y biogás estos se mantienen hasta por 25 años o más.
- b) RESA-seco o Tumba seca: El principal objetivo es la alta compactación los RSU en pacas (850 a 950 kg/m³) para deducir el volumen y aumentar la capacidad del

sitio, lo anterior aumenta la vida útil de un RESA hasta 50%, sin embargo prolonga el tiempo de descomposición de la fracción orgánica hasta por 100 años.

- c) RESA-Biorreactor Aeróbio: Los lixiviados se drenan, almacenan y posteriormente se recirculan en el RESA de manera controlada, adicionalmente se inyecta aire directamente en la matriz de RSU por medio de pozos verticales u horizontales, a fin de promover la actividad aeróbica y acelerar la estabilización.
- d) RESA-Biorreactor Anaerobio: Se mantiene una humedad óptima para los microorganismos en la matriz de RSU por medio de la recirculación de lixiviados u otras fuentes, se procura la ausencia de O_2 que favorece a la biodegradación anaeróbica, dando inicio a la pronta aparición de biogás principalmente CH_4 que puede ser capturado para minimizar las emisiones de GEI así como para su aprovechamiento como energía alterna
- e) RESA-Biorreactor Híbrido: Se acelera la degradación de los RSU mediante un tratamiento aeróbico-anaeróbico secuencial para degradar rápidamente la fracción orgánica en los niveles superiores del RESA y recoger el biogás de los niveles inferiores.

Con el tipo de RESA que se utilice, para considerar la recirculación horizontal (superficie) es necesario ir colocando los ductos al mismo tiempo de la disposición para que la distribución de la humedad sea uniforme y homogénea a diferentes alturas, sino sólo sería dispersión de humedad en la superficie y lo que se humedezca corresponderá a lo que se percole (Carpenter *et al.*, 2013; Reddy *et al.*, 2014). Cuando se utiliza la recirculación vertical mediante pozos, la distribución de la humedad se da a un radio de no más de 10 metros alrededor del pozo (Aminollah, 2012; Feng *et al.*, 2015)

1.4 DEGRADACIÓN ANAEROBIA

Centrándose en los cambios biológicos de un RESA, la biodegradación de los RSU inicia desde la fuente de generación, donde de manera preferente, los microorganismos aerobios integrarán componentes de bajo peso molecular a sus rutas metabólicas. Ya en la celda del RESA, los microorganismos ahí presentes mostrarán actividad, conforme lo permitan las condiciones del microambiente (Barlaz *et al.*, 1989; Tchobanoglous *et al.*, 1994). Los procesos de la biodegradación en un RESA, tienen un orden de dependencia (producto-sustrato), pero no necesariamente debe concluirse uno para que inicie el siguiente proceso, de hecho, todos los grupos tróficos para producir (CH_4) están presentes en los RSU frescos y suelo, sin embargo, algunos grupos predominarán en un tiempo y espacio dado (Barlaz *et al.*, 1989). La secuencia de descomposición biológica se puede explicar en cinco fases, las cuales se presentan en la figura 1.2 y se describen a continuación (Davis & Masten, 2005; Kjeldsen *et al.*, 2002; Tchobanoglous *et al.*, 1994):

- a) Fase I, Ajuste inicial: En esta fase tiene lugar el proceso de hidrólisis, en donde los compuestos con alto peso molecular (lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) son transformados mediante exoenzimas, en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular. Como productos se tienen CO_2 , H_2O , nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3). La fuente principal de organismos aerobios y anaerobios es el suelo que se utiliza como material de cobertura diario y final, así como lodos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales que se disponen en el RESA y el lixiviado recirculado (Gerardi, 2003). Si existe una concentración alta de lignina entre los polisacáridos o un pH inicial muy ácido, la hidrólisis puede ser el paso limitante para la producción de metano (Barlaz *et al.*, 1997).

Las reacciones aeróbicas liberan más energía y presentan una mayor síntesis celular que las anaerobias, por lo que el incremento de la temperatura (60 a 80°C)

en las celdas del RESA puede asociarse a la fase aerobia del inicio de la biodegradación (Madigan *et al.*, 2004).

- b) Fase II, Fase de transición: Empieza a descender el O_2 y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. Mientras el relleno se convierte en anaerobio, el NO_3^- y el sulfato (SO_4^{2-}) se reducen a gas nitrógeno (N_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), sirviendo como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica. Los productos de la hidrólisis son ahora convertidos en amonio, CO_2 , H_2 , alcoholes (etanol, propanol y butanol) y ácidos orgánicos volátiles (AOV) de cadena corta (fórmico, acetato, propionato, neisobutirato y nevalérico). El pH del lixiviado comienza a descender debido a la presencia de AOV y CO_2 dentro de la celda. Las bacterias fermentativas pueden ser aerobias y anaerobias, entre las principales anaerobias están *Acetovibrio cellulyticus* y *Clostridiumthermocellum* (Gerardi, 2003; Mazzarri *et al.*, 2005).

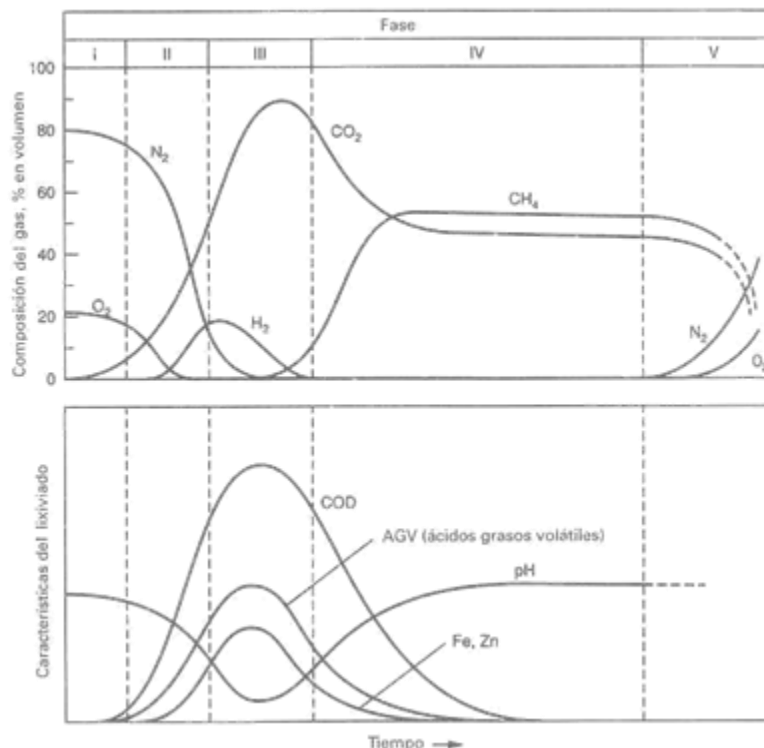


Figura 1. 2 Fases generales de la generación de biogás y lixiviados a partir de RSU

- c) Fase III, Fase ácida: Se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II, con una producción significativa de AOV y pequeñas cantidades de H_2 . Los microorganismos implicados principalmente son bacterias anaerobias facultativas, que se identifican colectivamente como acidogénicas. Dentro de la degradación anaerobia (DA) de los RSU en un RESA se ha identificado una fermentación secundaria, conocida como acetogénesis, en la cual participan las bacterias homoacetogénicas y las acetogénicas productoras obligadas de hidrogeno (OHPA, Obligate Hydrogen Producing Acetogen). Las bacterias homoacetogénicas convierten solamente a acetato los productos de la hidrólisis y la fermentación primaria, mientras que las OHPA oxidan los productos de la fermentación primaria como etanol, propionato y butirato a acetato, CO_2 e H_2 , lo cual es termodinámicamente favorable solo a concentraciones muy bajas de H_2 , por lo que establecen una asociación sintrófica con bacterias consumidoras de H_2 (hidrogenofílicas), como las sulfato reductoras (BSR) y las metanógenas (BM). Debido a que inicia la actividad de las BM, es posible detectar bajas concentraciones de CH_4 en esta fase. Bajo presiones parciales relativamente altas de H_2 , el acetato es reducido en lugar de producir CH_4 , por lo que la presencia de H_2 afecta directamente la generación de este último. La presencia de AOV y altas concentraciones de CO_2 , provoca que los valores de pH en los lixiviados sean tan bajos como 4.0, por lo que debe vigilarse que no llegue a niveles inhibitorios, de lo contrario la fermentación se convierte en el paso limitante para la metanogénesis (Barlaz, 1996; Bitton, 2005; Madigan *et al.*, 2004)

Consecuentemente estos pH bajos, facilitan la disolución de algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados (Kjeldsen *et al.*, 2002). Debido a la disolución de AOV en el lixiviado, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y la conductividad se incrementan en esta fase. Los lixiviados jóvenes se caracterizan por presentar

concentraciones de DQO mayores a 5000 mg/L y de N₂ menores a los 400 mg/L, con una relación de DBO₅/DQO usualmente de 0.4-0.5 o más alta (Francois, V. *et al.*, 2007; Swati *et al.*, 2005).

d) Fase IV, Fase de fermentación de CH₄: El proceso terminal lo realizan las bacterias anaerobias que pertenecen al dominio de las archaea y convierten el ácido acético y el H₂ producidos en la fase ácida en CH₄ y CO₂, aunque también pueden utilizar formiato, metanol, aminas metiladas y sulfuros metilados (García *et al.*, 2000; Madigan *et al.*, 2004). Las metanógenas se pueden dividir en dos subgrupos tróficos: las bacterias hidrogenofílicas no acetilclásticas y las metanogénicas acetilclásticas (Barlaz *et al.*, 1997; Bitton, 2005). En esta fase las concentraciones de CH₄ se incrementan hasta valores entre 50 y 70% volumen (%v/v), con la consecuente disminución de AOV, por lo que también se le conoce como fase de producción acelerada de CH₄ (Barlaz *et al.*, 1989). El pH dentro de la matriz de RSU alcanza valores de 6.8 a 8.0, mientras que, en los lixiviados, la disminución en la concentración de los AOV causa un aumento en el valor del pH hasta 7.0 o más, así como una reducción en el valor de conductividad y en las concentraciones de las DBO₅ y DQO, de manera que la DBO₅/DQO disminuye generalmente a un valor de 0.1 (Francois *et al.*, 2007).

e) Fase V, Fase de maduración: Mientras la humedad sigue migrando a través del lecho de RSU, se convierten porciones del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles. La velocidad de generación del biogás disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores y los sustratos que quedan en los residuos son de lenta biodegradación. Los lixiviados a menudo contienen ácidos húmico y fúlvico, que son difíciles de degradar biológicamente (Castrillón *et al.*, 2010; Barlaz *et al.*, 1989). Los principales gases en esta fase son CH₄ y CO₂, aunque dependiendo de las condiciones de sellado del RESA, también

pueden encontrarse pequeñas cantidades de N_2 y O_2 (Calace *et al.*, 2001; Kjeldsen *et al.*, 2002).

1.5 EMISIONES A PARTIR DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

El biogás es uno de los efluentes contaminantes de los SDF, este gas se compone de los gases que se muestran en la tabla 1.6.

Tabla 1. 6 Composición y características del biogás

Componentes	% del Componente (volumen, base seca)
Metano (CH_4)	55 - 70
Bióxido de Carbono (CO_2)	30 - 45
Nitrógeno (N_2)	2 - 5
Oxígeno (O_2)	0.1 - 1.0
Hidrógeno (H_2)	0 - 0.2
Sulfuros, bisulfuros, mercaptanos	0 - 1.0
Monóxido de Carbono (CO)	0 - 0.2
Amoniaco	0.1 - 1.0
Compuestos traza	0.01 - 0.6
Capacidad Calorífica ($kcal/m^3$)	890 - 1 233
Límite de explosión	6-12% de biogás en el aire
Contenido de Humedad (%)	saturado
Temperatura en la fuente ($^{\circ}C$)	37 - 67
Densidad normal (kg/m^3)	1.2

Fuente: (FAO, 2011)

Ya que el biogás posee capacidad calorífica, al ser generado durante la estabilización de los RSU y no ser aprovechado energéticamente, es emitido a la atmósfera contribuyendo con esto a los GEI. Debido a lo anterior, los SDF deben contar con un sistema que garantice la extracción, captación y conducción del biogás, y cuando no se cuenta con dicho sistema, el biogás debe ser quemado (NOM-083-SEMARNAT-

2003). Las emisiones del biogás se dan a partir de los pozos de venteo, sin embargo, existen emisiones a partir de la superficie, taludes y caminos, y a este tipo de emisiones se les llama emisiones difusas. Éstas contribuyen con un porcentaje considerable (de 30 hasta 90%) de las emisiones totales de un sitio, como lo reportan la AE (2010); Barry *et al.* (2004); Czepiel *et al.* (2003); Spokas *et al.* (2003).

1.6 MODELACIÓN DE LA GENERACIÓN DE METANO

En materia de medio ambiente, las herramientas de computo se han convertido en pilar esencial para estudios a nivel global en aire, agua y suelo. En el rubro de residuos se han desarrollado modelos computacionales como herramienta para aumento de la eficiencia de la operación de los SDF, es decir, proporcionan la información necesaria para eficientar la operación y así, acelerar el tiempo de degradación de los RSU y aumentar la capacidad del sitio. Un modelo se puede definir como una simplificación de la realidad y un simulador como el ensayo de una alternativa en ese modelo o la reproducción del comportamiento de un sistema en determinadas condiciones (Alberto, 1971).

Los simuladores se comenzaron a desarrollar en los años 70's como apoyo en diversas disciplinas como lo es el medio ambiente, y en específico la operación de los SDF (Cuartas, 2012). En este sentido, existen diversos modelos que ayudan a simular y estimar la generación de biogás (GASSIM 2.5, LandGEM 3.02, HBM), (Wang-Yao *et al.*, 2006; Walter *et al.*, 2012) y la generación de lixiviados con diversos modelos hidrológicos (HELP, HSSWDS, UNSAT-H, Migrate v9). Ambos tipos de programas de simulación o modelos sirven para analizar desde las escorrentías, el flujo de los lixiviados, la degradación de los RSU hasta la recirculación de lixiviados (Benbelkacem *et al.*, 2010; Feng *et al.*, 2015). También puede analizarse la distribución de humedad en los SDF y degradación de los RSU con EPA-1975, CREAMS-1980 (Chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems) y HSSWDS-1980

(Hydrologic simulation on waste disposal sites), entre otros. De los modelos mencionados anteriormente, dos de los más conocidos y usados en distintos países están los modelos,

- a) HELP (The hydrologic evaluation of landfill performance). Es un modelo hidrológico cuasi-bidimensional que ayuda analizar el movimiento del agua en los SDF. El modelo utiliza datos sobre climatología, características del suelo e información sobre la ingeniería y el diseño del sitio. Este modelo es el más aceptado y quizá el más usado (Schroeder *et al.*, 1994).
- b) LandGEM 3.02, es un modelo desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Utiliza una ecuación de primer orden para estimar las emisiones anuales de biogás de un SDF durante un período de tiempo determinado con base a la descomposición de la materia orgánica. Algunos datos que se utilizan son capacidad del SDF, entrada anual de RSU, potencial y tasa de generación de CH₄, entre otros (Alexander *et al.*, 2005).

Además de estos dos modelos, está el Modelo Mexicano de Biogás (MMB) y el MODUELO V.4, los cuales se describen brevemente a continuación.

1.6.1 Modelo Mexicano de Biogás v.2.0 (MMB).

El MMB se utilizó para procesar información del sitio y características de las celdas (de diseño y operacionales), así como de la caracterización de los RSU para poder realizar la estimación de generación de CH₄. Cabe mencionar que el simulador ya contiene caracterizaciones de RSU por entidad federativa y los valores para el índice de generación de CH₄ (k) y generación potencial de CH₄ (L_0) por zona geográfica, sin embargo, es posible introducir la caracterización particular del sitio para así disminuir la incertidumbre (SCS, 2009). La agrupación de los subproductos que la NMX-AA-022-1985 establece, se modificó para fines del presente estudio. El MMB utiliza una agrupación diferente de los subproductos teniendo como criterio el grado de

degradación, los dos grandes grupos que abarca el MMB son: orgánicos e inorgánicos, los orgánicos a su vez se dividen en cuatro grupos, como se especifica enseguida:

a) Orgánicos

- Degradación muy rápida: comida, otros orgánicos (material orgánico difícil de ser identificado por su tamaño y textura) y 20% de pañales
- Moderadamente rápida (poda y papel higiénico)
- Moderadamente lenta (papel, cartón y textiles)
- Degradación lenta (madera, caucho, piel, huesos y paja)

b) Inorgánicos

- Construcción, plástico, metales, vidrio, cerámica, 80% de pañales y otros inorgánicos (cabello, piedras, porcentaje de cenizas).

Los resultados que el modelo arroja, son considerando este arreglo en la composición y tomando en cuenta que el flujo de biogás el 50% es de CH₄. La figura 1.3 muestra la hoja de alimentación de información del modelo.

1.6.2 MODUELO v. 4

El MODUELO v.4 es un simulador que ayuda a reproducir tridimensionalmente un SDF, así como a diseñarlo, diagnosticarlo y darle seguimiento. El simulador se basa en una representación formada por capas compuestas por casillas que se van activando a lo largo de la simulación según el plan de explotación. Con MODUELO se puede simular los procesos hidrológicos, de biodegradación, generación de biogás y asentamiento a lo largo del tiempo de manera simplificada; permite estimar diariamente la humedad y composición del vertedero y contaminación orgánica de lixiviados, flujos a través del contorno, asentamientos y cantidad y composición del biogás generado. Además, contiene un diseñador visual que permite generar la geometría y definir elementos con sus características de manera sencilla: situación de cada una de las celdas del RESA, orden de llenado de las mismas, ubicación de los

drenes, etc. (Cuartas, 2012). MODUELO se compone de cuatro modelos: *Modelo del terreno* (morfología del sitio, dimensiones de la celdas, etc), *Modelo meteorológico* (precipitación pluvial, temperatura, etc), *Modelo de degradación* de RSU (caracterización, generación, compactación, etc) y *Modelo hidrológico* (capacidad de las fosas de evaporación, drenes, sistema de recolección , etc). Esta herramienta se complementa con un visor de imágenes que facilita al usuario la comparación de la representación del RESA en MODUELO con las características reales de la instalación a modelar. Como resultado de cada simulación se generan varias tablas: a) Seguimiento temporal de sistemas de recolección de lixiviados, c) Seguimiento temporal de distintas corrientes de lixiviados, d) Estado final de las celdas del vertedero y e) Seguimiento temporal de variables globales del vertedero. Dichas tablas de simulación es posible exportarlas a Excel para el posterior análisis de resultados (MODUELO, 2012).

Se han mencionado algunos estudios de generación de CH₄ en algunos de esos modelos (Wang-Yao *et al.*, 2006; Walter *et al.*, 2012) para poder analizar desde la degradación hasta la recirculación de lixiviados en un RESA (Benbelkacem *et al.*, 2010; Feng *et al.*, 2015). Respecto a MODUELO, se han realizado estudios desde el 2002 (Dupuit, 2000; Lobo, 2001; Lobo *et al.*, 2002; Lobo y Tejero, 2007; Martínez *et al.*, 2009, entre otros), sin embargo, no se ha presentado un estudio sobre la generación de CH₄ utilizando MODUELO v.4 para recirculación vertical y horizontal. La figura 1.4 muestra la hoja de alimentación para los cuatro modelos de los que se compone el MODUELO.



Modelo Mexicano de Biogás v.2

Fecha: Marzo 2009



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

PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS

PAGINA DE ALIMENTACION

1	Nombre del Sitio:	Relleno Sanitario de San Luis Mextepec										
2	Ciudad:	Zinacantepec										
3	Estado:	México										
4	Región:	Centro/ Interior										
5	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?											
6	Año de apertura del sitio:											
7	Disposición anual	TABLA DE CARACTERIZACION DE RESIDUOS EN LOS DIFERENTES ESTADOS DE MEXICO Y ESPECIFICOS AL SITIO										
8	Año de disposición	Categoría de Residuo	Datos Específicos al Sitio	Jalisco	USA	Aguascalientes	Baja California North	Baja California South	Campeche	Chiapas	Chihuahua	Coahuila
9	Año de clausura	Comida	38.4%	26.1%	13.4%	45.1%	35.8%	30.7%	30.6%	30.6%	26.0%	34.9%
		Papel y Cartón	12.0%	6.8%	23.8%	16.5%	13.1%	16.3%	12.8%	12.8%	18.5%	18.5%
		Poda (jardines)	8.0%	30.5%	4.8%	11.3%	15.5%	9.9%	18.2%	18.2%	7.1%	3.9%
		Madera	1.0%	0.1%	10.1%	0.3%	0.5%	1.1%	2.9%	2.9%	1.0%	2.6%
		Caucho, Piel, Huesos y Paja	1.0%	0.2%	2.8%	0.7%	0.7%	1.2%	3.3%	3.3%	1.2%	0.0%
		Textiles	4.0%	0.2%	4.4%	0.8%	4.1%	5.4%	2.0%	2.0%	7.4%	4.7%
		Papel Higiénico	3.0%	0.0%								
		Otros Orgánicos	0.0%	0.7%	0.9%	0.0%	1.6%	1.9%	5.0%	5.0%	1.8%	0.0%
		Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	2.0%	4.6%	2.8%	11.9%	6.4%	1.3%	1.3%	1.3%	4.9%	
		Metales	3.0%	30.6%	6.3%	2.2%	3.2%				3.2%	3.5%
		Construcción y Demolición	10.0%	0.0%	12.8%	0.1%	0.0%				2.0%	11.3%
		Vidrio y Cerámica	5.0%	0.0%	5.4%	4.6%	3.5%				4.1%	5.0%
		Plásticos	10.0%	0.0%	12.7%	13.1%	7.5%				16.2%	15.6%
		Otros Inorgánicos	2.6%	0.0%	2.7%	2.5%	2.7%				6.6%	
		Porcentaje de degradación muy rápida (1)	38.8%	27.7%	14.3%	45.7%	39.7%	34.0%	35.9%	35.9%	28.8%	34.9%
		Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	11.0%	30.5%	4.8%	11.3%	15.5%	9.9%	18.2%	18.2%	7.1%	3.9%
		Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	16.0%	7.1%	28.2%	17.3%	17.2%	21.7%	14.9%	14.9%	25.8%	23.3%
		Porcentaje de degradación muy lenta (4)	2.0%	0.4%	12.9%	1.0%	1.2%	2.2%	6.2%	6.2%	2.2%	2.6%
		Total Orgánicos	67.8%	65.7%	60.2%	75.3%	73.5%	67.9%	75.1%	75.1%	63.9%	64.6%
		Total Inorgánicos	32.2%	34.3%	39.8%	24.7%	26.5%	32.1%	24.9%	24.9%	36.1%	35.4%
		Porcentaje de degradación muy rápida (1)	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
		Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	45%	45%	45%	40%	35%	35%	50%	50%	35%	35%
		Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
		Porcentaje de degradación muy lenta (4)	12%	12%	16%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
		Residuos en Estados Unidos - % de orgánicos secos			44%							
		% de degradación rápida calculado	69	69		69	69	69	69	69	69	69
14	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):											
15	Porcentaje del área con residuos con sistema de captura:											
16	Porcentaje del área con residuos con cubierta final:											
17	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:											
18	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:											
19	Porcentaje del área con residuos sin cobertura:											
20	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior											
21	¿Se compactan los residuos regularmente?											
22	¿La disposición de residuos se hace en una área específica?											
23a	Existen afloramientos/bortes de lixiviado en la superficie de											
23b	Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?											
24	Eficiencia de captura estimada:											

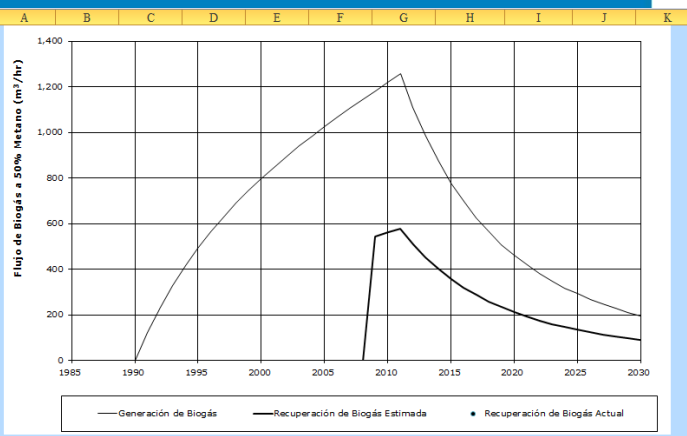


Figura 1. 3. Alimentación de datos en el MMB

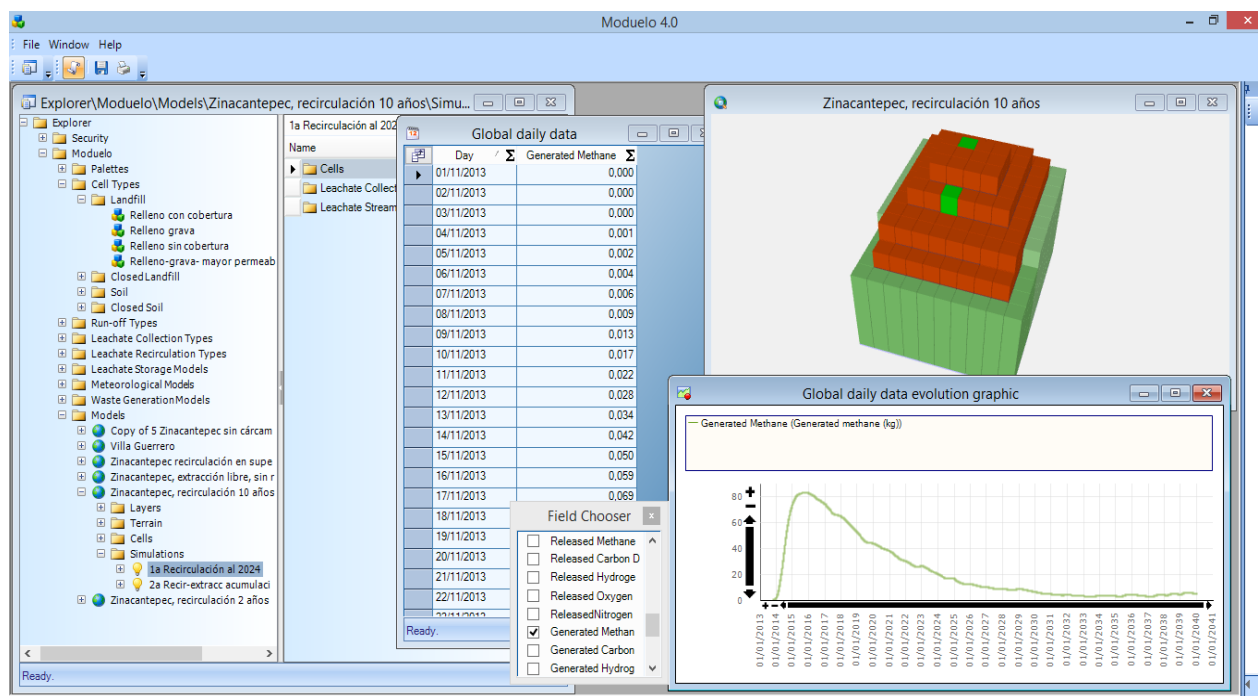


Figura 1. 4. Captura de datos en MODUELO v.4

1.7 ESTADO DEL ARTE EN RSU y BIOGÁS

Los investigadores enfocados al estudio del medio ambiente, se enfrentan actualmente con el reto de realizar trabajos que ayuden en la mitigación de GEI y para ello se debe primero detectar las fuentes y los efectos que tienen sobre la biosfera y el Cambio Climático (CC), (PECC, 2016). Las fuentes emisoras pueden clasificarse en cuatro tipos: fuentes puntuales, que corresponden a los establecimientos industriales; fuentes de área, que son aquellos establecimientos que de manera individual emiten cantidades relativamente bajas de contaminantes; fuentes móviles, que comprenden los vehículos automotores, tanto de uso privado como el transporte público de pasajeros y de carga; y fuentes naturales, que son aquellos que emiten contaminantes atmosféricos que no provienen directamente de actividades humanas (GEM, 2012). Los RESA se ubican dentro de las fuentes emisoras de área y son la práctica más utilizada para la disposición de RSU, aunque producen CH₄ por la descomposición

anaeróbica de materiales orgánicos. Debido a que el CH_4 es 25 veces más potente como GEI que el CO_2 , los estudios actuales sobre biogás se enfocan en su mitigación. Una opción para reducir las emisiones de este gas es disminuir la fracción orgánica en los RSU, sin embargo, el CH_4 es una fuente de energía alternativa, por lo que algunos países lo capturan en sus RESA y lo utilizan para la generación de energía eléctrica y calórica (GRID, 2013; INE, 2010). En una visión de Energías Renovables 2011-2025 publicada por la Secretaria de Energía (SENER) en 2011 se menciona que México tiene gran potencial para el aprovechamiento de rellenos sanitarios para la producción de biogás, como fuente de energía eléctrica y térmica. En este sentido, en México ya se provecha energéticamente el CH_4 a partir de la degradación de los RSU como lo es Monterrey, Nuevo León, San Nicolás, Aguascalientes y Ciudad Juárez Chihuahua (CFE-IE, 2012). A continuación, se describen algunos de los trabajos reportados sobre estudios en SDF y estudios de estimación de emisiones de biogás en pozos y difusas y recirculación de lixiviados con modelos.

1.7.1 Estudios sobre RSU, lixiviados y biogás en SDF

Machado *et al.* (2008) llevaron a cabo la medición de la generación de CH_4 de un RESA del Salvador, Brasil. El muestreo se realizó a RSU nuevos (tomados directamente en el frente de tiro de camiones escogidos aleatoriamente) y RSU viejos (directamente de la celda, estimando residuos de diferentes edades). De cada muestra determinan la composición de los RSU en base seca y base húmeda, el contenido de humedad, sólidos volátiles totales (SVT) y contenido de lignina, así como los parámetros k y L_0 con base al método IPCC. Para las determinaciones de CH_4 utilizan la predicción teórica, mediciones en laboratorio y mediciones del gas in situ, estas dos últimas se basan en el método de la USEPA (US Environmental Protection Agency). Las predicciones teóricas se basan en la composición química de los RSU que dan un máximo absoluto de CH_4 . Los resultados los presentan conforme a tipo de RSU y su antigüedad, reportando que L_0 disminuye con respecto al tiempo, de 65.9 mCH_4/Mg

para las muestras de RSU nuevos a 19.73 mCH₄/Mg para RSU de 9 años de antigüedad.

Chugh *et al.* (1998) estudiaron los efectos en la degradación de los RSU con la recirculación de lixiviados a tres tasas: 30%v, 10%v y 2%v, encontrando que a mayor humedad se acelera la aparición de la fase metanogénica y existe una mayor generación de biogás. Lo anterior podría deberse a que el incremento en la humedad permite una mejor distribución de los nutrientes, incrementa el lavado y dilución de los productos inhibidores de un proceso aerobio, y mantiene las condiciones para los microorganismos en el lecho de los RSU. Los resultados mostraron que hubo una dilución de la DQO y AOV disminuyendo más rápido cuando la humedad se incrementó en los biorreactores a los que se les inyectó el 30%v y 10%v.

Schiappacasse *et al.* (2008) Los autores evaluaron el efecto de la recirculación del lixiviado tratado anaeróbicamente sobre las velocidades de asentamiento de los RESA. Realizaron un seguimiento del comportamiento a escala pre-piloto de dos RESA, cargados inicialmente con 0,5 T de RSU, operando uno con recirculación de lixiviado tratado en un filtro anaerobio y el otro con recirculación de lixiviado sin tratamiento. Posteriormente con un biorreactor a escala piloto, cargado inicialmente con 1.440 T de RSU y con base a sus resultados, concluyen que es posible reducir los tiempos de estabilización en alrededor de un 40% si se recircula lixiviado no tratado y cerca de un 80% si el lixiviado es tratado anaeróbicamente.

Mohammed *et al.* (2009), llevaron a cabo un estudio en general de lo que envuelve la generación de biogás en un RESA. Mencionan que dentro de los factores que afectan la generación de biogás en la superficie, en las laderas y a través de la capa de recubrimiento son: factores ambientales, factores abióticos (O₂, H₂, pH, SO₄²⁻ nutrientes, inhibidores, temperatura y humedad), así como factores de operación del RESA (composición de los residuos, trituración, compactación, cubiertas, recirculación

del lixiviado, las propiedades de migración y actividad de oxidación). La migración del gas la atribuyen a la difusividad y viscosidad del mismo, a las características físico y químicas de los RSU (permeabilidad, contenido de la mezcla y temperatura) y al sistema de recolección del gas. Concluyen que todos estos factores tienen influencia en la generación y en la migración del biogás hacia arriba, sin embargo, sigue existiendo la migración del gas a los laterales, lo que puede causar una explosión, para evitar esto, el desarrollo de modelos predictivos puede aportar información muy importante.

López-Martínez, (2010) cuantificó la emisión difusa de CH₄ en un RESA del norte de España, identificando diferentes zonas de emisión: con cobertura intermedia, con residuos sin cubrir y balsas de lodos. Utilizó para las mediciones una cámara de flujo estática y dinámica. Obtuvo una tasa de emisión del vertedero dentro del rango de 0.01 a 44.45 g CH₄/m²d. La carga anual de CH₄ emitido por el vertedero fue de 251 t, donde la principal fuente de emisión fueron las balsas de lodos (68%). En la zona de cobertura intermedia las emisiones difusas representaron el 30% del total, mientras que en la zona de cobertura definitiva solo representaron el 3%. Concluye que una mayor densidad de pozos de extracción favorecería la disminución de las emisiones difusas de biogás.

El-salam & Abu-zuid, (2014) En este trabajo se evaluó los efectos asociados con la disposición de los RSU y los lixiviados que se generan en la calidad del agua subterránea en Alejandría. Los resultados afirman que existe severa contaminación de orgánicos, sales y metales pesados siendo que algunos parámetros exceden los límites de la EPA tales como conductividad, sólidos totales disueltos, sulfatos, cloruros, Mn y Fe.

En cuanto a las emisiones de GEI por la degradación de RSU en RESA en México, se han llevado a cabo algunos estudios sobre la generación de biogás en diferentes sitios de disposición en el país, como los que a continuación se describen:

Hernández-Berriel *et al.* (2008), realizaron un estudio en el SDF “El Socavón” ubicado en el Municipio de Metepec en el estado de México cuyo objetivo fue determinar la degradación anaeróbica de los RSU. El estudio se llevó a cabo en biorreactores en laboratorio a escala piloto en donde se simuló la adición de agua bajo dos regímenes diferentes de contenido de humedad (70%v y 80%v de humedad). La variación de la MO y el pH fue analizado en la matriz sólida de los RSU. El lixiviado producido se utilizó para estimar la Capacidad de Campo y para determinar el pH, COD, BOD y metales pesados. Con el balance de agua se observó que al final del experimento el contenido de humedad de cada régimen fue 61% y 65%, respectivamente. La DBO / DQO fue de 0,68 para ambos casos. Bajo estas condiciones operativas se detectó que la tasa de producción de CH₄ es mayor en los biorreactores de 70%v.

Stephany *et al.* (2011), Los autores analizaron el efecto de la adición de lixiviado de alta carga orgánica sobre la biometanización de RSU a diferentes temperaturas (20, 30 y 40 °C) en el rango mesófilo a escala laboratorio. Observaron que los reactores con mayor tasa de producción de biogás fueron aquellos sometidos a temperaturas de 30 y 40 °C respectivamente, a estas temperaturas se logró alcanzar la fase de biometanización en tiempos más cortos.

Aguilar (2012), determinaron los índices k y Lo en las comunidades urbanas de Mexicali y Ensenada y en las comunidades rurales de San Quintín y Vicente Guerrero de Baja California Norte, México. Para ello realizaron la caracterización de los RSU, utilizaron como base algunas constantes del MMB y siguieron los lineamientos del IPCC. Sus resultados muestran que el 64% de los RSU son orgánicos, lo cual influye en el valor de los parámetros k y Lo. Los valores de los parámetros promedio obtenidos

en los cuatro sitios de estudio son similares a los rangos establecidos por el IPCC y el World Bank Group ($k = 0.0404$ por año y $L_0 = 73.645 \text{ m}^3/\text{t RSU}$).

Delgado (2013) estudió el efecto que tiene la tasa y frecuencia de recirculación acelerada de lixiviados en biorreactores escala piloto, al igual que Contreras, (2015) que caracterizó los diferentes tipos de microorganismos aeróbicos y anaerobios que intervienen en las etapas de degradación acelerada de los RSU con recirculación de lixiviados, pero a escala laboratorio. Concluye que en los biorreactores aerobios se obtuvieron las mayores remociones de carga orgánica en lixiviados, así como de sólidos volátiles totales, materia orgánica y compuestos lignocelulósicos en los RSU y la mayor generación de CH_4 fue en los biorreactores anaerobios.

Hernández-berriel *et al.* (2014) Determinaron qué tasa de recirculación provee las mejores condiciones de degradación anaeróbica acelerada, determinaron también el rango de tasa de recirculación para la generación de CH_4 . Los resultados indicaron que la generación de CH_4 durante la etapa metanogénica está directamente correlacionada con la tasa de recirculación y la mejor fue de 30 a 40%v.

1.7.2 Estudios sobre simulaciones de SDF

Aminollah (2012), realizó un estudio sobre la caracterización de RSU en un RESA de Estado Unidos y simuló la recirculación de lixiviados prediciendo la distribución de la humedad después de la inyección de lixiviados de manera vertical y horizontal con el fin de optimizar la tasa de degradación de los RSU. Parte de los resultados muestran la degradación de los RSU a diferentes profundidades, siendo un punto importante para determinar las propiedades del sitio. Dicha caracterización sirvió también como base en la simulación con un modelo computacional. El modelo mostró que dependiendo del grado de degradación que presentan los RSU, la distribución de la humedad es mayor o menor. Con los RSU mayormente degradados los lixiviados se

distribuyen más de manera circular y con los RSU parcialmente degradados la distribución es más ovalada.

Samir (2014) Estudió la generación y captación de biogás para el futuro aprovechamiento energético, recirculando lixiviados de manera controlada en un RESA de Texas, Estado Unidos. Parte del estudio se apoyó en el modelo HELP. Zhan *et al.* (2014) Estudió diversos sitios de China en donde analizó el flujo de varios contaminantes de los lixiviados que fluyen por la masa de RSU.

Komilis & Athiniotou (2014), Desarrollaron un modelo el cual requiere datos de un sitio para predecir la generación de lixiviados ya que no se le ha dado atención a la modelación para un RESA en operación puesto que es un sistema complejo. Los autores usaron los datos de dos años de generación de lixiviados de un RESA en Grecia. Sus resultados mostraron que los lixiviados se vieron afectados con la humedad inicial de los RSU y que existe similitud de la precipitación pluvial con la generación de los mismos, sin embargo, notaron un desfase de dos meses en los datos y lo relacionaron a los canales que existen en la masa de residuos.

Feng *et al.* (2015), analizó la emisión de biogás y el sistema de captación con pozos verticales en un RESA. Durante el análisis estudia las propiedades de los RSU, la tasa de recirculación y la presión de los pozos. Sus resultados muestran que la compactación y la recirculación de los lixiviados tienen un impacto significativo en la distribución y generación de biogás, en la permeabilidad y en la presión.

Se han llevado a cabo algunos estudios sobre estimaciones de la generación a partir del MMB en diferentes sitios de disposición en el país, como los que a continuación se describen:

González-Razo (2012), caracterizó el biogás en el relleno de tierra de Morelia, Michoacán, con el fin de mejorar las estimaciones de emisiones de gases, debido a la alta incertidumbre en estudios semejantes. El autor realiza un muestreo y caracterización de los RSU de acuerdo a la antigüedad de los mismos en 16 puntos, reportando 38 componentes y una fracción orgánica del 77.57 %, lo que refleja que el patrón de consumo de la población va de acuerdo al estilo de vida rural. Analiza fisicoquímicamente el biogás en el sitio y determina los valores de L_0 y k . Utiliza el modelo predictivo Mexicano de Biogás para la estimación de emisión del CH_4 y reporta una generación promedio de 45.6% de CH_4 , 32.4% de CO_2 , 3.1% de O_2 y 18.9% de (N_2 , CO y H_2S), corroborando con otros estudios, que el CH_4 es el que más se genera en un sitio.

Camargo&Vélez (2009) realizaron un estudio sobre los factores que afectan la generación del biogás en sitios de disposición tipo RESA y sus factores. Explican el proceso de generación del biogás y las fases que comprende. Presentan diversas aseveraciones de cómo el alto contenido de humedad incrementa significativamente las reacciones biológicas, aumentando así, la cantidad de biogás generado con el tiempo; la producción del biogás depende de las características y volumen del residuo, compactación, tiempo, antigüedad del sitio de disposición y condiciones ambientales. Mencionan que las investigaciones actuales se apoyan en métodos y modelos como el LandGEM y MICROGEM, ya que se vuelve un tanto complejo la determinación del biogás bajo condiciones ambientales que son variables.

De los trabajos anteriores se observa que para la determinación de las emisiones de biogás en un sitio es necesario conocer la cantidad de RSU dispuesta y la composición, así como particularidades del sitio. Aunque se pueden utilizar los parámetros k y L_0 ya preestablecidos, su determinación *in situ* otorga una mayor certidumbre a la estimación de la generación de biogás, por lo que se recomienda obtenerlos. Por otro lado, una forma efectiva de mitigar la generación de GEI es la captura en los RESA, así como la

adecuación de los SNC y TCA a que operen como un RESA (ICCEM, 2015; IPCC, 2016; PND, 2016).

Cabe mencionar que los estudios de estimación de generación de CH₄ realizados en México solo se han basado en el MMB (González-Razo, 2012). Respecto a MODUELO, el grupo de trabajo formado en la Universidad de Cantabria, España, se ha dado a la tarea de trabajar con el MODUELO publicando algunos estudios (Amaya *et al.*, 2003; Lobo *et al.*, 2004), los cuales concluyen que el mejoramiento del nuevo modelo es capaz de caracterizar la biodegradabilidad de los residuos rápidamente biodegradables y lentamente biodegradables dentro de tres procesos: hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis, los cuales dan lugar a siete cinéticas que son simuladas en reacciones de primer orden.

Debido a que no se ha trabajado con él en nuestro país, de ahí la importancia de analizar la generación de CH₄ con dicho modelo.

CAPITULO 2. PARTE EXPERIMENTAL

El método seguido para la estimación de la generación de biogás en los sitios de disposición del Estado de México estudiados se esquematiza en el diagrama de bloques de la figura 2.1. Cada etapa posteriormente se detalla en los subtemas de este apartado.

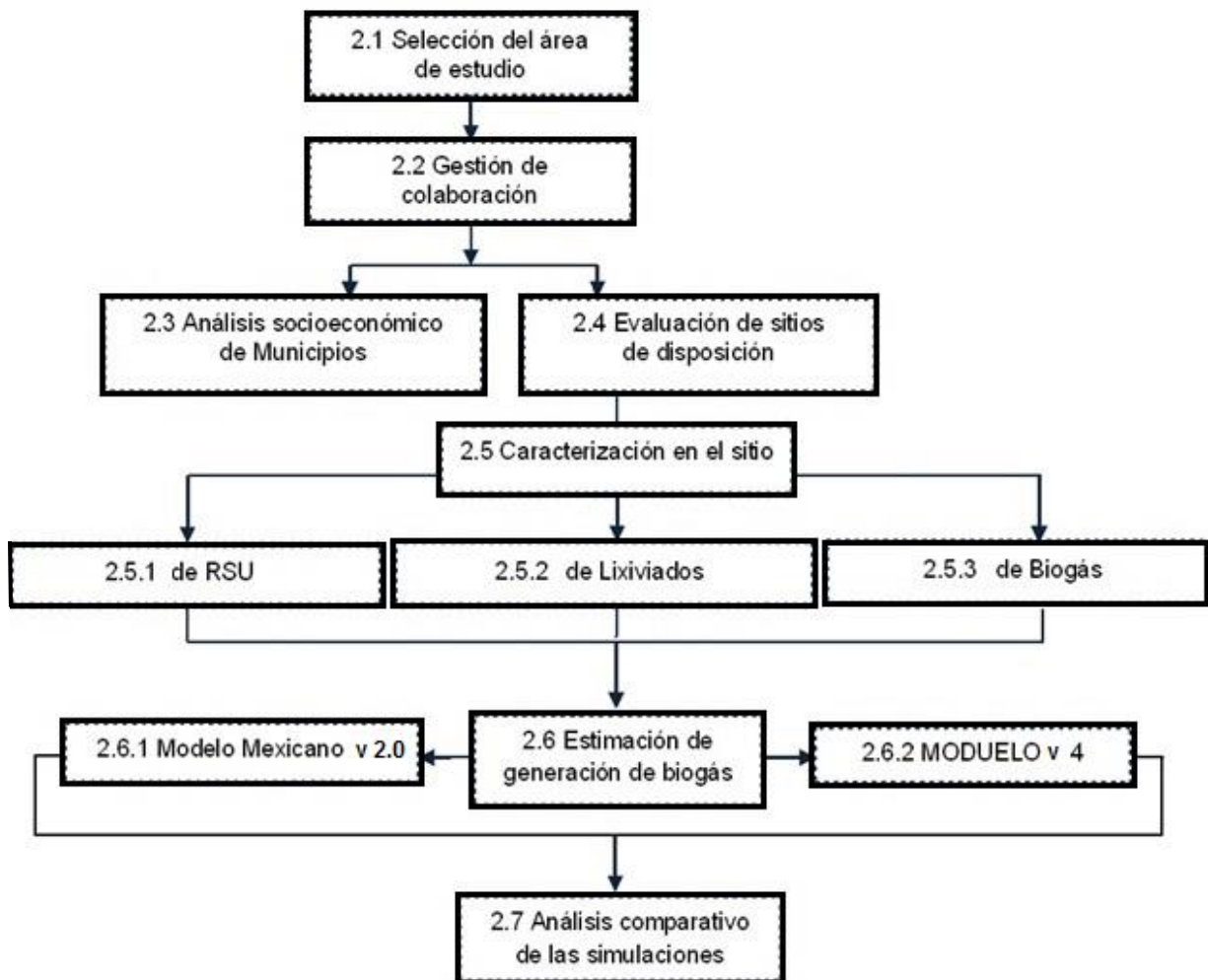


Figura 2. 1 Metodología a seguir para el diagnóstico de la generación de biogás en sitios de disposición final de RSU.

2.1 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La selección de los sitios de disposición se hizo considerando en primera instancia los Municipios que cuentan con sitio de disposición final y que este se clasificará conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003, es decir, RESA, SC, TCA y, como segundo punto, la cercanía al área de influencia del Instituto Tecnológico de Toluca (ITT). Una vez seleccionados los posibles sitios a estudiar, se gestionó con cada Municipio su participación y colaboración.

2.2 GESTIÓN PARA COLABORACIÓN CON LOS MUNICIPIOS

La gestión se realizó en particular con cada Municipio efectuando un primer acercamiento con las personas responsables del Manejo de los Residuos. Debido a que cada Municipio tiene un organigrama particular, se indagó en quiénes son los responsables (Regidores o Directores) de las áreas a fines al Manejo de los RSU, es decir, Medio Ambiente, Ecología, Limpia, Desarrollo Agropecuario y Aguas. Se solicitó una cita a los responsables y una vez concertada, se presentó el Plan de trabajo para este Proyecto. Habiendo realizado la fase de acercamiento verbal con los Municipios, se formalizó la solicitud de colaboración con los interesados y dispuestos a colaborar en el Proyecto. La formalización se realizó entre las autoridades en turno del Instituto Tecnológico de Toluca, Municipalidades y empresa.

2.3 ANÁLISIS SOCIOECONÓMICO DE MUNICIPIOS

La colaboración de los Municipios con el Proyecto consistió en el aporte de información relacionada con el manejo de los RSU, la población y el proporcionar apoyo y libre acceso a su sitio de disposición. Los parámetros que se analizaron se dividen en dos tópicos:

a) Generación

- Territorio, clima

- Bando Municipal
- Habitantes
- Nivel socioeconómico
- Generación diaria de RSU
- Caracterización de RSU

b) Disposición y aprovechamiento

- Lugar de disposición de RSU
- Caracterización de RSU
- Separación de residuos reciclables
- Registro de pepenadores

Esta información se recabó con los responsables del área ambiental en cada Municipio, ya que es lento el flujo de información. En los casos en que no se cuenta con tal información, se indagó con instituciones gubernamentales capaces de proporcionar información relacionada al Municipio y al manejo de sus RSU.

Debido a que no todos los municipios cuentan con información sobre la caracterización de sus RSU se realizó una caracterización en casas-habitación en Zinacantepec, ya que el total de sus RSU se disponen en el RESA de dicho municipio y el último estudio lo reporta MASERA para el 2009. Para este estudio se aplicó la norma NMX-AA-61-1985 referente a la “Generación per cápita de los RSU provenientes de casa habitación”, la norma NMX-AA-019-1985 “Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Peso Volumétrico "In Situ" y la norma NMX-AA-015-1985 que menciona el “Muestreo y el Método de cuarteo”. Las colonias seleccionadas de acuerdo a los estratos socioeconómicos fueron: Ex Hacienda San Jorge (Estrato Alto, EA), Zinacantepec Centro (Estrato Medio, EM) y San Lorenzo Cuahutenco (Estrato Bajo, EB). Como caso especial y por solicitud del Director de Servicios Públicos del municipio, también se realizó este estudio en la colonia San Juan de las Huertas (Zona Otomí, ZO). En cada colonia se

muestrearon en promedio 60 casas habitación con una duración de ocho días, iniciando con un día denominado “limpieza”, el cual consistió en la recolección de los RSU y su disposición inmediata. A partir del segundo día se realizó el pesaje, segregación y determinación de subproductos.

2.4 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN

Una vez concretada la participación con los responsables de los sitios a estudiar se evaluaron una serie de factores (descritos en el apartado 2.3 a, b y c) de los Municipios relacionados con el Manejo de los RSU y por otra parte, los sitios de disposición (entorno, generación de RSU, ingeniería y operación). Dicha evaluación se realizó en cada sitio mediante una Lista de Verificación (LV) y con apoyo de la información recabada de Municipios y los responsables de los sitios de disposición. La LV (Anexo A) fue elaborada a partir de la Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, que entre otros puntos considera los que se listan a continuación (SEMARNAT & GTZ, 2004):

- a) Proyecto Ejecutivo y Evaluación
- b) Restricción para ubicación del sitio
- c) Estudios y análisis previos para la selección del sitio
- d) Estudios y análisis previos en el sitio
- e) Estudios de generación y composición
- f) Características constructivas y operativas del sitio
- g) Clausura del sitio

Si bien, estos son puntos enfocados a un sitio de disposición clasificado como RESA y SC según la norma vigente, para el caso de los TCA, una vez realizados los muestreos se indagó con los responsables del manejo de los sitios sobre todo lo relacionado con la operación y características de dichos sitios.

2.5 CARACTERIZACIÓN EN EL SITIO

En paralelo a la evaluación de los sitios, se realizaron caracterizaciones de RSU, lixiviados y biogás (pozos y superficie). La caracterización de los RSU y los lixiviados se llevó a cabo durante dos años considerando la temporada de estiaje y lluvias, para Zinacantepec (ZIN) y Villa Guerrero (VG) fue en el periodo 2013-2014. Para Tenango del Valle (TV) se muestreo tanto RSU como lixiviados un semestre después y se hizo también por cuatro periodos (Lluvias 2013, estiaje y lluvias 2014 y estiaje 2015).

2.5.1 Caracterización de RSU

La caracterización de los RSU se hizo tomando la muestra en cuatro puntos diferentes de la celda en uso, con el fin de cubrir el total del área. Las muestras de los cinco puntos se colocaban en un extremo de la celda para poder efectuar el método de cuarteo (NMX-AA-015-1985) y determinar el peso volumétrico (NMX-AA-019-1985). Determinado el peso volumétrico, se separaban los 26 subproductos (NMX-AA-022-1985) en bolsas de polietileno, se pesaban cada subproducto y se fraccionaban para formar la muestra representativa que fue analizada fisicoquímicamente (SEMARNAT-a 2016). Las determinaciones fisicoquímicas (Tabla 2.1) se determinaron en el Laboratorio de Pruebas Piloto con base a la normatividad vigente. El %N, C/N y %MO se determinaron en un laboratorio externo.

Tabla 2. 1 Parámetros y técnicas a utilizar en el análisis de RSU

PARÁMETRO	NORMA O MÉTODO
pH	NMX-AA-013-SCFI-2006
Temperatura (°C)	NMX-AA-007-SCFI-2013
Contenido de Humedad (%Hbh)	NMX-AA-016-1984
Sólidos Volátiles Totales (%SVT)	NMX-AA-018-1984
Contenido de Nitrógeno (%N)	NMX-AA-024-1984
Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)	NMX-AA-067-1985
Contenido de Materia Orgánica (%MO)	NMX-AA-021-1985 ¹

¹ Procedimiento adaptado de ICAMEX y la norma Mexicana.

2.5.2 Caracterización de lixiviados

Los lixiviados muestreados fueron de cada fosa de evaporación en cada sitio con base a la norma de aguas residuales (NMX-AA-003-1980) ya que México no cuenta con una norma para muestrear lixiviados. Los parámetros determinados con sus respectivas técnicas se presentan en la tabla 2.2 (SEMARNAT-a, 2016).

Tabla 2. 2 Parámetros y técnicas a utilizar en el análisis de lixiviados

PARÁMETRO	TÉCNICA
Temperatura (°C)	NMX-AA-007-SCFI-2013
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011
Conductividad Eléctrica (mS)	NMX-AA-93-SCFI-2000
DQO (mg/L)	Método Dicromato, USEPA
ST, SVT (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2001
Metales (Cu, Zn, Cd, Ni, Mn, Pb, Fe, Cr)	NMX-AA-051-SCFI-2001 ¹

2.5.3 Caracterización de biogás

El muestreo y análisis del biogás se realizó en los pozos de venteo y en la superficie mediante un medidor de gases portátil marca GEM Modelo 2000 LANDTEC.

a) Pozos de venteo: el biogás fue muestreado por duplicado en cada pozo de venteo de cada sitio, en el caso de ZIN se muestrearon 25 pozos, en VG cuatro y en TV uno. El análisis de biogás en pozos fue de 40 s, tiempo recomendado por el proveedor del equipo (LANDTEC, 2009).

¹ Nota: la NMX-AA-051-SCFI-2001 define al límite máximo permisible (LMP) como el valor o intervalo expresado en unidades de concentración, cantidad de materia o unidades específicas, asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales.

b) Superficie: Para la ubicación de los puntos en superficie se siguió la metodología de la Environment Agency (AE), donde los puntos se distribuyeron de modo aleatorio simple considerando la distancia recomendada entre punto y punto (AE, 2010; Zhang *et al.*, 2013). Una vez localizados en la celda, se instalaron las cámaras estáticas buscando la hermeticidad.

- Se muestreo en los puntos seleccionados y analizó la composición del biogás con el GEM 2000.
- Se determinaron las emisiones difusas de biogás. Las lecturas de biogás se realizaron a diferentes tiempos, iniciando la primera lectura (tiempo cero) al momento de ser instalada la cámara estática, la segunda lectura después de 30 min transcurridos, la tercera lectura en 60 min y así sucesivamente hasta que se detectara una saturación de CH₄ en la cámara.

2.6 ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

Las simulaciones de la generación de CH₄ de los tres sitios se realizaron con el MMB y el MODUELO. En los siguientes apartados se explica que se utilizó para la simulación de cada Modelo.

2.6.1 Modelo Mexicano de Biogás v 2.0 (MMB).

El uso del MMB tuvo como objeto estimar la generación de CH₄ en los SDF y observar sus tendencias dinámicas hasta su clausura. Los datos empleados en la simulación se obtuvieron del muestro en los SDF, de información recabada en los Municipios y con la empresa responsable, para ser procesados posteriormente.

2.6.2 MODUELO v.4.

De manera similar se ajustó a los requerimientos del simulador la información recabada con la empresa y la información recabada en campo, para posteriormente calibrar sus modelos: Modelo del terreno (morfología del sitio, dimensiones de las celdas, etc), Modelo meteorológico (precipitación pluvial, temperatura, etc), Modelo de degradación de RSU (caracterización, generación, compactación, etc) y Modelo hidrológico (capacidad de las fosas de evaporación, drenes, sistema de recolección, etc).

Las simulaciones se realizaron primero para la C4Z y posteriormente para la C1VG. No se realizó para TV debido a la falta de información sobre el diseño del sitio y su operación. Para las dos celdas (C4Z y C1VG) se simularon tres escenarios de gestión de lixiviados por 25 años pos-clausura, para lo cual, se utilizaron datos de campo (caracterización de RSU, lixiviados y climatológicos). Uno de los escenarios fue considerando una tasa de recirculación en pozos del 0.2% (como opera la empresa), otro con recirculación en superficie y otro sin recirculación (operación convencional)

2.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS SIMULACIONES

Los resultados de las simulaciones se compararon y analizaron con respecto a la generación de CH₄. Para el caso del MMB, el alcance fue la estimación de la generación de CH₄ y el porcentaje de recuperación; por el contrario, con el uso del MODUELO se hizo un estudio más completo enfocado a la recirculación de lixiviados y la ventaja que éste tiene en el tiempo de estabilización de la celda, así como a la estimación de la generación de CH₄.

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se describen los resultados obtenidos siguiendo el orden de la metodología propuesta anteriormente. En los apartados 3.1-3.4 se muestran los resultados concernientes a información de los municipios, en los siguientes apartados se presentan los resultados correspondientes a las caracterizaciones realizadas en los tres sitios y las estimaciones de CH₄ con los dos modelos (MMB y MODUELO).

3.1 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

México tiene 1883 sitios de disposición, de los cuales 238 son RESA y 1645 SC y TCA. El Estado de México cuenta con 102 sitios de disposición final de los cuales 16 son RESA, 46 son SC y 37 son TCA¹ (INEGI 2016b). Del total de sitios, siete son los sitios más cercanos al Instituto Tecnológico de Toluca, considerando una distancia no mayor a 70 kilómetros (GEM-SEMARNAT, 2008)

Conforme a lo anterior, se gestionó con los siete Municipios (Calimaya, Almoloya del Río, Mexicaltzingo, Tenango del Valle, San Antonio la Isla, Villa Guerrero y Zinacantepec), la participación en el presente proyecto de investigación, sin embargo, la falta de interés de las autoridades resultó en una respuesta negativa y en algunos casos nula a participar. Finalmente se delimitó el estudio a los Municipios de Zinacantepec (ZIN), Villa Guerrero (VG) y Tenango del Valle (TV), los cuales se muestran en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 respectivamente. De manera que se trabajó con un RESA que cuentan con una celda saneada y celdas tipo RESA en operación, con un SC que tiene una celda saneada y otra celda tipo RESA y un TCA que tiene una celda saneada además de una Celda Abierta la cual está en operación desde enero 2016. Los tres sitios se encuentran cercanos a las zonas urbanas, cumpliendo con la distancia requerida por la norma.

¹ El municipio de Tecámac no proporcionó información para el conteo.

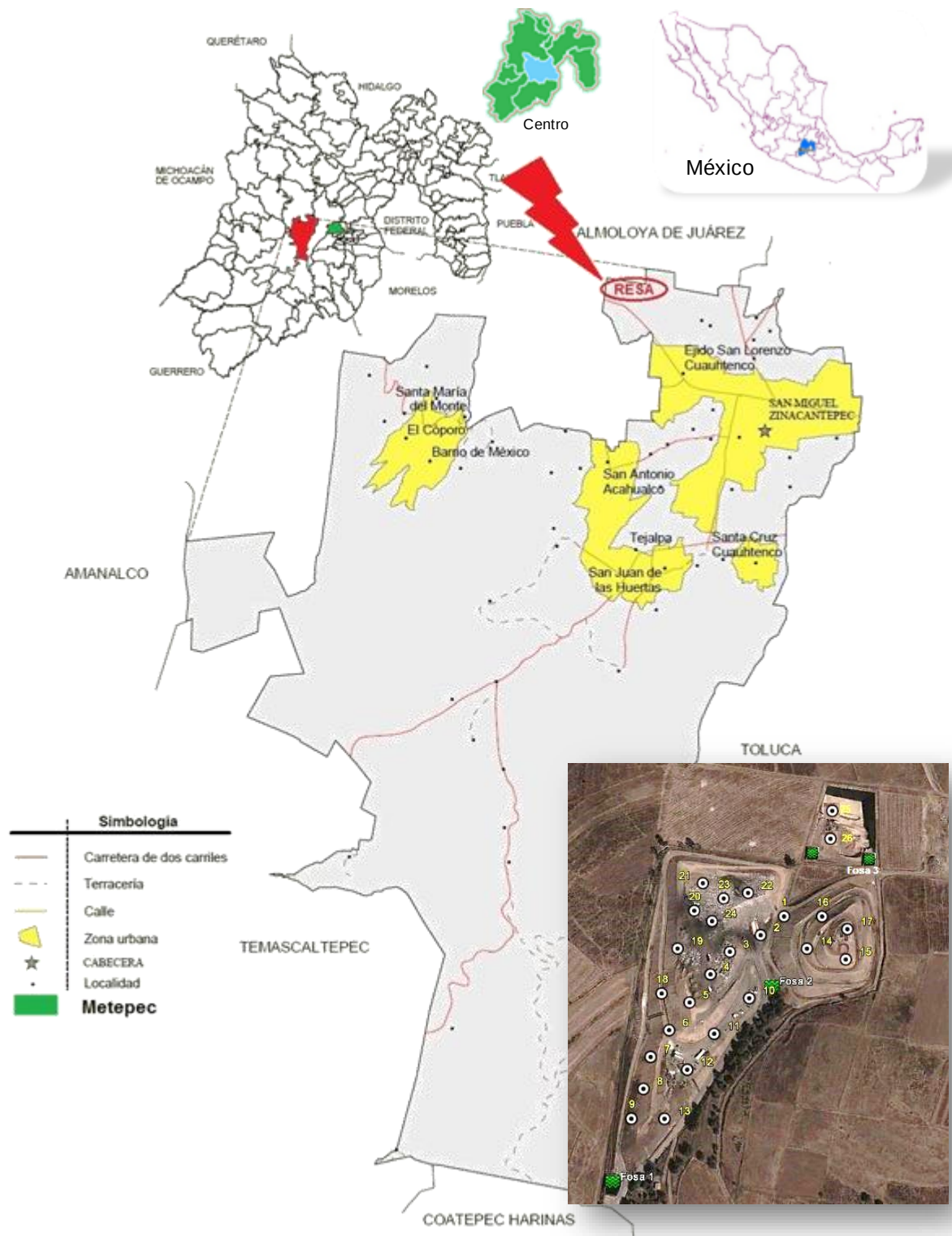


Figura 3. 1 Localización del RESA de ZIN y cercanía con zonas urbanas

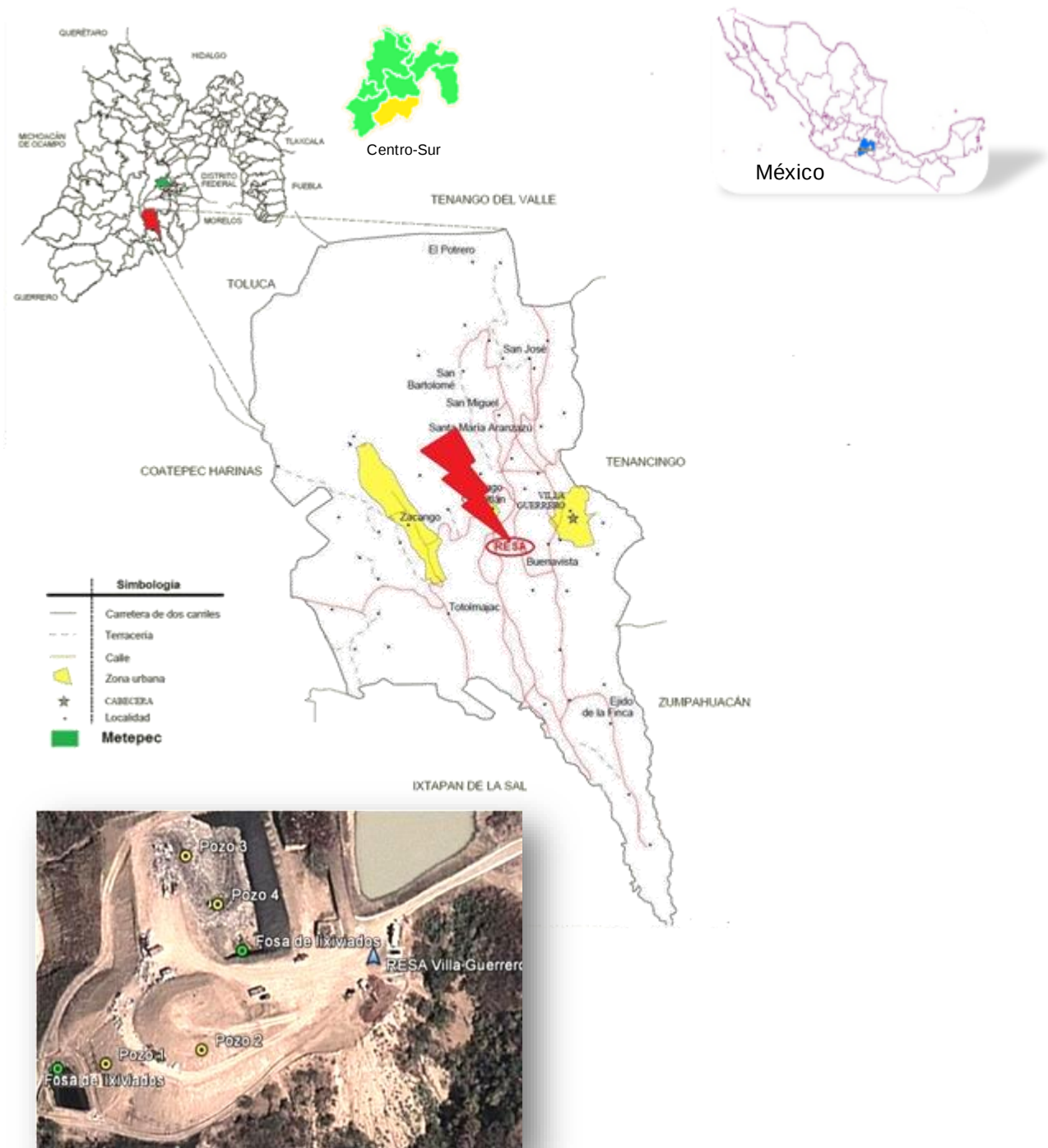


Figura 3. 2 Localización del RESA de VG y cercanía con zonas urbanas

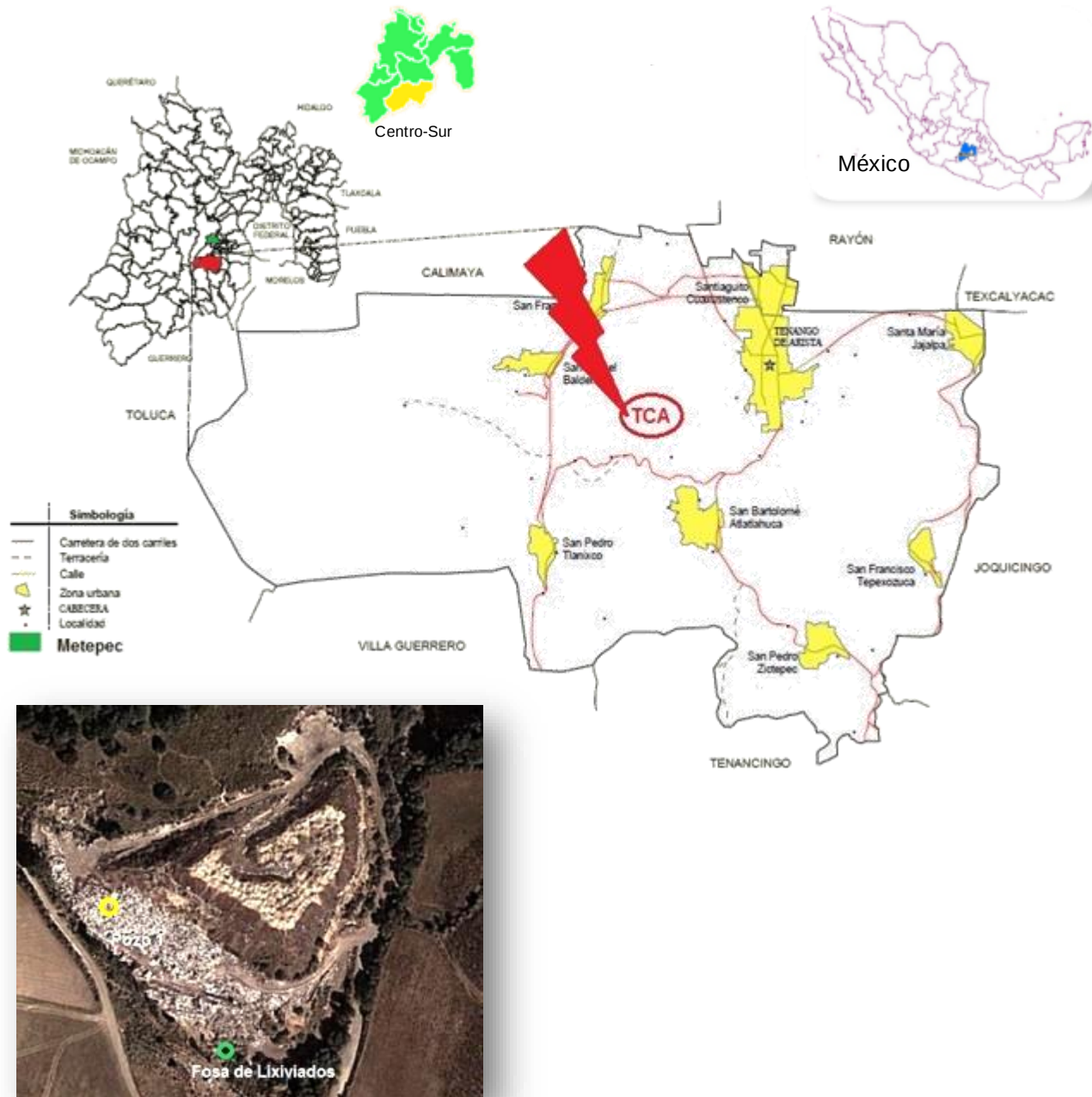


Figura 3. 3 Localización del TCA de TV y cercanía con zonas urbanas

3.2 GESTIÓN PARA COLABORACIÓN CON LOS MUNICIPIOS

La gestión se llevó a cabo con Presidentes Municipales, Regidores y/o Directores de las áreas a fines al Manejo de los RSU, iniciándose en el mes de Marzo de 2013. En esta etapa se presentó a cada Municipio el Plan de trabajo para el Proyecto, los beneficios y las aportaciones que los mismos tendrían hacia la población y medio ambiente. En la tabla 3.1, se presentan las respuestas de cada uno de los Municipios donde $\checkmark$ simboliza la aceptación. De los Municipios considerados, solo San Antonio la Isla desde un inicio mostró desinterés en participar, debido a que de los oficios y llamadas subsecuentes no hubo respuesta, por lo cual se descartó el sitio mencionado. En el caso de los Municipios de Mexicaltzingo y Almoloya del Río hubo interés en participar por parte de las autoridades, sin embargo, otros investigadores estaban realizando estudios en el SDF de este municipio, por lo que se descartó.

Tabla 3. 1 Responsables del Manejo de RSU y respuestas para colaboración

MUNICIPIO	SITIO	RESPONSABLE	ÁREA	RESPUESTA	FORMALIZACIÓN
Almoloya del Río	SC	4º Regidor	Medio Ambiente y Recursos Naturales	$\checkmark$	No realizada
Calimaya	SC	6º. Regidor	Limpieza y Recolección de Basura	$\checkmark$	SR
Mexicaltzingo	TCA	Director	Medio Ambiente	$\checkmark$	No realizada
San Antonio la Isla	RESA	3er. Regidora	Medio Ambiente	SR	-
Tenango del Valle	TCA	Director	Desarrollo Agropecuario y Medio Ambiente	$\checkmark$	$\checkmark$
Villa Guerrero	RESA	Gerente	Mantenimiento y Servicios Ambientales S.A. de C.V.	$\checkmark$	$\checkmark$
Zinacantepec	RESA	Gerente	Mantenimiento y Servicios Ambientales S.A. de C.V.	$\checkmark$	$\checkmark$

SR: Sin respuesta

En el caso del Municipio de Calimaya, mostró interés en un inicio para participar en

el proyecto, pero no hubo respuesta para la formalización a pesar de repetidos oficios de solicitud y llamadas telefónicas. Con los tres restantes, Villa Guerrero, Zinacantepec y Tenango del Valle, se tuvo mayor éxito, ya que desde las primeras reuniones hubo interés formalizando con los dos sin contratiempos, no así con el municipio de Tenango del Valle que por cuestiones administrativas se formalizó unos meses después, sin embargo, se siguió trabajando en el sitio, (Figura A.1).

Una vez definidos los sitios, se comenzó con la recopilación de la información de los Municipios y con los estudios sobre el manejo que éstos tienen del sitio, su ingeniería y operación.

3.3 ANÁLISIS SOCIOECONÓMICO DE MUNICIPIOS

La generación de biogás depende en gran medida de la operación del sitio y de los factores internos que en éste se desarrollen (Mohammed *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2013) así como de los factores mencionados en el apartado 2.3 que marcan el tipo de RSU generados por cada Municipio (patrón de consumo, actividad económica, nivel socioeconómico, población, separación y reciclaje, etc.). El Clima del Estado de México se caracteriza por ser cálido subhúmedo y seco, y la temperatura promedio anual es de 15.5 °C. Sin embargo puede variar de Municipio a Municipio, VG tiene una altitud de 2,159 msnm y tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, tiene una temperatura media anual de 18.7°C con máxima de 27.6°C y mínima de 6°C y su precipitación media es de 1,000 – 1,500mm. ZIN tiene una altitud de 2,746 msnm, el clima es semifrío subhúmedo con lluvias en verano con una temperatura media anual de 13.5°C, con una máxima de 25°C y mínima de 4°C, la precipitación está en el rango de 800 – 1 500mm. TV tiene una altitud de 2,605 msnm, su clima es más húmedo que los que los otros dos Municipios, su clima es templado subhúmedo, su temperatura media es 12.0 °C con una máxima de 16°C y mínima de 4°C, sin embargo su precipitación anual de 1205.5 mm.

Respecto a la población, el Edo. de México, 17,118,525 habitantes en el 2016, La clasificación del municipio según tamaño de localidades es: TV Semiurbano; VG, rural y ZIN se considera Mixto, (SEMARNAT-b, 2016). Las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 muestran los municipios que disponen en el RESA de ZIN y el SC de VG, población y manejo de RSU según el bando municipal (CONAPO, 2016).

De los tres municipios en estudio, se seleccionó el de ZIN por la accesibilidad y permisos para realizar un estudio de generación en casas habitación con el fin de observar el comportamiento de generación de RSU y de comprar los RSU que recibe el SDF. Los cuatros estratos que se analizaron fueron el estrato alto (EA), estrato medio (EM), estrato bajo (EB) y una zona denominada “zona otomí (ZO)”, imágenes de la figura 3.4. El estrato con mayor participación fue el EB, mientras que el de menor participación fue el EM. Lo anterior, debido a que la actividad de los habitantes hacía que no se encontraran en su domicilio y a que la situación actual de inseguridad provocara desconfianza en los habitantes decidiendo no participar.

Como resultado del análisis de generación en casas habitación se observó que el promedio per cápita de generación de RSU para el EA fue de 0.450 kg/hab d, para el EM de 0.349 kg/hab d, para el EB de 0.226 kg/hab d y la para la ZO 0.277 kg/hab d; observándose que esta generación está en relación directa con el estrato socioeconómico, siendo similares en el EB y la ZO, (tabla 3.6).

Tabla 3.2 Información de municipios que depositan en Zinacantepec

MUNICIPIO	PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN, 2015	ACTIVIDAD ECONÓMICA MÁS IMPORTANTE	RSU EN BANDO MUNICIPAL SERVICIO QUE BRINDA EL MUNICIPIO	RSU EN BANDO MUNICIPAL OBLIGACIONES DE LOS HABITANTES
Almoloya de Alquisiras	14 846	Agricultura, ganadería, caza y pesca Servicios e Industria	Recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de RSU	Realizar la separación de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos.
Almoloya de Juárez	176 237	Agropecuaria, Minería, industria	Establecerá los mecanismos necesarios para el mejoramiento y protección al ambiente.	Se sancionará a quien arroje o abandone en vía pública, áreas comunes, lotes baldíos o sitios no autorizados residuos de cualquier especie.
Donato Guerra	34 000	Agropecuaria, forestal, minería industria	Aplicar, regular y controlar Limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos no peligrosos; así como celebrar convenios con otros municipios del Estado o con el sector privado.	Se considera falta o infracción arrojar basura, RSU, entre otros, a las alcantarillas, cajas de válvulas y en general a las instalaciones de agua potable y drenaje, así como a las vías públicas.
San José del Rincón	93 878	Agropecuario Comercio menor	Limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos.	Separar los residuos sólidos en orgánicos e inorgánicos.
Toluca	873 536	Industria agricultura, ganadería	Limpia y gestión, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos sólidos domésticos. Prevenir y controlar la contaminación del suelo por residuos sólidos domésticos.	Entregar sus residuos sólidos domésticos al personal de los vehículos recolectores, debidamente separados en orgánicos, inorgánicos reciclables, inorgánicos no reciclables y sanitarios o higiénicos.
Villa de Allende	52 641	Industria manufacturera Comercio menor	Ayuntamiento autorizará conforme a normatividad: la instalación, operación, mantenimiento de Infraestructura para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de RSU y de manejo especial,	Está prohibido depositar residuos sólidos en los cuerpos de agua.
Zinacantepec	188 927	Servicios, Industria, agropecuaria	Regular y aplicar las disposiciones jurídicas relativas a la recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de RSU.	No arrojar residuos sólidos en las alcantarillas, pozos, cajas de válvulas e instalaciones de agua potable y drenaje. Limpiar y recoger el escombro, los residuos sólidos y el material sobrante de construcciones Colaborar con el Ayuntamiento en la disposición final de RSU

Fuente: (GEM, 2012; INEGI.c, 2015; INEGI, 2016)

Tabla 3.3 Información de municipios que depositan en VG

MUNICIPIO	PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN, 2015	ACTIVIDAD ECONÓMICA MÁS IMPORTANTE	RSU EN BANDO MUNICIPAL SERVICIO QUE BRINDA EL MUNICIPIO	RSU EN BANDO MUNICIPAL OBLIGACIONES DE LOS HABITANTES
Ixtapan de Sal	35,552	Comercio menor Servicios de alojamiento temporal Otros servicios, Industrias manufactureras.	Fijar la política ambiental y procedimientos para llevar a cabo el manejo de los residuos sólidos urbanos.	Limpiar y recoger el escombros, los residuos sólidos y el material sobrante derivados de construcciones que estén bajo su responsabilidad, Evitar arrojar residuos sólidos en la vía pública, tirar desperdicios sólidos o líquidos en alcantarillas, cajas de válvulas, o instalaciones de agua potable y drenaje municipal. Separar los residuos sólidos en orgánicos e inorgánicos
Malinalco	27,482	Comercio menor Industria manufacturera, servicios de alojamiento temporal	Limpia, recolección, traslado y disposición final de los residuos sólidos municipales.	Colocar la basura que generen en los depósitos autorizados por el Ayuntamiento o en los vehículos destinados para la recolección domiciliaria, previa separación de los desechos orgánicos e inorgánicos
Tenancingo	97,891	Comercio menor Otros servicios, Servicios de alojamiento temporal Industrias manufactureras,	Limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos.	Entregar sus residuos a los prestadores del servicio público de limpia separados en orgánicos e inorgánicos; Almacenar, acumular residuos y/o desechos sólidos dentro de cualquier inmueble, que generen malos olores, contaminación, fauna nociva o afecten la salud humana.
Tonatico	12,324	Comercio menor Industrias manufactureras, Servicios de alojamiento temporal.	Para la instalación, operación y mantenimiento de infraestructura para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos, el Ayuntamiento determinará su autorización conforme a la normatividad.	Queda prohibido arrojar o abandonar objetos que representen peligro para la ciudadanía en lugares públicos o lotes baldíos, y sacar los residuos sólidos (basura) antes del toque de la campana.

Tabla 3.4 Información de municipios que depositan en VG (continuación)

Villa Guerrero	67,929	Agropecuaria Forestal y minería	Servicios que brinda el municipio: Limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos sólidos, orgánicos e inorgánicos.	Prohibido Sacar los residuos sólidos a las calles y lugares señalados para ello, antes o después de que pase el carro recolector, depositar envases de productos agroquímicos junto con los residuos sólidos domésticos.
Zumpahuacan	16,927	Comercio menor Servicios de alojamiento temporal	Limpieza, recolección, transporte y destino de residuos sólidos, así como su tratamiento.;	Cumplir con la separación en orgánico, inorgánico y pet. Queda prohibido al público en general dejar la basura en la vía pública sin haber detectado o escuchado el sonido que anuncia el camión recolector de residuos.

Fuente: (GEM, 2012; INEGI.c, 2015; INEGI, 2016)

Tabla 3. 5 Información de municipios que depositan en TV

MUNICIPIO	PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN, 2015	ACTIVIDAD ECONÓMICA MÁS IMPORTANTE	RSU EN BANDO MUNICIPAL SERVICIO QUE BRINDA EL MUNICIPIO	RSU EN BANDO MUNICIPAL OBLIGACIONES DE LOS HABITANTES
Tenango del Valle	86 380	Manufactura y comercio menor, servicios de alojamiento temporal	El servicio de limpia y disposición de desechos, Regular la prevención y control de transportación, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos domiciliarios e industriales	Son obligaciones de los habitantes: Limpiar y recoger el escombro, los residuos sólidos y el material sobrante derivados de construcciones que estén bajo su responsabilidad; No arrojar residuos sólidos o dejar abandonados en la vía pública, ni tirar desperdicios sólidos o líquidos a las instalaciones de agua potable y drenaje. Separar en orgánico e inorgánico

Fuente: (GEM, 2012; INEGI.c, 2015; INEGI, 2016)

Respecto a la composición de los RSU generados se puede decir que, en promedio, los residuos orgánicos de degradación muy rápida (residuos de comida, otros orgánicos y 20% de pañales) se encuentran en mayor proporción, siendo el EB (49.16%) el más cercano al valor de la media nacional (52.40%) reportado por la (SEMARNAT-INECC, 2012). Los productos de degradación moderada representan el 4.88% muy por debajo de los productos de degradación moderadamente lenta con 10.75%, figura 3.5. La diferencia que se da en los residuos de degradación muy rápida durante en seis años (2009 a 2015), indican el cambio de hábito de consumo de la sociedad, han consumido menos productos orgánicos y más productos que contienen envoltura, de ahí el aumento de 9.89% a 17.06%.



Figura 3. 4 Caracterización en el municipio de ZIN, 2015

Tabla 3. 6 Caracterización en casa habitación

SUBPRODUCTO	2009*	PROMEDIO 2015	ESTRATOS, 2015				CATEGORÍA
			EA	EM	EB	ZO	
Comida	50.20	42.65%	40.79%	43.15%	47.15%	39.51%	a
Otros Orgánicos	6.50	0.67%	0.87%	0.92%	0.25%	0.63%	a
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	2.80	7.83%	6.00%	5.63%	10.78%	8.90%	a (20%) i(80%)
Poda (jardines)	0.00	2.07%	2.48%	2.68%	1.91%	1.21%	b
Papel Higiénico	2.80	4.29%	6.32%	3.66%	2.97%	4.21%	b
Textiles	1.70	1.02%	0.73%	1.13%	1.23%	0.98%	c
Papel y Cartón	14.10	9.12%	6.62%	9.76%	9.52%	10.58%	c
Madera	1.20	0.25%	0.18%	0.24%	0.37%	0.22%	d
Caucho. Piel. Huesos y Paja	1.50	0.71%	0.75%	1.31%	0.32%	0.47%	d
Metales	2.20	2.22%	1.97%	2.41%	1.68%	2.81%	i
Construcción y demolición	2.60	0.34%	0.06%	0.52%	0.30%	0.46%	i
Vidrio y Cerámica	0.10	5.90%	10.66%	5.72%	3.03%	4.19%	i
Plásticos	9.80	17.06%	18.76%	16.07%	16.79%	16.61%	i
Otros Inorgánicos	4.50	5.88%	3.82%	6.79%	3.70%	9.19%	i

*Caracterización realizada por la empresa MASERA

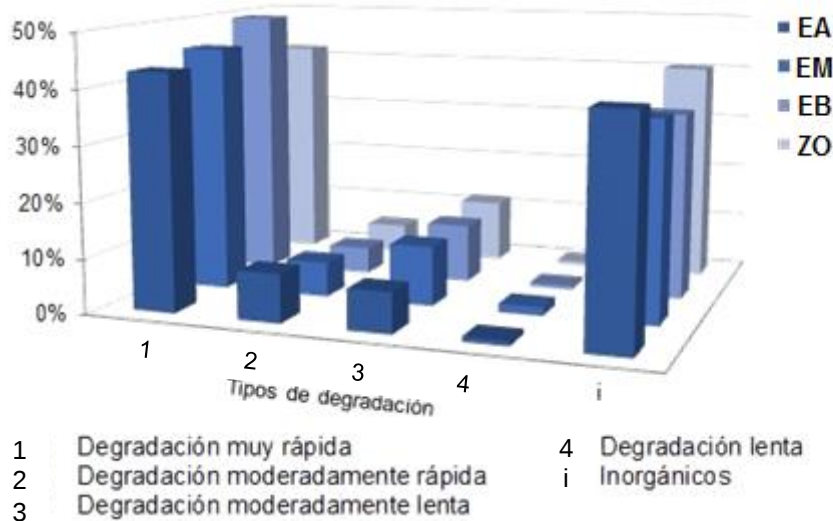


Figura 3. 5 Composición de RSU por estrato del municipio de ZIN

Es importante mencionar que el porcentaje de residuos reciclables determinado en este estudio fue de 41.78% para el EA, 33.89% para el EM, 30.79% para el EB y 33.33% para la ZO; la empresa reporta 16.53% (MASERA, 2007) de material que es recuperado por los pepenadores y vendido a empresas que los reciclan, tabla 3.7. Los tres estratos y la ZO están arriba del 30% de material reciclable y lo que se logra recuperar del SDF es casi la mitad de lo generado, esto quiere decir que existe alrededor del 15% que se recupera de manera informal (camiones recolectores). Este tipo de prácticas se realiza en todos los municipios de México, representa un ingreso para las familias que dependen de esta actividad, sin embargo, es una práctica que debe regularse para así poder sacar todavía un mayor beneficio ambiental y económico para todos (Florisbela dos Santos & Wehenphl, 2001). El potencial de aprovechamiento antes mencionado beneficiaría tanto al municipio de ZIN, a los habitantes, así como al RESA; la capacidad del sitio se vería incrementada en un futuro al sólo recibir RSU que sean de degradación rápida y esto con el fin de generar más CH₄, el mismo que puede ser aprovechado energéticamente (Alghni, 2010; K. *et al.*, 2005; Wagner & Santos, 2007).

Tabla 3. 7 Material reciclable recuperado por los pepenadores en el RESA de ZIN

MATERIAL	CANTIDAD (T)	RECUPERADO (%)
Cartón	38.02	5.85
Plástico		10.24
PET	37.97	5.84
Plásticos	28.61	4.40
Metal		0.43
Aluminio	0.57	0.09
Cobre	0.15	0.02
Bronce	0.02	0.00
Lamina bote	1.01	0.16
Fierro	1.08	0.17

Datos proporcionados por la empresa MASERA, 2015

En la actualidad, países como México no realizan la separación de los RSU en su totalidad y lo que no se separa de manera informal se dispone en los SDF. Los RSU

que aún pueden ser recuperados ha despertado el interés internacional por estudiar los sitios ya clausurados, esta actividad se llama “Landfill Mining” (Hubert *et al.*, 2016; Masi *et al.*, 2014). Esta actividad permite analizar la fracción resto de los RSU ya degradados y que puede ser aprovechable para varios propósitos ambientales

3.4 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN

El concentrado de los resultados obtenidos de la aplicación de la Lista de Verificación y sus observaciones se presentan en la tabla 3.8 y un ejemplo de la Lista en la tabla B.1. El sitio de ZIN empezó a recibir residuos desde 1989 operando inicialmente como un tiradero. En el 2003 la empresa MASERA comenzó las actividades de saneamiento, recuperación y regularización del sitio.

Una vez saneado, se construyeron celdas conforme a la normatividad vigente, operándose la C1Z de 2008 a 2009, la C2Z de 2010 a 2011 y la C3Z de 2012 a 2014 y la C4Z de 2014 a 2015, actualmente está en operación la C5Z. El sitio recibe en promedio 650 t/d de RSU y los pepenadores (personas que realizan la separación de materiales en condiciones inadecuadas) separan aquellos residuos posibles de ser vendidos para su reciclado posterior (cartón, PET, metal, vidrio). A continuación, los RSU son compactados a 830 kg/m^3 mediante un equipo marca CAT, modelo 816F, valor alto a comparación de Cárdenas-Moreno, (2014) que reporta 600 Kg/m^3 para un sitio muy compactado y Samir, (2014) que menciona que el sitio de Cefe Valenzuela en EU se compacta entre 534 y 593 kg/m^3 . Las celdas tipo RESA (C1Z-C5Z) tienen un recubrimiento inferior que está constituido por tres capas impermeables, la primera conformada por material arcilloso con un espesor de 0.30 m compactado al 90% de la prueba proctor, la segunda se compone de una geomembrana de polietileno de alta densidad de 1.5 mm de espesor, la tercera capa que sirve de protección a la geomembrana compuesta por 0.20 m de material arcilloso compactado al 85% de la prueba proctor de acuerdo a la normatividad mexicana

Tabla 3. 8 Evaluación de condiciones de operación conforme a la Lista de Verificación (LV)

SITIO	RESA	ÁREAS DE OPORTUNIDAD	STC	ÁREAS DE OPORTUNIDAD	TCA	ÁREAS DE OPORTUNIDAD
Categoría	A				C	
Proyecto Ejecutivo y Evaluación	100%	No encontradas	100%	No encontradas	0 %	No se cuenta con Proyecto Ejecutivo y evaluación de impacto ambiental
Restricción para ubicación del sitio	100%	No encontradas	100%	No encontradas	0 %	No se tiene estudio previo de la ubicación, se encuentra dentro de un área protegida, distancia mínima a un desarrollo urbano
Estudios y análisis previos para la selección del sitio	100%	No encontradas	100%	No encontradas	0 %	Estudio geológico (fallas, fracturas), hidrológico
Estudios y análisis previos en el sitio	90%	No se determinan características estratigráficas	90%	No se determinan características estratigráficas	0 %	No se determinan estudios geológicos e hidrogeológicos
Estudios de generación y composición	80%	No se realiza balance hídrico del lixiviado	80%	No se realiza balance hídrico del lixiviado	0 %	No realizan estudios de generación y composición de RSU, lixiviados y biogás
Características constructivas y operativas del sitio	70%	No garantiza la extracción captación y conducción del biogás, no cuenta con área de emergencia, fauna nociva, los residuos no se cubren de forma continua, no conoce el grado de estabilización de los residuos y no cuenta con un manual y procedimiento de operación	65%	No garantiza la extracción, captación y conducción del biogás, no cuenta con área de emergencia, fauna nociva, los residuos no se cubren de forma continua, no conoce el grado de estabilización de los residuos y no cuenta con un manual y procedimiento de operación	20%	No garantiza la extracción del biogás, no realiza la quema del biogás, no cuenta con área de emergencia en casos de eventualidad, no controla la fauna nociva, los residuos no se cubren y no se conoce el grado de estabilización de los residuos, no opera conforme a norma
Clausura del sitio	95%	No cuenta con programa de monitoreo de biogás y lixiviados posclausura	90%	No cuenta con programa de monitoreo de biogás y lixiviados posclausura	0 %	No cuenta con programa de monitoreo posclausura y plan de uso posclausura para el sitio
Cumplimiento %	91%		89%		3%	

(SEMARNAT-a, 2016). ZIN no coloca cobertura diaria, sin embargo, la cobertura intermedia se coloca una vez que la terraza alcanza una altura promedio de 7 m.

Los materiales utilizados en la base y superficie de la celda (corona y taludes) son del mismo tipo de suelo del sitio (tobas arcillosas y arcillo-arenosas), que ayudan a evitar infiltraciones y dispersión de los RSU, así como la generación de malos olores y disminuye la fauna nociva. Para el manejo de lixiviados se cuenta con cárcamos y drenes colectores que se dirigen a dos fosas.

El sitio recircula lixiviados una vez por mes con una pipa de 8000 L en coronas, taludes y caminos en todas las celdas del sitio. Esta actividad se realiza de acuerdo a la capacidad existente en las fosas y en la celda que la empresa considere conveniente, rotando aproximadamente una vez por mes. Los pozos de venteo son tubos de PVC, rodeados con una estructura de piedras en la parte superior, para que a su vez el biogás pueda ser quemado y/o utilizado en un futuro para la generación de energía eléctrica. Los pozos tienen un radio de influencia de 25 m de acuerdo a la (Carey *et al.* 2000).

Conforme a la evaluación realizada, ZIN alcanzó una puntuación promedio del 91 %, destacando como áreas de oportunidad las categorías de estudios y análisis previos para la selección del sitio, estudios de generación y composición de los RSU y, características constructivas y operativas del sitio como extracción del biogás y grado de estabilización de los residuos. VG tiene también una puntuación del 91 %, destacando las mismas áreas de oportunidad antes mencionadas.

En cuanto a TV, se desconoce la fecha exacta del inicio de operación, sin embargo, de acuerdo a información verbal del responsable del sitio, se estima que fue durante 1980, año en el cual, si se contaba con una malla ciclónica, que fue destruida por falta de seguridad, que a su vez provocaba accidentalmente conatos de incendios y la destrucción de los pozos de venteo. La CS a un lado de una Celda Abierta (CA) donde están los RSU actualmente no tiene pozos y está cubierta por montículos de tierra de teyolote (piedras usadas en los basamentos y empedrados) de una mina ubicada a

un costado del sitio. El tiradero como tal, TV ubicado al sur-poniente inició su operación en 1995 y finalizó en enero del 2014. Después de casi un año de no disponer RSU (solamente en menor porcentaje y de manera clandestina), a inicios del presente año una empresa privada inició los trabajos de saneamiento. En la CA actualmente solo existe un pozo de venteo fracturado de los cinco inicialmente instalados, debido a que los otros fueron destruidos por descuidos con la maquinaria durante la operación. Los lixiviados tanto de la CS y como de la CA fluyen a la única fosa del sitio. TV carece de infraestructura para el control de ingreso de los RSU, no cuenta con báscula de pesaje y no son compactados ni cubiertos con suelo. No cuenta con drenes perimetrales que impidan la infiltración de los escurrimientos pluviales en la celda y existen malos olores, así como fauna nociva principalmente perros, roedores e insectos (moscos, moscas, pulgas y escarabajos). Como puede observarse en la tabla, es un sitio que puede convertirse en un problema considerable para las comunidades aledañas a corto plazo.

3.5 CARACTERIZACIÓN EN SITIO

La caracterización fisicoquímica de RSU y lixiviados se realizó en los tres sitios: ZIN, VG y TV y se describen en los siguientes apartados.

3.5.1 Análisis de RSU

El análisis de los RSU comprende una parte física y otra parte química las cuales se describen a continuación:

- a) La caracterización física se realizó en los tres sitios y se completaron las caracterizaciones conforme al plan de trabajo definido.

La muestra se tomó de cuatro puntos aleatorios, figuras 3.6 -3.8, en la zona a

muestrear durante dos años, a ésta se le realizó el método de cuarteo y se transportó en un tambo de 200 L al laboratorio del LIIA. En el caso de ZIN y VG, la empresa apoyó con maquinaria para realizar el muestreo de RSU, no así para TV que el muestreo se realizó con palas y picos para remover los RSU y poder verterlos en un tambo de manera manual, como se puede observar en la figura 3.8.



Figura 3. 6 Toma de muestra de RSU en ZIN

En la tabla 3.9 se presentan los resultados de la caracterización, así como datos de una caracterización anterior con fines comparativos (C2Z) reportado por

Delgado (2013). Los subproductos se presentan agrupados como lo solicita el MMB para hacer las estimaciones de generación de CH_4 , esto de acuerdo a las características orgánicas e inorgánicas y la rapidez de degradación.



Figura 3. 7 Toma de muestra de RSU en VG

Las caracterizaciones realizadas durante los dos años de muestreos fueron en las siguientes celdas: celda C1Z estiaje 2014, celda C3Z (estiaje y lluvia 2013 y

estiaje 2014) y celda C4Z lluvias 2014. El valor que resalta fue el de la C1Z en estiaje 2014 porcentaje de comida (0.98%), dicho valor fue porque la degradación de la parte orgánica se llevó a cabo casi por completo, es por eso que también el porcentaje de plástico es el mayor registrado en esa celda para todo el sitio. En temporada de estiaje, TV fue el que presentó el mayor porcentaje en 3 de las 5 categorías (2, 3 y 4). Estas, son las categorías de mediana degradación y el menor porcentaje con los subproductos de degradación muy rápida, lo cual se entiende por la presencia de fauna nociva en el sitio. VG fue el sitio que superó a los otros dos en productos de degradación rápida, así como en productos inorgánicos



Figura 3. 8 Toma de muestra de RSU en TV



Figura 3. 9 Determinación de peso volumétrico

Finalmente, ZIN fue el sitio que tiene más productos inorgánicos que los otros dos y es lógico ya que este sitio recibe RSU de comercios y empresas de la zona industrial de Toluca. Por el contrario, en temporada de lluvias el que presentó mayor porcentaje de productos de degradación muy rápida fue ZIN, no así en las demás categorías (2, 3 4, i). El menor porcentaje de materiales de degradación muy rápida lo tuvo TV y la razón de este comportamiento fue debido a que en TV se suspendió la disposición de RSU por parte del Municipio y a que la presencia de fauna nociva es notable (Figura 3.10). Las diferencias que se cuantificaron entre celda y celda de un mismo sitio, fueron muestra de la variación que se encontró y corroboran el efecto de factores propios de cada ciudad (Zhang *et al.*, 2013; SEMARNAT, 2016).

Tabla 3. 9 Caracterización física de RSU en estiaje y lluvias, 2012-2015

MUNICIPIO	ZINACANTEPEC						VILLA GUERRERO				TENANGO DEL VALLE				SUBCATEGORÍA*	
Celda	C2Z ^a	C3Z		C1Z	C3Z	C4Z	CSVG	C1VG	C1VG	C1VG	TCA					
Subproducto	Estiaje 2012	Estiaje 2013	Lluvias 2013	Estiaje 2014	Lluvias 2014		Estiaje 2013	Lluvias 2013	Estiaje 2014	Lluvias 2014	Lluvias 2013	Estiaje 2014	Lluvias 2014	Estiaje 2015		
	%	%	%	%	%		%	%	%	%	%	%	%	%		
Comida	3.70	9.60	5.47	0.98	6.14	9.89	15.30	15.30	7.95	15.27	2.92	4.36	2.34	2.83	0.63	1
Otros Orgánicos	21.90	12.90	17.48	17.89	20.63	18.81	4.90	4.90	3.96	14.08	19.55	1.68	5.80	3.73	8,87	1
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	3.90	4.20	3.10	2.12	2.03	4.70	4.90	4.90	10.21	4.00	5.10	7.54	1.60	9.32	12,03	1 (20%) i(80%)
Poda (jardines)	3.60	1.40	7.24	1.36	5.73	2.62	2.90	2.90	3.46	5.40	3.56	1.95	22.80	1.08	1,18	2
Papel Higiénico	3.90	4.20	3.10	2.12	2.03	4.70	1.20	1.20	10.21	3.40	0.62	15.09	3.94	10.59	0,22	2
Textiles	2.80	3.60	4.54	5.70	5.79	3.51	6.30	6.30	3.96	2.43	12.65	2.04	7.35	8.64	14,38	3
Papel y Cartón	9.20	9.40	16.79	11.58	12.06	8.21	5.30	5.30	8.84	11.66	11.22	9.39	12.43	14.22	4,38	3
Madera	0.70	0.70	0.75	1.61	0.23	1.12	0.70	0.70	0.86	0.95	0.95	12.34	2.28	0.10	2,34	4
Caucho. Piel. Huesos y Paja	0.30	2.30	0.27	0.09	0.62	0.20	3.80	3.80	0.62	0.54	0.21	2.17	1.85	0.18	1,92	4
Metales	1.80	1.30	0.96	1.32	2.15	1.64	1.60	1.60	1.69	1.62	0.79	1.09	3.09	0.42	1,67	i
Construcción y demolición	4.70	6.80	1.28	4.86	3.09	3.44	3.00	3.00	0.00	2.18	0.47	1.80	2.66	0.00	0,00	i
Vidrio y Cerámica	6.10	2.20	2.59	2.46	2.09	2.40	5.00	5.00	2.33	2.83	1.90	4.17	2.79	2.31	3,33	i
Plásticos	15.20	21.50	27.55	46.33	27.37	23.28	23.10	23.10	31.49	28.79	25.20	25.89	26.49	40.14	44,50	i
Otros Inorgánicos	22.10	19.80	8.89	1.56	10.02	15.47	22.00	22.00	14.41	6.85	14.88	10.48	4.56	6.44	4,53	i

* Orgánicos: 1) Degradación muy rápida: comida, otros orgánicos (material orgánico difícil de ser identificado por su tamaño y textura) y 20% de pañales; 2) Moderadamente rápida (poda y papel higiénico), 3) Moderadamente lenta (papel y cartón y textiles) y 4) Degradación lenta (madera, caucho, piel, huesos y paja); Inorgánicos: i) construcción, plástico, metales, vidrio, cerámica, 80% de pañales y otros inorgánicos (cabello, piedras, porcentaje de cenizas).
a Delgado, 2012
Fuente: (SEMARNAT-a 2016).

Las caracterizaciones promedio de los RSU de cada sitio de disposición se muestra en la tabla 3.10, los cuales servirán más adelante para alimentar el MMB y estimar la generación de biogás. Apoyados también en las categorías propuestas por el MMB, se puede decir que los subproductos de degradación muy rápida (comida, otros orgánicos y de pañales) en ZIN, triplicaron prácticamente (25.84%) su valor al de TV (8.00%), valor por debajo de lo reportado por Xing (2013) que fue 48.07%. Por el contrario, TV triplicó (21.89%) la cantidad de subproductos de degradación moderadamente rápida (poda y papel higiénico) a ZIN (6.82%). A pesar de que ZIN tuvo 1.48% de subproductos de degradación lenta (madera, caucho, piel, huesos y paja), en su momento contribuyeron en retardar la generación de biogás

Tabla 3. 10 Promedio de la caracterización física de RSU en los tres sitios, estiaje y lluvias 2013-2015

SUBPRODUCTO	ZIN, %	VG, %	TV, %
Comida	5.96 $\pm$ 2.70	10.35 $\pm$ 6.05	3.35 $\pm$ 1.54
Otros Orgánicos	19.18 $\pm$ 3.97	5.96 $\pm$ 5.67	3.74 $\pm$ 3.07
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	3.53 $\pm$ 1.03	6.10 $\pm$ 6.46	4.57 $\pm$ 4.42
Poda (jardines)	3.66 $\pm$ 2.36	4.20 $\pm$ 1.24	12.38 $\pm$ 10.71
Papel Higiénico	3.16 $\pm$ 1.27	5.21 $\pm$ 4.30	9.52 $\pm$ 6.65
Textiles	4.32 $\pm$ 1.15	6.33 $\pm$ 4.51	4.70 $\pm$ 5.07
Papel y Cartón	11.21 $\pm$ 3.47	13.83 $\pm$ 4.65	10.91 $\pm$ 4.31
Madera	0.85 $\pm$ 0.32	1.53 $\pm$ 1.36	7.31 $\pm$ 5.48
Caucho, Piel, Huesos y Paja	0.63 $\pm$ 0.89	1.39 $\pm$ 1.61	2.01 $\pm$ 0.91
Metales	1.53 $\pm$ 0.46	1.43 $\pm$ 0.43	2.09 $\pm$ 1.14
Construcción y demolición	4.03 $\pm$ 2.05	1.51 $\pm$ 1.29	2.23 $\pm$ 1.33
Vidrio y Cerámica	2.97 $\pm$ 1.70	3.01 $\pm$ 1.38	3.48 $\pm$ 0.80
Plásticos	26.87 $\pm$ 5.07	27.12 $\pm$ 3.69	26.19 $\pm$ 9.48
Otros Inorgánicos	12.97 $\pm$ 6.77	14.53 $\pm$ 6.19	7.52 $\pm$ 2.80

Fuente: (SEMARNAT-a 2016).

Para los subproductos de degradación moderadamente lenta (papel, cartón y textiles) y subproductos de degradación lenta (madera, caucho, piel, huesos y paja), TV presentó un mayor porcentaje (4.20%), que VG (3.00%) y ZIN (1.90%). Las diferencias anteriormente descritas corroboraron lo reportado por Zhang *et al.*, (2013) en cuanto al efecto de los factores climatológicos propios de cada zona de manera que en este análisis se resaltó el efecto de las actividades económicas (Czepiel *et al.*, 2003; Wang-Yao *et al.*, 2006). Este tipo de diferencias no se adjudican a algún comportamiento de consumo o actividad económica en especial de los municipios, sólo se puede hacer mención de manera particular que el porcentaje de comida en TV es el menor con 7.99% y esto se puede atribuir a la existencia de fauna nociva por las noches en el tiradero, (figura 3.10).



Figura 3. 10 Fauna nociva en el Tiradero a Cielo Abierto de TV

Con el propósito de conocer la composición de los RSU después de 10 años de haber sido depositados se realizó una caracterización en tres puntos diferentes de la C1Z, imágenes de la figura 3.11, Tabla 3.11.

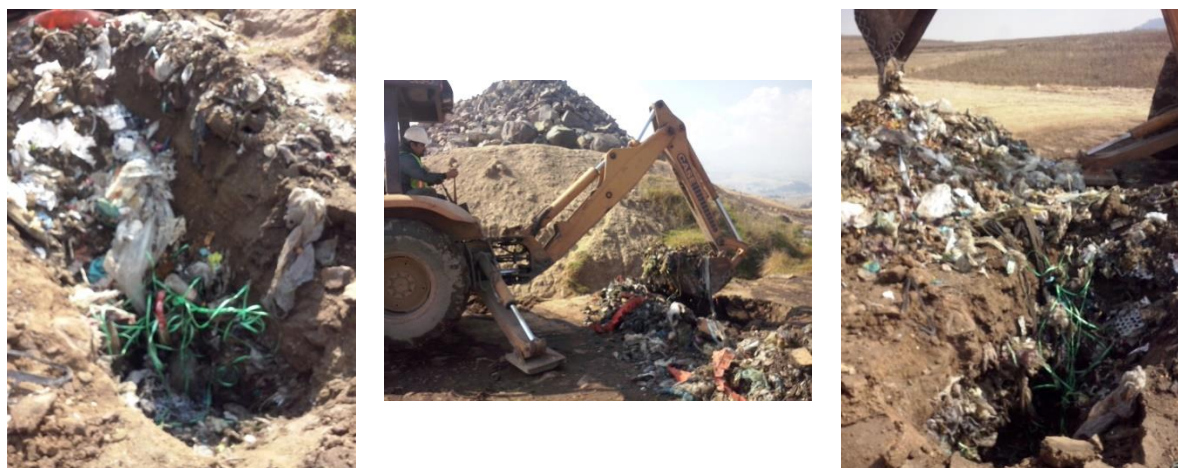


Figura 3. 11 Toma de muestra de RSU con 10 años de ser dispuestos en la CS

Exceptuando papel y cartón, construcción y otros orgánicos (3 subproductos de 14) no se percibió diferencia en los subproductos por lo que, se consideró una composición homogénea en toda la celda.

Tabla 3. 11 Caracterización física de RSU en C1Z, estiaje 2014

MUNICIPIO	ZINACANTEPEC. CELDA 1 (C1Z)		
Subproducto	Punto 1, %	Punto 2, %	Punto 3, %
Comida	2.50	0.31	0.13
Otros Orgánicos	3.18	27.68	22.80
Pañales (asume 20% orgánico /80% inorgánico)	2.18	2.82	1.36
Poda (jardines)	1.47	0.72	1.90
Papel Higiénico	2.18	2.82	1.36
Textiles	4.60	7.07	5.43
Papel y Cartón	26.27	2.15	6.32
Madera	1.89	0.61	2.34
Caucho. Piel. Huesos yPaja	0.11	0.05	0.12
Metales	2.33	1.26	0.38
Construcción y demolición	6.47	1.74	6.38
Vidrio y Cerámica	4.85	1.54	1.00
Plásticos	41.57	51.21	46.20
Otros Inorgánicos	0.37	0.01	4.29

Fuente: (SEMARNAT-a 2016), tabla 2.21.

- b) Análisis químico. Los resultados del análisis en temporada de estiaje y lluvias de dos años se muestran en la tabla 3.12. Los datos indican que el sitio de ZIN a comparación de VG y TV presentó menos MO y se puede inferir que esto corresponde al tipo de RSU que recibió, que son más de tipo industrial, sin embargo, se realizó un estudio de los Municipios que depositan RSU en los tres sitios.

El tiradero de TV acumuló RSU varios meses sin recibir oficialmente y los ahí vertidos no se removieron, cubrieron ni compactaron, por lo que era de esperarse un valor de humedad atípico (2.53%) comparado con los reportados por Zhu *et al.*, (2009) que oscilan entre 40%Hbh y 55%Hbh. El aumento de humedad en lluvias 2014 es evidente y se vio reflejado con la continua disposición clandestina de RSU.

Tabla 3. 12 Caracterización de RSU, temporada de estiaje y lluvias 2013-2015

MUNICIPIO	ZINACANTEPEC				VILLA GUERRERO				TENANGO DEL VALLE			
PARÁMETRO	2013		2014		2013		2014		2013	2014	2015	
	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias
pH	7.40	7.50	6.77	6.57	7.60	7.80	7.35	8.02	7.34	7.90	8.08	7.94
SVT %	57.35	58.68	56.50	40.02	66.77	68.73	76.29	42.42	60.09	84.97	65.23	70.04
%Hbh	29.50	38.74	15.35	34.39	24.07	55.68	29.92	40.16	2.53	40.99	13.34	48.34
N %	0.57	0.85	0.68	0.70	0.93	0.45	0.48	0.79	0.58	0.90	0.66	0.94
C/N	18.64	15.35	28.18	26.98	22.22	42.51	40.78	26.35	25.70	24.80	21.08	22.26
MO	18.32	22.50	33.04	32.57	35.63	32.98	33.75	35.89	35.70	38.49	23.99	36.08

Fuente: (SEMARNAT-a 2016).
MO, Materia Orgánica Fácilmente Oxidable %

Como se dijo anteriormente, los factores ambientales y operacionales influyen en la biodegradación de los RSU y la generación de CH₄ (Czepiel *et al.*, 2003; Jokela *et al.*, 2002; Madigan *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2001). En el sitio de ZIN se observó menor cantidad de SVT que los otros dos sitios, así como de MO, lo que se atribuye al tipo de residuos recibidos. Con la cantidad de MO contenida en los

RSU confinados arriba del 32%, es posible definir que dichos residuos están compuestos principalmente por carbohidratos, grasas y proteínas, los cuales tienen un alto porcentaje de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. La presencia de estos elementos y/o compuestos en una relación adecuada, propicia un medio idóneo para la actividad biológica microbiana, donde intervienen principalmente microorganismos contenidos en el suelo y en los propios residuos, lo que conlleva a la generación de líquidos y en mayor medida producción de gases (Laner *et al.*, 2009).

3.5.2 Análisis de lixiviados

El análisis químico *in situ* de los lixiviados en las temporadas de estiaje y lluvias 2013-2105 para los tres sitios, se muestran en la figura 3.12 y en las tablas 3.13, 3.14 y 3.15. La fosa 2 a comparación de la fosa 1 presentó en cuatro de las cinco lecturas un pH más bajo, debido a que la etapa de las celdas de donde provienen los lixiviados se inclinó más a la fase ácida originada por las reacciones biológicas

En el caso de VG (Tabla 3.14), la variación de pH es mínima para todas las lecturas. Para el 2013 y primer semestre 2014, la fosa 1 recibió los lixiviados de la CSVG y se esperaba un pH muy superior al de la fosa 2, sin embargo, esto se puede atribuir a una dilución de los mismos por la temporada de lluvias y principalmente porque existe combinación de los lixiviados de las dos celdas, CSVG y C1VG. La relación de temperatura y pH es inversamente proporcional, la temperatura disminuye y el pH aumenta, y esto va en relación con el resultado de DQO y SVT, la degradación de la MO se vio influenciada por la baja temperatura que afecta a los microorganismos haciéndola más lenta (Mata, 2003; Zhang *et al.* 2013).

Zinacantepec



Villa Guerrero



Tenango del Valle



Figura 3. 12 Toma de muestra de lixiviados en los tres SDF.

Tabla 3. 13 Análisis fisicoquímico de Lixiviados de ZIN, estiaje y lluvias 2013-2015

TEMPORADA PARÁMETRO	ESTIAJE 2013		LLUVIAS 2013		ESTIAJE 2014		LLUVIAS 2014		ESTIAJE 2015		LLUVIAS 2015		LMP / CPR NOM-SEMARNAT- 052-2005	LMP EN RÍOS P.M. P.D. NOM-ECOL-001- 1996
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Fosa														
Temperatura °C	16.60	18.00	17.00	17.00	15.60	11.40	15.60	16.80	12.00	11.33	14.9	16.6	-	-
pH	8.25	8.03	8.50	6.70	8.41	7.91	8.30	8.71	8.68	8.57	8.53	8.37	-	-
Conductividad Eléctrica mS/cm	18.64	19.61	1.75	1.95	5.58	4.93	2.97	2.75	5.58	4.93	13.46	-	-	-
SVT, mg/L	3205	4097	3483	19867	6089	8489	2731	1622	467	589			-	-
DQO, mg O ₂ /L	2428	2500	3850	43283	11983	20475	2766	1004	9800	6417	4300	2993	-	-
Cu, mg/L	NR	NR	NQ	NQ	NQ	0.15	NQ	NQ	NQ	NQ			NR/Th	4.0-6-0
Zn, mg/L	NR	NR	110.50	11.15	20.71	20.91	2.92	2.86	6.82	4.94			NR/Th	10.0-20.0
Cd, mg/L	NR	NR	ND	ND	ND	ND	NQ	NQ	NQ	NQ			1.00	0.1-0.2
Ni, mg/L	NR	NR	1.05	0.41	0.68	0.84	NQ	NQ	0.61	0.69			NR/Th	2.0-4.0
Mn, mg/L	NR	NR	22.70	2.88	1.98	3.77	1.63	1.16	1.85	0.74			NR/Th	NR
Pb, mg/L	NR	NR	ND	ND	ND	ND	NQ	NQ	NQ	NQ			5.00	0.2-0.4
Fe, mg/L	NR	NR	389.68	44.02	84.99	233.27	21.26	30.12	39.29	16.30			NR	NR
Cr, mg/L	NR	NR	0.50	0.66	0.99	0.73	0.52	NQ	0.90	1.14			5.00	0.5-1.0

CPR: Códigos de peligrosidad de los residuos, LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, ND: No detectado, NQ: No cuantificable, NR: No reportado, P.D.: Promedio diario, P.M.: Promedio Mensual, Th: Toxicidad aguda.

Fuente: (SEMARNAT-a, 2016), tabla 2.2.

Tabla 3. 14 Análisis fisicoquímico de Lixiviados de VG, estiaje y lluvia, 2013-2015

TEMPORADA PARÁMETRO	ESTIAJE 2013		LLUVIAS 2013		ESTIAJE 2014		LLUVIAS 2014		ESTIAJE 2015		LLUVIAS 2015		LMP / CPR NOM- SEMARNAT- 052-2005	.MP EN RÍOS P.M. P.D. NOM-ECOL-001-
	1	2	1	2	1	2	1	Frescos	1	Frescos	1	Frescos		
Fosa														
Temperatura °C	25.80	33.90	19.70	35.50	12.70	14.13	16.37	17.86	19,80	22,73	26.3	22.33	-	-
pH	8.72	7.52	7.30	7.70	8.07	8.08	8.16	8.05	8,43	8,43	8.21	7.91	-	-
Conductividad Eléctrica mS/cm	6.55	19.70	0.87	6.27	2.80	3.11	0.89	2.13	9,90	14,47	7.22	38.65	-	-
SVT, mg/L	7246	8079	583	8067	2533	4444	1004	4066	467	383			-	-
DQO, mg O ₂ /L	6150	4850	883	7700	7567	9583	847.50	2629	3900	8183	1672	11369	-	-
Cu, mg/L	NR	NR	ND	0.14	0.11/NQ	0.33/NQ	NQ	NQ	NQ	NQ			NR/Th	4.0-6-0
Zn, mg/L	NR	NR	NQ	0.94	0.33	0.43	NQ	0.54	0.62	0.96			NR/Th	10.0-20.0
Cd, mg/L	NR	NR	ND	ND	ND	ND	NQ	NQ	NQ	NQ			1.00	0.1-0.2
Ni, mg/L	NR	NR	ND	0.73	0.21/NQ	0.61	NQ	NQ	NQ	Nq			NR/Th	2.0-4.0
Mn, mg/L	NR	NR	0.62	0.99	1.79	3.91	1.17	1.72	2.89	3.64			NR/Th	NR
Pb, mg/L	NR	NR	ND	ND	ND	ND	NQ	NQ	NQ	NQ			5.00	0.2-0.4
Fe, mg/L	NR	NR	7.42	49.67	18.70	33.76	8.39	9.25	11.98	18.73			NR	NR
Cr, mg/L	NR	NR	NQ	2.07	3.86	0.57	NQ	NQ	0.64	0.87			5.00	0.5-1.0

CPR: Códigos de peligrosidad de los residuos, LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, ND: No detectado, NQ: No cuantificable, NR: No reportado, P.D.: Promedio diario, P.M.: Promedio Mensual, Th: Toxicidad aguda.

Fuente: (SEMARNAT-a, 2016), tabla 2.2.

Tabla 3. 15 Análisis fisicoquímico de Lixiviados de TV 2013-2015

TEMPORADA PARÁMETRO	LLUVIAS 2013	ESTIAJE 2014	LLUVIAS 2014	ESTIAJE 2015	LMP / CPR NOM-SEMARNAT- 052-2005	-MP EN RÍOS P.M. P.D. NOM-ECOL-001- 1996
Fosa	1	1	1	1		
Temperatura °C	16.50	14.17	20.40	25.50	-	-
pH	8.40	8.87	8.98	8.74	-	-
Conductividad Eléctrica mS/cm	5.15	6.66	5.46	7.03	-	-
SVT, mg/L	9567	10833	8115.46	7644,44	-	-
DQO, mg O ₂ /L	15980	16567	11187	12350	-	-
Cu, mg/L	NQ	NQ	NQ	NQ	NR/Th	4.0-6-0
Zn, mg/L	3.42	2.22	1.58	1.47	NR/Th	10.0-20.0
Cd, mg/L	ND	ND	NQ	NQ	1.00	0.1-0.2
Ni, mg/L	0.59	0.73	0.46	NQ	NR/Th	2.0-4.0
Mn, mg/L	1.61	NQ	0.50	0.44	NR/Th	NR
Pb, mg/L	ND	ND	NQ	NQ	5.00	0.2-0.4
Fe,mg/L	81.59	48.92	22.89	22.74	NR	NR
Cr, mg/L	5.81	0.78	3.39	2.88	5.00	0.5-1.0

PR: Códigos de peligrosidad de los residuos, LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, ND: No detectado, NQ: No cuantificable, NR: No reportado, P.D.: Promedio diario, P.M.: Promedio Mensual, Th: Toxicidad aguda.

Fuente: (SEMARNAT-a, 2016), tabla 2.2.

El resultado en la determinación de SVT y DQO fue la esperada ya que en los tres sitios van de acuerdo a la degradación de los RSU y al arrastre de componentes orgánicos e inorgánicos de los RSU a los lixiviados, sin embargo es éste último periodo de estiaje 2015 los valores de DQO y SVT disminuyeron drásticamente. Para ZIN y VG, la fosa 1 presentó lixiviados maduros ya en la fase metanogénica pero aún no estabilizados, mientras que la fosa 2 contiene lixiviados jóvenes y en el caso del valor en lluvias 2014, se vió reflejada la dilución que sufren los lixiviados (Kjeldsen *et al.*, 2002). Las concentraciones de metales están influidos por el pH, la solubilidad de

los contaminantes y el contenido de humedad, entre otros, Barlaz (2010). De acuerdo a los resultados obtenidos de metales, los lixiviados de ambas fosas para ZIN y VG, no representan en lo general un riesgo ambiental debido a que los valores de Ni y Mn no rebasan los límites máximo permisible (LMP) de las NOM-052-SEMARNAT-2005 y NOM-ECOL-001-1996; mientras que para otros como Cu, Cd y Pb, sus concentraciones no fueron cuantificables o detectadas.

Fue imposible muestrear la fosa 2 de VG, debido a que la fosa quedó sumergida en la nueva celda. Los resultados que se presentan corresponden al lixiviado que corre por el dren antes de llegar a la fosa de evaporación (Frescos).

Si bien el valor de Zn de la fosa 2 de ZIN se encuentra dentro de los LMP de la NOM-ECOL-001-1996, destaca el valor determinado en la fosa 1 y las dos fosas para la temporada de estiaje en ZIN. Sobresalen los valores de Fe especialmente en la fosa 1 en estiaje 2013 y en lluvias 2013, debido a las características propias del suelo de la región ya que no se manifiesta en una sola fosa la presencia de dicho metal. Lo mismo pasa con el Cr en VG ya que rebasó el límite en la fosa 2 en lluvias 2013 y en la fosa 1 en estiaje 2014.

3.5.3 Análisis del biogás

La caracterización de biogás se realizó en los pozos de venteo y en la superficie mediante cámaras estáticas,. (AE 2010).

- a) Pozos de Venteo. Las caracterizaciones del biogás en los pozos de venteo para los tres sitios se presentan en las figura 3.13 y en las tablas 3.16 y 3.17. Los valores superiores al 50 % de CH₄ y sus respectivas concentraciones de CO₂ son característicos de la fase metanogénica. El pozo 14 en ZIN presenta prácticamente la misma lectura en los tres primeros semestres y en el último bajó más del 50 %, esto puede deberse a diversos factores y por mencionar uno es la conducción que

se da del gas hacia ese pozo debido a los canales que se van dando entre los residuos por la propia degradación, llamados canales preferenciales y estos van provocando los asentamientos en la celda (Sivakumar *et al.*, 2013).

Zinacantepec



Villa Guerrero



Tenango del Valle



Figura 3. 13 Medición de biogás en los tres SDF

Los valores en el pozo 12 denotan que la biodegradación no es homogénea, lo cual puede atribuirse a lo ya mencionado. Se recomienda la revisión de los pozos 2, 4, 5, 13, y 24 ya que los valores menores al 5 % de CH₄ pueden ser indicio de taponeamientos. Los valores encontrados en los pozos 6, 12, 17 y 19, denotan también que la biodegradación no es homogénea, lo cual puede atribuirse a que los lixiviados recirculados en la superficie se difunden menos en ciertas zonas (Carpenter *et al.*, 2013; Robles, 2008). Los pozos 10 y 19 no fue posible muestrearlos en estiaje 2014 debido a cuestiones de operatividad.

Tabla 3. 16 Caracterización de Biogás en pozos de venteo, lluvias 2013-estiaje 2014

Sitio	LLUVIAS 2013					ESTIAJE 2014				
	Pozo /Celda	CH ₄ % v/v	CO ₂ % v/v	Flujo m ³ /h	T (°C)	Pozo /Celda	CH ₄ % v/v	CO ₂ % v/v	Flujo m ³ /h	T (°C)
ZIN	6/CS	27.50	16.45	3.40	29.25	12/CS	28.30	19.90	2.90	23.75
	13/CS	3.95	3.05	ND	26.35	13/CS	3.20	4.80	2.45	25.30
	14/C1	54.15	42.80	6.30	36.10	14/C1	54.40	43.90	3.10	41.30
	17/C1	29.90	23.95	7.15	28.95	15/C1	47.60	38.80	2.75	45.30
	2/C2	56.05	35.70	1.95	30.05	2/C2	0.40	0.30	1.60	21.80
	4/C2	3.75	2.70	3.40	21.80	5/C2	5.80	3.60	1.35	22.10
	10/C2	59.25	40.40	4.15	26.65	-	-	-	-	-
	19/C3	11.45	6.25	3.15	24.15	-	-	-	-	-
	24/C3	3.75	2.70	3.40	21.80	24/C3	0.10	0.20	0.00	20.35
VG	1/CS	29.80	22.30	2.05	30.70	1/CS	28.70	19.40	3.70	27.50
	2/CS	35.30	26.30	2.80	39.15	2/CS	30.80	21.60	3.80	45.30
	3/C1	0.55	0.20	5.10	29.75	3/C1	6.90	4.40	1.20	30.70
	-	-	-	-	-	4/C1	51.90	44.10	3.90	49.20
TV	1/C1	15.60	7.65	2.60	25.45	1/C1	6.70	4.20	1.35	17.90

NC: No Cuantificado; ND: No Detectado; T: Temperatura

El pozo 3 en lluvias 2013 y estiaje 2014 de VG presenta el mismo comportamiento que los pozos 13, 4 y 24 de ZIN, lo que hace suponer que existe taponamiento a causa de la saturación de lixiviados en el mismo. Sin embargo, tomando en cuenta

la temporada de estiaje 2015, se observa que en esa zona la fase de metanogénesis se ve favorecida o que se permite mayor salida del biogás por dicho pozo. El pozo 4 de VG fue imposible muestrearlo en lluvias 2013-2014 y en estiaje 2014 presentó arriba del 50% en CH₄ y 44% de CO₂, lo anterior hace sospechar que el sitio es más joven que ZIN, es decir la fase metanogénica está en una etapa inicial.

Respecto a TV, las lecturas de CH₄ y CO₂ poco a poco fueron bajando y esto puede deberse a que el pozo está fracturado y el biogás en su totalidad de dispersa por los alrededores.

Tabla 3. 17 Caracterización de Biogás en pozos de venteo, 2014-2015

Sitio	LLUVIAS 2014					ESTIAJE 2015				
	Pozo /Celda	CH ₄ % v/v	CO ₂ % v/v	Flujo m ³ /h	T (°C)	Pozo /Celda	CH ₄ % v/v	CO ₂ % v/v	Flujo m ³ /h	T (°C)
ZIN	12/CS	56.10	42.4	2.85	24.95	12/CS	Quemando el CH ₄			
	11/CS	36.35	35.95	1.98	24.35	11/CS	49.35	40.75	2.95	20.10
	14/C1	52.65	45.15	2.80	42.65	14/C1	17.85	19.80	2.01	18.25
	15/C1	54.10	44.10	3.01	43.20	16/C1	14.80	10.45	2.13	20.95
	2/C2	17.15	10.50	2.16	27.85	2/C2	5.35	3.45	2.25	20.65
	5/C2	8.80	4.85	1.87	24.85	5/C2	13.95	7.95	2.24	19.95
	21/C3	54.95	41.25	4.03	33.20	21/C3	54.60	44.65	3.60	40.50
	22/C3	53.00	33.10	4.11	34.80	22/C3	56.10	43.60	3.90	29.65
	23/C3	51.35	34.40	3.56	38.40	23/C3	57.50	41.60	3.90	38.95
VG	1/CS	NC	NC	NC	NC	2/CS	28.25	17.70	2.15	34.10
	2/CS	32.30	21.30	2.43	32.65	3/C1	53.75	43.00	4.01	46.15
	3/C1	53.65	42.50	ND	45.90	4/C1	52.50	45.90	3.50	41.15
	5/C2	0.85	0.5	ND	24.15	5/C2	8.15	5.70	1.98	26.30
TV	1/C1	0.70	0.10	0.00	26.90	1/C1	0.75	0.30	0	18.50

NC: No Cuantificado; ND: No Detectado; T: Temperatura

- b) Biogás en Superficie. La distribución de las cámaras se hizo de manera aleatoria considerando la metodología de la EA, (Figura 3.14), (EA, 2009).

Zinacantepec



Villa Guerrero



Tenango del Valle

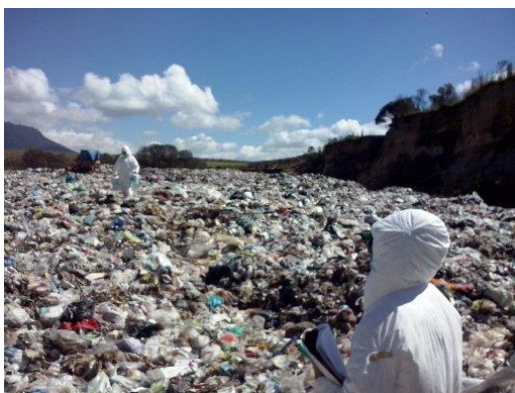


Figura 3. 14 Medición de biogás en superficie en los tres SDF

En el sitio de ZIN, fue imposible instalar la cámara en algunos puntos de la celda y como alternativa se buscó alguna grieta visible cercana al punto marcado y ahí se instaló la cámara. Las lecturas acumuladas de biogás en la superficie al minuto 120 de los cuatro semestres, es decir cuatros temporadas (lluvias y estiaje 2013-2014) se muestran en la tabla 3.18; las lecturas de cada 30 minutos se muestran en el Anexo C. En los seis puntos que se mide la emisión de CH_4 , se encontró que solamente en uno o máximo dos puntos existe una acumulación después de 120 min de hasta 4.4%. El aumento del tiempo de 60 a 120 min entre lluvias 2013 y estiaje 2014 ayudó a precisar las lecturas de CH_4 , sin embargo sigue observándose que la emisión de biogás por la superficie es mínima en este sitio y esto puede atribuirse a la compactación de los RSU y la presencia de suelo de cobertura en las celdas (AE, 2010).

En estiaje y lluvias 2014 se muestreó en la C3Z el biogás en superficie con el fin de detectar posibles emisiones, tabla 3.19. La figura 3.15 muestra la distribución de las cámaras estáticas



Figura 3. 15 Ejemplo de Distribución de cámaras estáticas

En el punto 4 de estiaje 2014 se detectó un máximo de 4.2% valor que se puede considerar despreciable a comparación del punto 3 en lluvias 2014 en donde se detectó 38.90% de CH₄, esto representa (174.41 g/m²/d) más de lo que reporta Wang-Yao *et al.*, (2006) de 5.45 – 129.79 en g/m²/d. Estos valores no indican que haya mayor generación en cierta zona de la celda, lo que se confirma es que el material de cobertura cumple su función (Robles, 2008; Zhang *et al.*, 2013), sin embargo, la existencia de una grieta provoca el aumento de la emisión de biogás a partir de la superficie, punto 3 en lluvias 2014.

Tabla 3. 18 Caracterización de Biogás en superficie C1Z

Cámara	LLUVIAS 2013				ESTIAJE 2014				LLUVIAS 2014				ESTIAJE 2015			
	M (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)	M (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)	M (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)	M (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)
1	60	1.00	0.30	23.20	120	2.70	1.80	28.50	120	0.90	0.60	25.60	120	0.40	0.60	24.30
2	60	0.60	0.20	25.30	120	0.60	0.30	26.50	120	0.00	0.00	22.60	120	0.00	0.00	22.50
3	60	0.40	0.00	21.70	120	0.40	0.00	31.90	120	4.40	3.40	24.80	120	1.40	1.10	23.10
4	60	0.40	0.10	21.40	120	1.70	1.10	30.10	120	0.00	0.10	28.50	120	0.00	0.10	25.40
5	60	1.40	0.80	24.00	120	0.80	0.30	27.20	120	0.10	0.00	24.60	120	0.10	0.00	25.60
6	60	0.40	0.20	25.00	120	0.50	0.20	30.30	120	0.10	0.20	27.90	120	0.10	0.20	26.01

T: Temperatura; Muestreo.

Tabla 3. 19 Caracterización de Biogás en superficie C3Z

Cámara	ESTIAJE 2014				LLUVIAS 2014			
	Muestreo (Min)	CH ₄ (% v/v)	CO ₂ (% v/v)	Temperatura (°C)	Muestreo (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	Temperatura (°C)
1	120	0.50	0.50	25.00	120	15.30	9.60	28.00
2	120	2.10	4.70	28.80	120	0.80	0.20	27.70
3	120	1.50	1.60	29.00	120	38.90	28.40	25.00
4	120	4.20	2.40	36.00	120	4.40	3.70	26.30
5	120	0.60	0.50	30.70	120	11.90	9.00	25.30
6	120	0.50	0.70	34.70	120	1.10	1.10	26.90

En la figura 3.16 se muestra un ejemplo de la distribución de las cámaras en la CSVG. La superficie de la corona de la celda es de aproximadamente 82 m² y las cámaras se distribuyeron a una distancia no más de 20 metros entre sí, considerando las distancias recomendadas (EA, 2009; Zhang *et al.*, 2013).



Figura 3. 16 Distribución de las cámaras estáticas, CSVG

En general no se detecta emisión de CH₄ lo cual puede deberse a que el material de cobertura cumple con la función de evitar la emanación de biogás (NOM-083-SEMARNAT-2003) o bien, que la infiltración de agua pluvial es mínima retardando la biodegradación, Zhang *et al.*, (2013). Sin embargo, en casos puntuales como la cámara 5 en lluvias 2013 y cámara 6 de estiaje 2014, mostraron presencia de CH₄ con una acumulación de 15.20 y 7.10%v/v en los 90 y 120 minutos respectivamente, Tabla 3.20.

En la figura 3.17 se puede apreciar la distribución de las cámaras en TV. El terreno que se ve en la imagen del lado izquierdo se dividió en dos (rectángulo amarillo) por dos razones, en la zona 1 del rectángulo era el frente de tiro y se encontraban pepenadores laborando, lo que impedía el muestreo y la otra razón es que, en la zona 2 los RSU tienen más tiempo de haber sido depositados. La instalación de

las cámaras encima de los RSU requirió de mucho cuidado para evitar cualquier fuga de biogás.



Figura 3. 17 Distribución de las cámaras estáticas en el TCA de TV

Las lecturas de biogás de la superficie de la CA se muestran en la tabla 3.21. Para el caso de lluvias 2013, en el punto 6 se registró un aumento en la generación de CH_4 del 3.0%v/v después de 120 minutos de haber instalado la cámara, lo que indica que no fue necesario un mayor tiempo para alcanzar la saturación en la cámara para tener una lectura más certera. Se observó que las lecturas de CH_4 pueden disminuir y esto puede deberse a la falta de hermeticidad de la cámara en los residuos y a que es un terreno irregular. Las mediciones de biogás en estiaje 2014 se realizaron en los mismos puntos que en la medición anterior para así poder evaluar la diferencia de generación de CH_4 entre temporadas.

Tabla 3. 20 Caracterización de Biogás en superficie CSVG

Cámara	LLUVIAS 2013				ESTIAJE 2014				LLUVIAS 2014				ESTIAJE 2015			
	Muestreo (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)	Muestreo (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)	Muestreo (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)	Muestreo (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)
1	90	0.30	0.10	28.50	120	0.60	6.30	30.70	120	0.10	1.10	29.30	120	0.90	1.00	26.10
2	90	0.30	0.10	30.60	120	0.40	2.30	33.40	120	1.40	10.90	28.70	120	34.40	26.70	25.70
3	90	0.90	0.50	28.80	120	0.30	0.80	30.90	120	0.10	0.90	28.20	120	4.10	2.90	25.50
4	90	0.30	0.00	29.10	120	0.30	0.70	27.80	120	0.10	1.00	30.50	120	0.50	0.70	28.30
5	90	15.20	8.40	28.70	120	0.90	1.50	27.20	120	0.00	0.00	29.80	120	0.50	0.70	26.90
6	90	0.40	0.10	29.30	120	7.10	4.80	28.70	120	0.10	0.40	29.40	120	2.00	0.30	27.10

T: Temperatura

Tabla 3. 21 Caracterización de Biogás en superficie en la CA de TV

Cámara	LLUVIAS 2013				ESTIAJE 2014				LLUVIAS 2014				ESTIAJE 2015			
	Muestreo (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)	Muestreo (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)	Muestreo (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)	Muestreo (min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	T (°C)
1	120	0.50	0.30	30.70	120	0.50	0.20	29.50	120	0.10	0.00	32.80	120	0.40	0.00	26.40
2	120	0.70	0.40	28.70	120	6.80	5.00	31.90	120	0.20	2.30	32.40	120	0.40	0.20	32.10
3	120	0.40	0.00	30.10	120	1.00	0.40	28.40	120	0.10	0.20	28.40	120	0.40	0.00	29.10
4	120	0.40	0.00	26.20	60	0.50	0.00	28.10	120	0.10	0.00	24.90	120	0.40	0.00	26.00
5	90	0.60	0.60	30.90	90	0.50	0.00	25.50	120	0.10	0.30	24.70	120	0.40	0.10	26.70
6	120	3.00	2.10	29.40	120	0.50	0.10	25.40	120	0.10	0.10	25.20	120	0.40	0.00	27.00

T: Temperatura

El TCA de TV tiene una Celda Saneada (CSTV) que fue muestreada solamente en la superficie ya que los pozos que tenía fueron quemados y destruidos por falta de vigilancia. La distribución de las cámaras se muestra en la figura 3.17 y las lecturas de biogás durante 120 min se muestran en la tabla 3.22.

Tabla 3. 22 Caracterización de Biogás en superficie CSTV

ESTIAJE 2014					
Cámara	Muestreo (Min)	CH ₄ (% v/v)	CO ₂ (% v/v)	O ₂ (% v/v)	Temperatura (°C)
1	120	0.80	1.10	17.80	29.20
2	120	0.90	2.90	16.30	28.70
3	120	0.50	0.50	18.50	26.00
4	120	0.50	0.80	18.30	27.00
5	120	0.60	0.40	18.60	23.90
6	120	0.50	0.70	18.30	23.60

La superficie de la CSTV está cubierta de Teloyote, tierra extraída de una barranca ubicada a pocos metros de la CA. La superficie de la celda tiene montículos de esta tierra lo que imposibilitaba la instalación de las cámaras, de ahí la explicación de las lecturas de biogás casi nulas en los puntos 3, 4, 5 y 6, Solamente fue posible detectar una mínima presencia de CH₄ en los puntos 1 (0.5%) y 2 (0.9%).

3.6 ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

La generación de CH₄ de los tres sitios se estimó con los modelos MMB y MODUELO, los resultados se muestran en los apartados siguientes.

3.6.1 Modelo Mexicano de Biogás v.2.0.

Las estimaciones realizadas de los tres sitios de disposición se obtuvieron mediante el MMB el cual fue alimentado con información de la empresa MASERA y con datos de la caracterización realizada en cada sitio.

La tabla 3.23 muestra la estimación de generación de CH_4 /RSU para cada sitio. En el sitio de ZIN, la CSZ es la más antigua y contiene mayor número de RSU depositados, estas dos características se ven reflejadas en la cantidad de generación de CH_4 /RSU, ya que es la mayor generadora de CH_4 del sitio. La cantidad de RSU en la C2Z es mayor que en la C1Z (40,000 Mg de RSU acumulados), sin embargo la cantidad de m^3CH_4 /Mg RSU en la C1Z es 30% más que en la C2Z. Lo anterior puede atribuirse a diferencias de operación, periodo de disposición de cada celda (CSZ 2006-2007), (C1Z 2008-2009), (C2Z 2010-2011), (C3Z 2012-2014) (C4Z 2014-2015), y a las características propias y composición de los RSU ahí depositados (Bareither *et al.* 2013). La C3Z fue caracterizada en temporadas de estiaje y lluvias, donde claramente se puede observar el efecto de la percolación del agua en temporada de lluvias ya que existe un aumento del 50% en $\text{GgCO}_{2e}/30a$ de CH_4 y del 25% m^3CH_4 /MgRSU (Hernández-berriel *et al.* 2008; Zhang *et al.*, (2013). Este efecto también se puede atribuir a la compactación y a la edad de los residuos, puesto que de eso depende el grado de degradación que presenten, (Yesiller *et al.*, 2014).

La C2VG tuvo casi cuatro veces más cantidad de RSU depositados que la CSVG, no obstante, la generación de CH_4 por Mg de RSU fue menor, lo que puede atribuirse a la edad de los RSU (Yesiller *et al.* 2014). El periodo de disposición en la CSVG fue de 2010-2011 y la C1VG y C2VG 2012-2015. Si se piensa en el aprovechamiento futuro de CH_4 se debe construir el sitio con un diseño en el que se considere la captación de biogás. Respecto a la diferencia de temporadas (estiaje-lluvias), la caracterización de los RSU y las condiciones de operación no hacen una diferencia mayor de 12 m^3CH_4 /Mg RSU entre celda y celda. La simulación de la generación de CH_4 en TV

ayudó a apreciar la necesidad de llevar la operación conforme a normatividad, ya que la generación de TV no dista mucho de las celdas en operación de los sitios de VG y ZIN, sin embargo el biogás no es conducido por pozos de venteo para ser quemado y así evitar contribuir más con la emisión de GEI, y/o conducirlo para considerar su posible aprovechamiento energético.

Tabla 3. 23 Estimación de la generación de CH₄ con MMB

SITIO	CELDA	MEGAGRAMOS (Mg) DE RSU ACUMULADOS	METROS CÚBICOS / 30 AÑOS (m ³ /30a)	GIGAGRAMOS DE CO ₂ EQUIVALENTE / 30 AÑOS (GgCO ₂ e/30a)	METROS CÚBICOS DE METANO POR MEGAGRAMO DE RSU (m ³ CH ₄ /Mg RSU)
ZIN	CSZ ^a	545,500	130,250,876	893,148	239
	C1Z ^a	250,000	15,545,050	136,965	62
	C2Z ^b	290,000	12,196,410	137,466	42
	C3Z	492,750	28,353,634	302,691	58
	C4Z	209,658	32,062,593	318,181	43
VG	CSVG	37,509	2,256,632	16,965	60
	C1VG	296,100	18,158,750	136,517	61
	C2VG	120,000	6,004,145	52,418	50
TV	CA	317,100	14,967,080	1,925	47

^aMASERA, 2007; ^bDelgado, 2013

La estimación de la generación de CH₄ total del sitio de ZIN es de 88.8 y en VG de 57 m³CH₄/TRSU, con lo que se proyecta un mayor aprovechamiento que en VG. Esto puede atribuirse a que conforme a la caracterización de los RSU, ZIN presentó 25.84% de residuos orgánicos de muy rápida degradación y de rápida degradación (6.82%), mientras que los residuos orgánicos de VG de degradación muy rápida sumaron 17.53%.

En el caso TV se proyecta una generación de CH_4 en 30 años de $47 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{TRSU}$. Con estos datos se puede decir que los sitios de VG y TV pueden calificarse como jóvenes, a diferencia de ZIN donde la cantidad estimada es mayor y el tiempo de disposición supera los 20 años. Las proyecciones de generación de CH_4 para los RESA de ZIN, VG y TV se muestran en las figuras 3.18 y 3.19 y 3.20 respectivamente. Los resultados arrojados por el MMB se muestran en m^3/h y se proyectaron a 30 años.

La CSZ es la única que presentan un pico de generación y recuperación mayor a 1200 miles $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{a}$. La CSVG se puede considerar la menos eficiente en cuanto a generación de CH_4 , si se piensa en un aprovechamiento del mismo. Las demás celdas, C1VG, C1Z, C2Z y C3Z y TCA, en promedio proyectan una generación-recuperación promedio de 1150 miles $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{a}$ a excepción de la C4Z que supera los 10,000 miles $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{a}$.

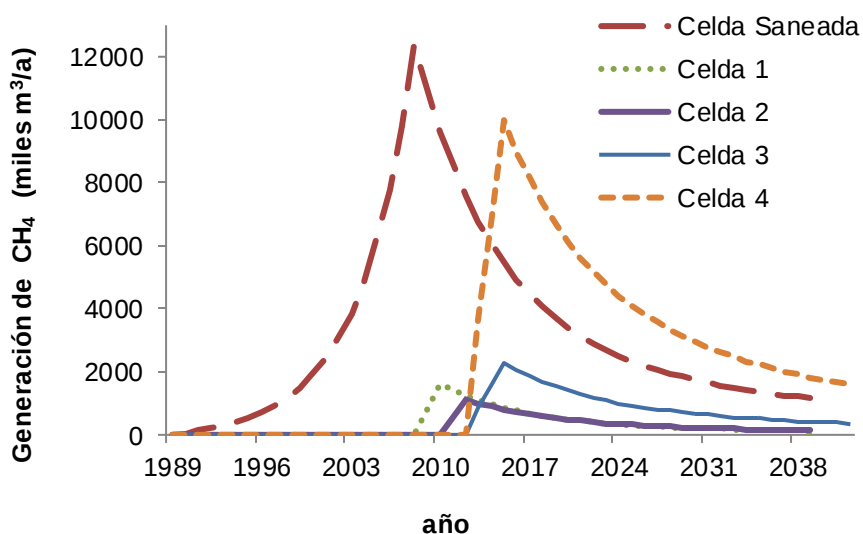


Figura 3.18 Proyecciones de Generación y Recuperación de Biogás de ZIN

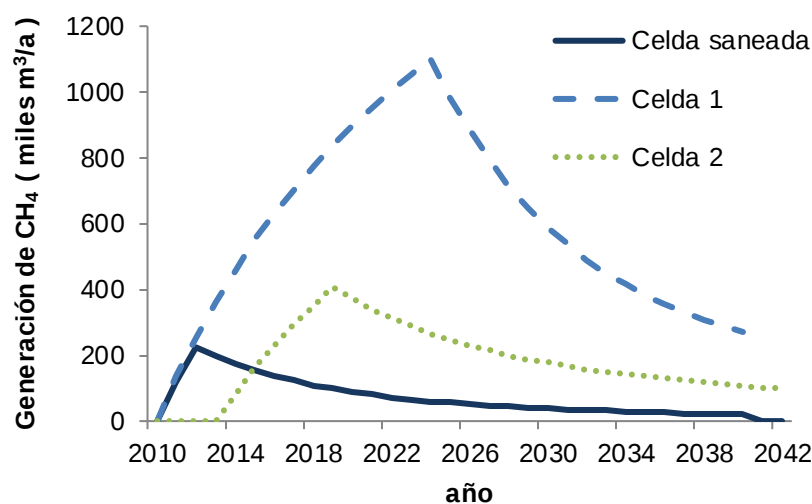


Figura 3.19 Proyecciones de Generación y Recuperación de Biogás de VG

La diferencia de generación de CH₄ entre la temporada de estiaje y lluvias para ambos sitios (VG y ZIN) es mínima. Se observa que en temporada de lluvia se puede llegar más rápido a la máxima generación, sin embargo esta aceleración no excede los tres años.

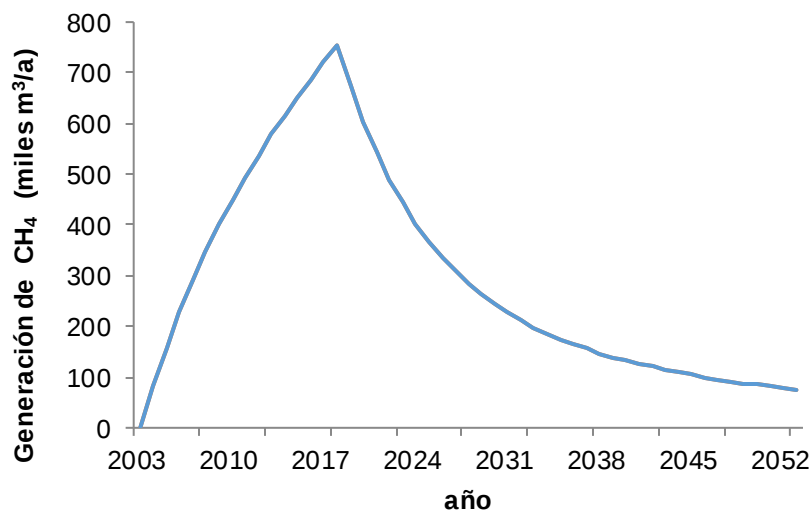


Figura 3.20 Proyecciones de Generación y Recuperación de Biogás de TV

3.6.2 Estimación de la generación de CH₄ con MODUELO v 4.

La estimación de la generación de CH₄ se realizó primero para la C4Z y posteriormente para la C1VG. No se realizó para TV debido a la falta de información sobre el diseño del sitio y su operación. Para la construcción del *modelo de terreno*, se utilizó el plano del sitio con un fichero .dxf que contiene las curvas de nivel (Figura 3.21), dicho plano se discretiza y se forma el terreno. Sobre ese terreno se va dando forma a la celda llenándola como fue el llenado con los RSU.

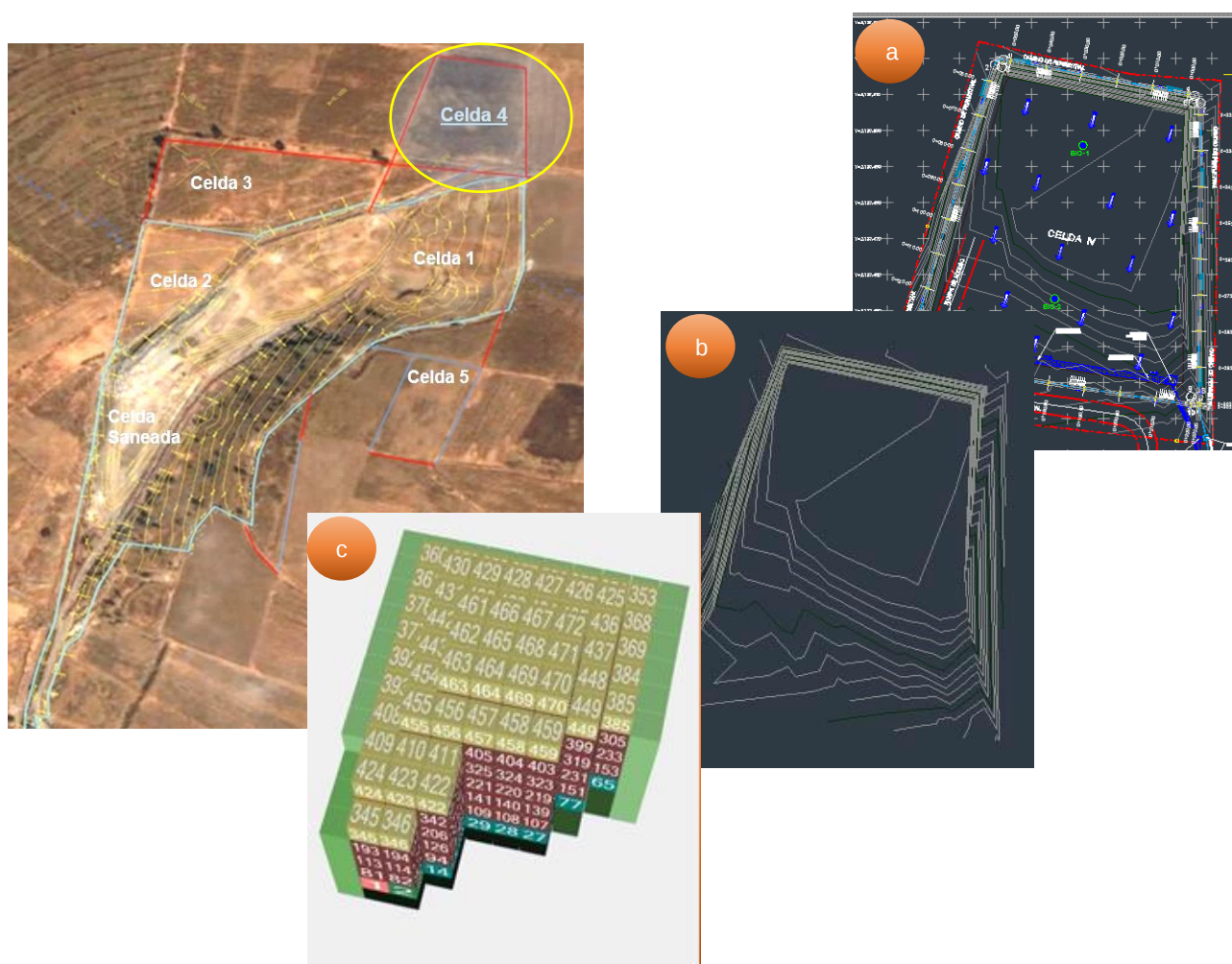


Figura 3. 21 a) Plano de la C4Z en autocad, b) Curvas de nivel y c) Orden de llenado de RSU

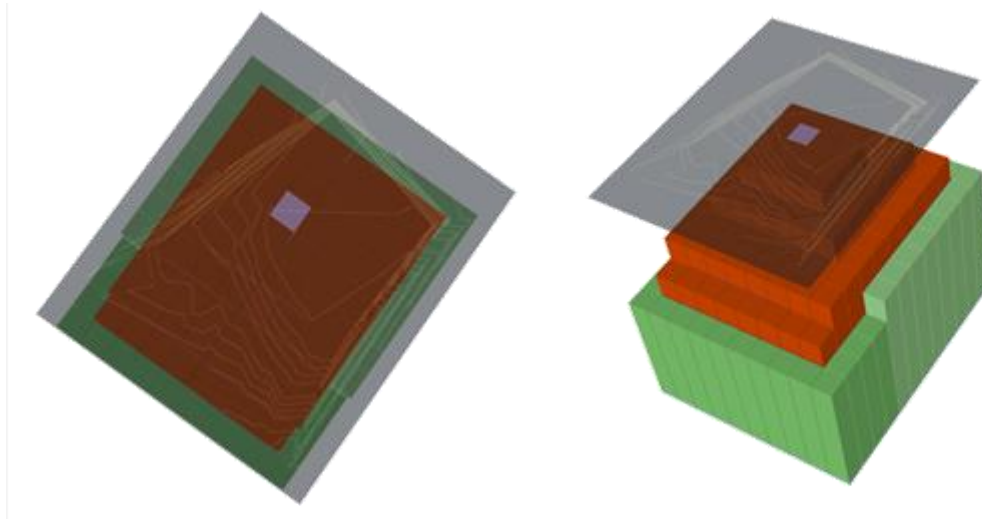
Las pequeñas celdas de 10x10m que forman la celda C4Z se van acomodando, (Figura 3.22), previa definición dependiendo el tipo de capa que van a formar:

- a) Capa base, material que conforma la base de la C4Z
- b) Capa de residuos, características de los residuos despositados
- c) Capa de cobertura, material de cobertura final

Una vez formada la celda y ajustados el volumen y peso de los RSU, se introduce la información en el *Modelo de degradación* de residuos que se complementa con la caracterización en campo y propiedades químicas de los RSU. Después de contruidos los *Modelos del terreno y de degradación*, se introduce la información para el modelo hidráulico, esta información consta de datos climatológicos en un fichero metereológico de la zona en donde está ubicado el sitio (precipitación pluvial diaria y horaria, temperatura horaria, velocidad del viento, humedad relativa, etc) y de datos del diseño de la celda, es decir, escorrentías, drenes, canales, y cárcamos de almacenamiento. Como no se contó con los datos de campo (Conductividad hidraulica vertical y horizontal, tasa de infiltración mínima y máxima, profundidad de evaporación, acumulación en la superficie, etc) se recabó información basada en estudios realizados por Cuartas (2012) y Lobo (2003).

Todos los valores son semejantes en los tres tipos de celdas, lo único que varía es la conductividad hidráulica vertical y horizontal de acuerdo al tipo de capa que conforma la celda, siendo mayor ambas en las celdas definidas como capa base por la necesidad de captar los lixiviados en los cárcamos, (Tabla 3.24). Para los escenarios con recirculación, se consideró 10 años de recirculación con un volumen de 20 m³/m. La tabla 3.24 concentra los datos para la calibración del *Modelo de degradación* de los RSU que se disponen en el sitio. Estos valores juegan un papel muy importante en la degradación de los RSU y por consiguiente en la generación de CH₄ que haya en el sitio y la cantidad de DQO en los lixiviados. Se realizaron diversas simulaciones

variando algunos de los valores del *Modelo hidrológico* para observar el comportamiento del CH_4 y DQO.



Plano de curvas de nivel en autocad sobre el modelo de la celda C4Z

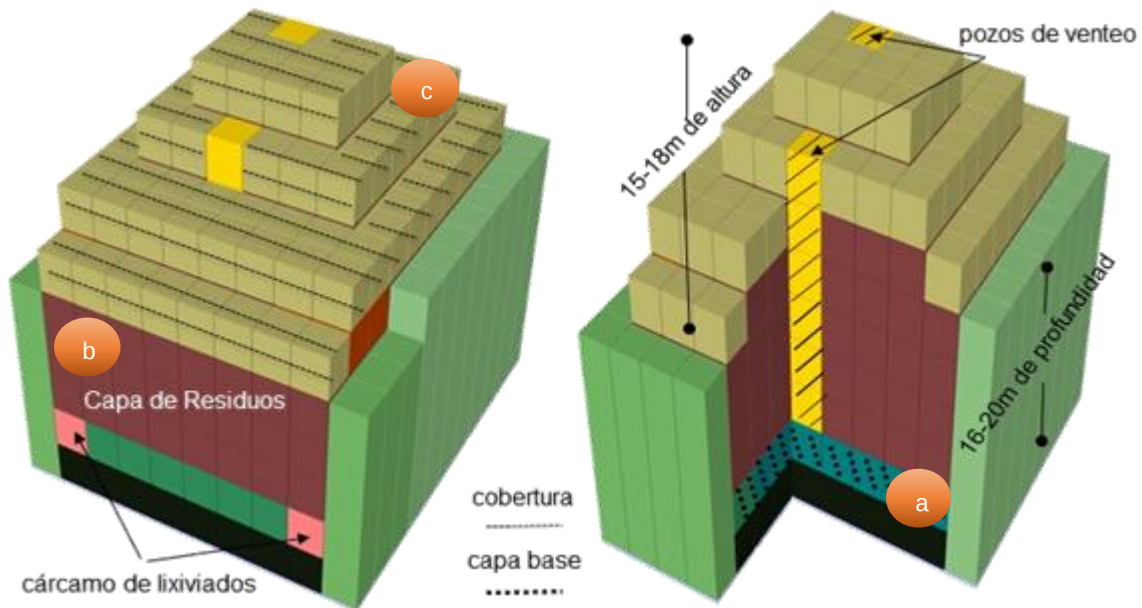


Figura 3. 22 Vista interna y dimensiones de la celda (C4Z) con MODUELO v 4, a) Capa base, b) Capa de residuos y c) Capa de cobertura.

MODUELO utiliza la composición y características fisicoquímicas de los RSU agrupados en 12; en México, los RSU se clasifican en 26 subproductos según la normatividad (SEMARNAT-a, 2016) y para fines del presente estudio se agrupó como lo maneja MODUELO y se identifican enumerados según su rapidez de degradación.

Tabla 3. 24 Parámetros de simulación en los tres escenarios con y sin recirculación

ESCENARIOS	MANEJO DE LIXIVIADOS	MODELO HIDROLÓGICO		MODELO DE DEGRADACIÓN*	
Celda sin recirculación	La construcción de la C4Z fue como una celda convencional (capa base, capa de residuos y capa de cobertura, figura 3.22). Sin extracción de lixiviados.	TIMIN*	1	HRI	14
		TIMAX*	40	CC	20
		PE*	0.15	HIS	34.39
		MAS*	0.01	CHV*	1.0E-06
				CHH*	2.0E-05
Celda con recirculación en pozos	Extracción de lixiviados sólo para recirculación. La capa de residuos varió por los pozos de venteo en donde se recircularía el lixiviado. Capa de cobertura como una celda convencional	TIMIN*	1	HRI	14
		TIMAX*	40	CC	27
		PE*	0.15	HIS	34
		MAS*	0.01	CHV*	1.0E-06
				CHH*	2.0E-05
Celda con recirculación en superficie	Extracción de lixiviados para recirculación. La capa de cobertura varió por la recirculación del lixiviado. Capa de residuos como una celda convencional	TIMIN*	1	HRI	14
		TIMAX*	40	CC	27
		PE*	0.15	HIS	34
		MAS*	0.02	CHV*	1.0E-06
				CHH*	2.0E-06

HRI: Humedad residual inicial, CC: Capacidad de campo, HSI: Humedad inicial, CHV: Conductividad hidráulica vertical, CHH: Capacidad hidráulica horizontal. TIMIN: Tasa de infiltración mínima, TIMAX: tasa de infiltración máxima, PE: Profundidad de evaporación, MAS: Máx. Acumulación en la superficie.

Fuente: * Cuartas, 2012, Jain, 2014, Lobo, 2003; Tchobanoglous *et al.* 1994.

La figura 3.23 muestra el efecto que se tienen en la generación de CH₄ de acuerdo al tipo de operación probada para ZIN. En el sitio se ha recirculado tres veces a partir de la clausura de la celda y partiendo de eso, se ha simulado la recirculación con 20 m³/mes por 25 años, volumen que la empresa considera adecuado de acuerdo a sus

capacidades. Como puede apreciarse, el máximo volumen de CH_4 es 52,920 m^3/a y se obtiene cuando se recircula en superficie. Cuando la recirculación es en pozos se generan 45,335 m^3/a . Aunque esta diferencia es mínima, en ambos casos, la recirculación aumenta la biomasa e incrementa la humedad, con lo que la generación de CH_4 se incrementa hasta un 14%. Lo anterior es conveniente conocerlo cuando una empresa tiene planes de recolectar el CH_4 generado para su aprovechamiento energético. Cuando un RESA opera como un sitio convencional se estima una generación de CH_4 de 25,547 m^3/a , 2.07 veces menos que si se recircula lixiviados.

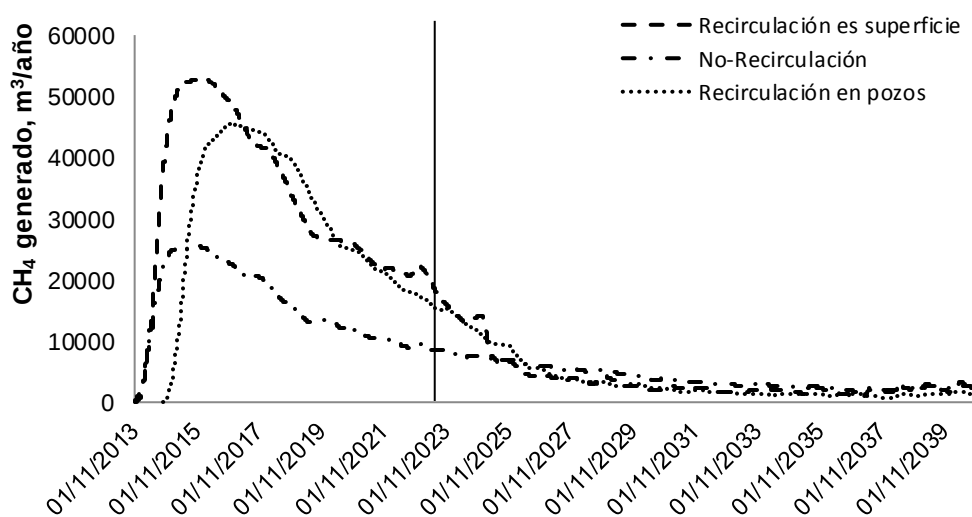


Figura 3. 23 Generación de CH_4 con recirculación y sin recirculación de lixiviados en ZIN

En las simulaciones realizadas con MODUELO se detectó que los principales factores que han influido en la generación de CH_4 han sido la distribución de la humedad y la conductividad hidráulica. La biodegradación ocurre de acuerdo a la cantidad de humedad que van recibiendo los RSU con la recirculación y los factores de hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis que se consideran en la simulación, (Figura 3.24 y Figura D.1), (Xing *et al.*, 2013). Aunado a lo anterior, el flujo del gas hacia el pozo es

por los canales preferenciales que se dan de acuerdo a la capacidad de campo que se tiene en la celda. Por lo tanto, se observó que en algunos pozos la emisión de CH₄ es menor al 5 %v/v, lo que permite sospechar que existe taponeamientos.

Lo que sucede en el sitio de estudio es que la dispersión de humedad sólo se da en la superficie y lo que se humedece corresponde a lo que se percoló (Carpenter *et al.*, 2013; Reddy *et al.*, 2014). Debido a que, con recirculación horizontal se puede incrementar hasta un 42% la generación de CH₄ en 27 años (2013-2040) posiblemente porque la infiltración es más homogénea, si se considera la instalación de los ductos al momento de la operación, la distribución de humedad sería más homogénea y se daría a diferentes alturas lo cual, ayudaría a una mayor generación de CH₄. Una ventaja de la recirculación en superficie es que se tiene menos lixiviados generados, además, se forman canales preferenciales en la misma masa de RSU lo que puede ayudar en determinado momento a que no fluyan los lixiviados o que drenen a la base para ser captados en la fosa (Komilis & Athiniotou, 2014).

Con base a los resultados de la simulación, se observó que mediante la recirculación vertical en pozos, la distribución de la humedad se da a un radio de no más de 10, lo cual se muestra en la figura 3.24, esto sucede, ya que preferentemente se da la distribución de humedad en la parte inferior de la celda sin tener un efecto representativo en la masa total de los RSU (Jain *et al.*, 2014; Feng *et al.*, 2015). Bareither *et al.*, (2010) mencionan que el contenido de humedad incrementa progresivamente entre cuatro y diez metros de profundidad. Se observó que después de 10 años de recirculación la celda se va saturando, lo que es una de las causas de que la generación de CH₄ sea 11% menor que en superficie pero, 31% mayor que sin recirculación. Sin recirculación los RESA pueden almacenar por largos periodos los RSU y con ello una cantidad masiva de contaminantes, que a futuro pueden ser fugados al ambiente (Xing *et al.*, 2014), es por ello que aunado al aprovechamiento energético que se le puede dar al CH₄, en países como México se debe pensar en

acortar la vida de las celdas en los RESA, para minarlas y volver a utilizarlas lo antes posible (Masi *et al.*, 2014). En el caso en que no se aplica recirculación, es decir, que se opere como un RESA convencional, la cantidad de CH_4 generado es 18% menor que la recirculación en pozos.

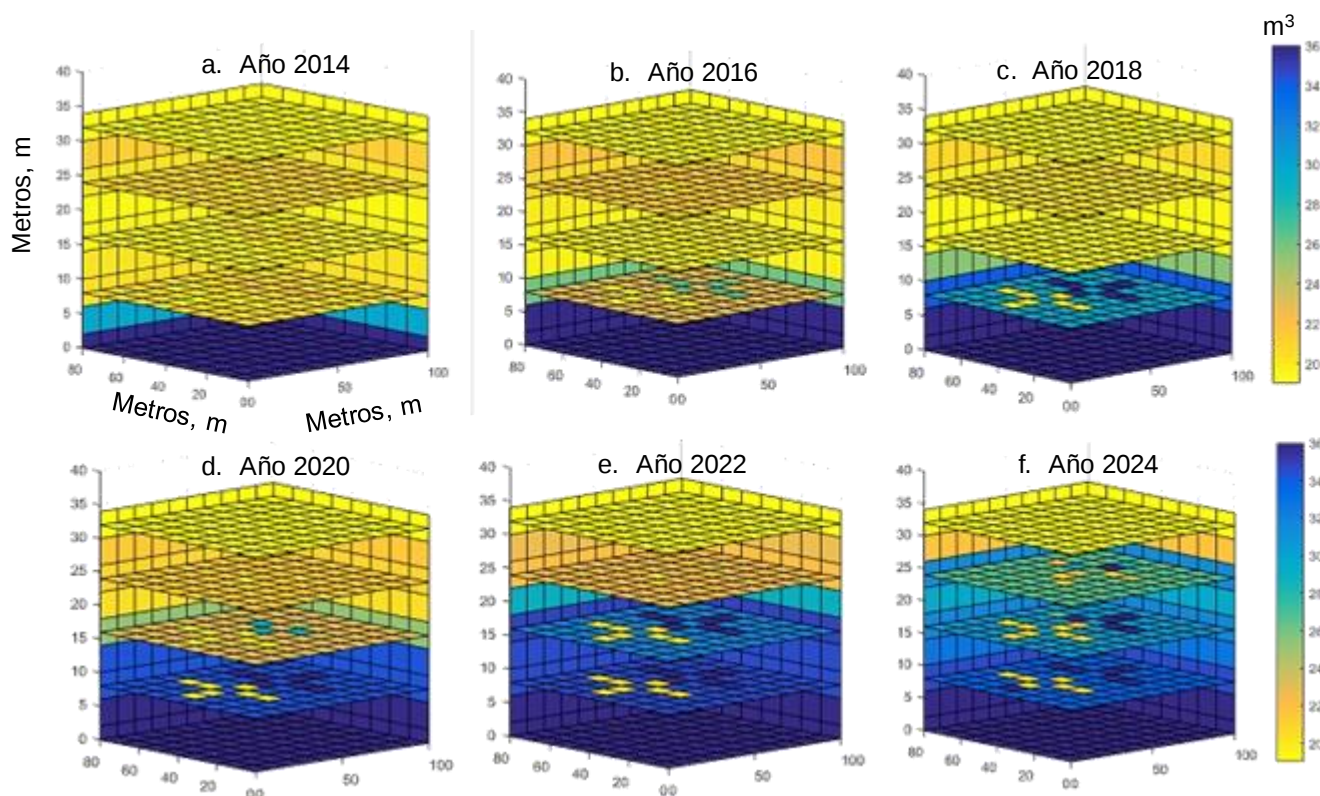


Figura 3. 24 Distribución de la humedad en la C4Z en 10 años de recirculación en pozos 2014-2024

La recirculación en pozos tiene como desventaja que puede darse una saturación poniéndose en riesgo la estabilización de la celda. Sin embargo la concentración es prácticamente la misma para ambos casos de recirculación, 24,829 y 24,926 mgO_2/L respectivamente. El volumen total de lixiviados recolectados hasta el final de la recirculación en pozos es 33,874 m^3 .

La DQO que se obtiene con el MODUELO es más alta a la medida *in situ*, los valores alcanzados con la simulación llegan a los 25,000 mgO₂/L a diferencia de la mayoría de las lecturas que están por debajo de los 10,000 mgO₂/L, con excepción de la época de lluvias 2013 (43,283 mgO₂/L) y estiaje 2014 que (20,475 mgO₂/L). Estas variaciones pueden atribuirse a la mezcla de RSU que existe en las celdas, es decir, la disposición de los RSU se realiza de acuerdo a la operatividad, aspecto que no se considera en el momento de la simulación con MODUELO.

Sin duda la humedad es un factor determinante en la generación de CH₄, la etapa de hidrólisis empieza con la propia humedad de los RSU y se estimula aún más a las bacterias con la humedad adicional que se aporta con el lixiviado (Benson *et al.*, 2006; Camargo&Vélez, 2009). Según Hubert *et al.*, (2016) y Masi *et al.*, (2014), el comportamiento que se tiene en la matriz de RSU en un RESA es que, a mayor profundidad, la humedad disminuye y eso se ve influenciado por la colocación de una capa intermedia. Por ejemplo, entre mayor sea la profundidad la humedad irá disminuyendo, y se alcanzaría un máximo de contenido de agua entre los 15 y 18 m de profundidad y disminuye antes de los 20 m de profundidad (Feng *et al.*, 2014). Sin embargo para el caso del sitio en estudio, donde la capa intermedia es cada 7 m se tuvo el comportamiento ascendente. La profundidad, la capacidad de campo y el tiempo juegan también un papel muy importante en la degradación de los RSU y por consiguiente en la generación de CH₄ en el sitio y la cantidad de DQO en los lixiviados.

Cuando se recircula en pozos la humedad total en la celda alcanza un 66 % de saturación y cuando se recircula en superficie es 57 % (Figura 3.25). Sin embargo, el contenido de humedad varía con la distancia del punto de dispersión o inyección, (Barlaz *et al.*, 2010). Si ZIN no recirculara y sólo extrae los lixiviados, el contenido de humedad se mantiene en promedio en 24,313 m³, es decir 44 % de saturación de la celda. La humedad total en la celda es menor cuando se recircula en superficie. Se debe considerar con cuidado la tasa y frecuencia de recirculación cuando es

temporada de lluvias ya que la estabilidad de la celda es un punto importante que se debe considerar.

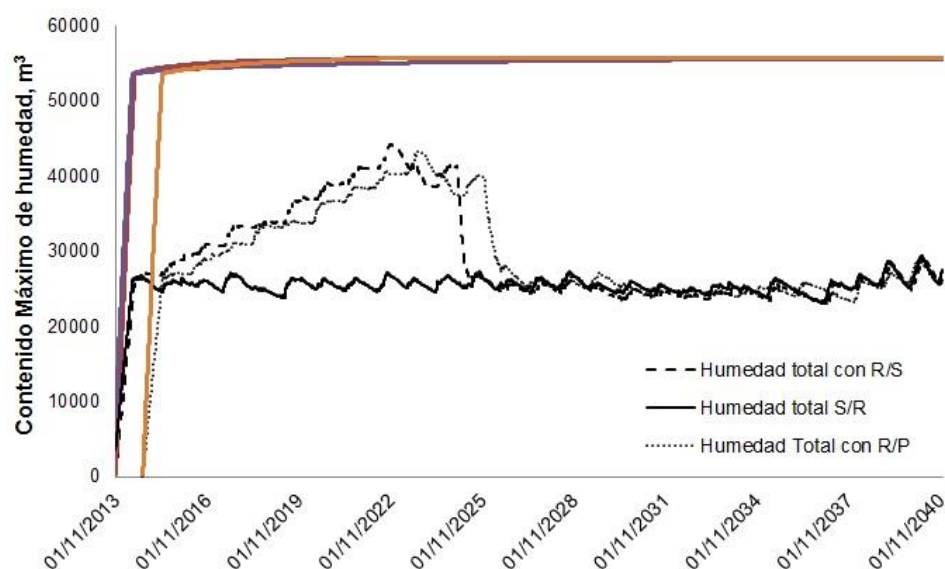


Figura 3. 25 Máximo contenido de humedad en la C4Z

La simulación de la celda CS y C1 de VG se realizó alimentando de la misma manera los cuatro modelos que componen MODUELO. El modelo del terreno se trabajó subiendo el plano del terreno en autocad en la base de datos de MODUELO. Sobre ese terreno se dió forma a la celda conforme al llenado y a su capacidad. Una vez formada la celda y ajustados el volumen y peso con los RSU ahí depositados se observa la celda finalizada como se ve en la figura 3.26. Con esta celda se calibró el modelo de degradación de residuos y de almacenamiento de lixiviados. El sitio de VG lleva una operación semejante a ZIN y es por eso que los parámetros con los que se calibró el programa para la simulación son los mismos utilizados para ZIN, éstos se concentran en la tabla 3.24.

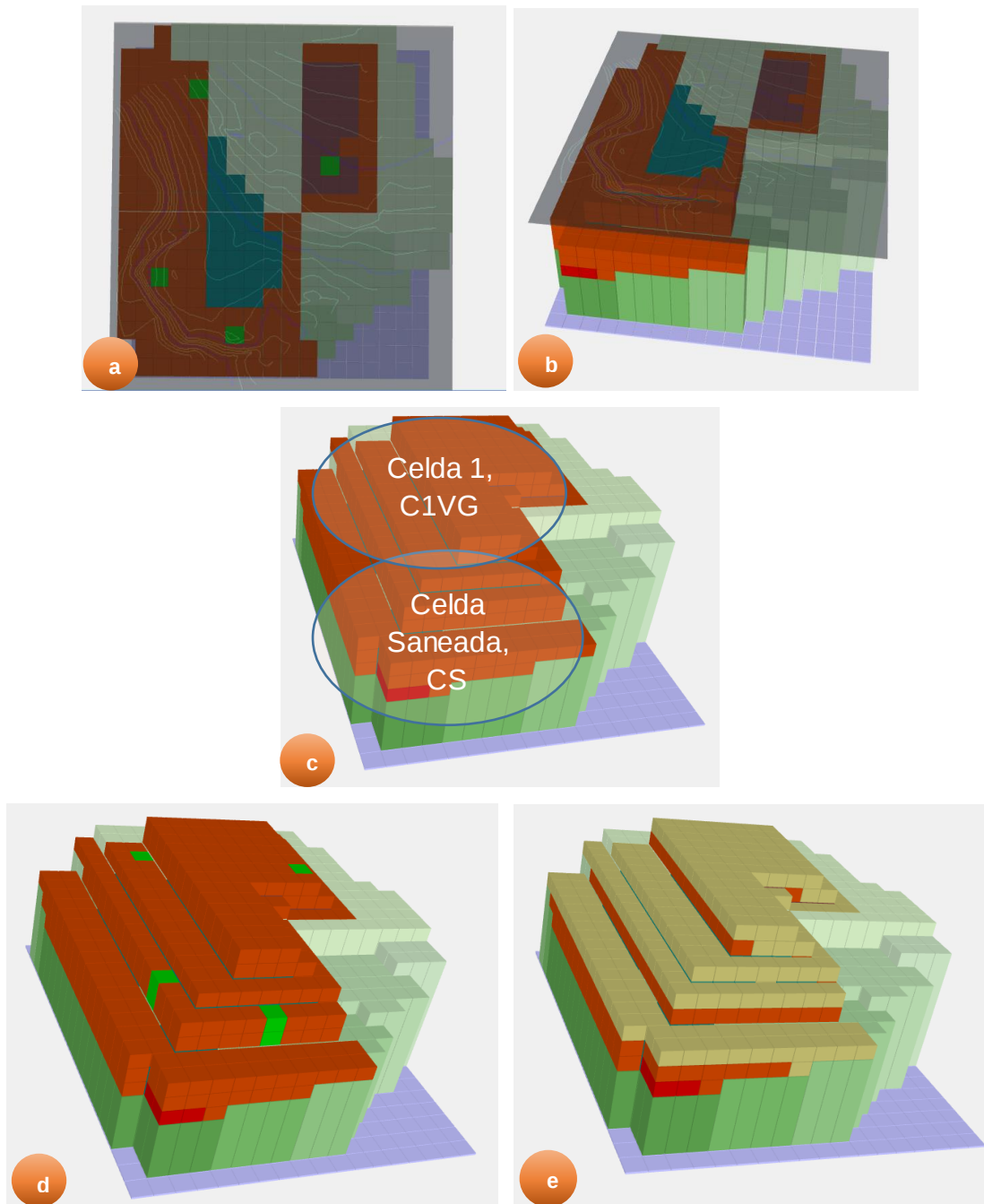
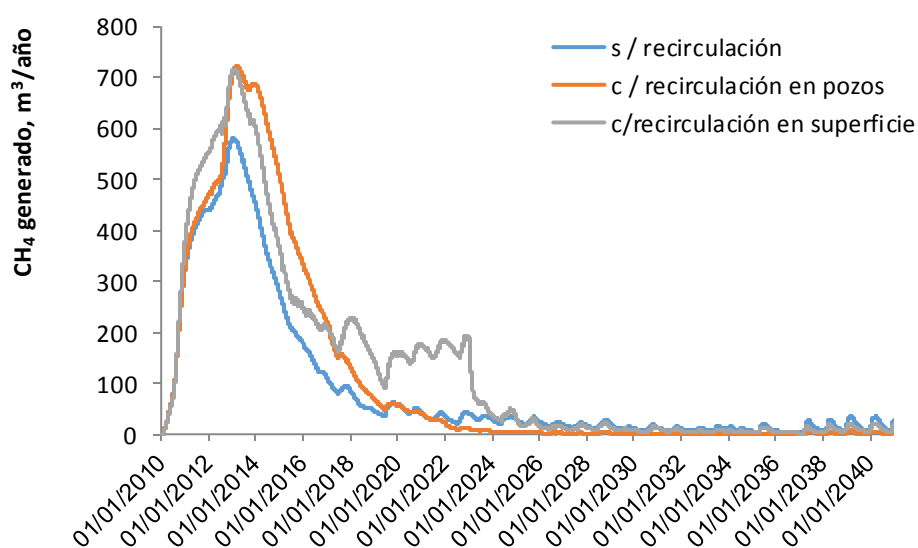


Figura 3. 26 Imágenes de modelo de la CS y C1 de VG con MODUELO v.4

- a) Vista de planta del plano de curvas de nivel sobre el modelo de VG, b) Vista isométrica de planta del plano de curvas de nivel sobre el modelo de VG Vista de la CS y C1, d) Recirculación en pozos de venteo (izquierda) y e) recirculación en superficie de las celdas (derecha).

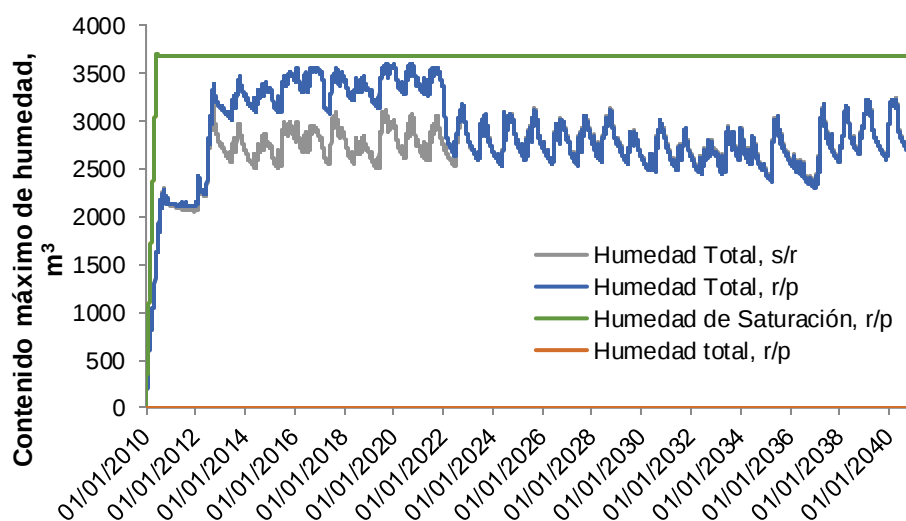
La Figura 3.27 muestra el efecto que tuvo en la generación de CH_4 de acuerdo al tipo de operación probada para VG. En el sitio se han recirculado varias veces las celdas y partiendo de eso, se ha simulado la recirculación con $20 \text{ m}^3/\text{mes}$ por 25 años, volumen que la empresa considera adecuado de acuerdo a sus capacidades. El máximo volumen de CH_4 es $737.235 \text{ m}^3/\text{a}$. La diferencia es mínima para la recirculación en pozos y en superficie, casi imperceptible. Sin embargo, la recirculación aumenta la biomasa e incrementa la humedad ayudando con esto en la aceleración en la generación de CH_4 así como en la estabilización de la celda. Cuando se recircula en la celda la humedad máxima y mínima de saturación fue de 85 % y 42% respectivamente y en promedio de 63.5% de saturación, (Figura 3.28).



* s: sin, c: con

Figura 3. 27 Generación de CH_4 con recirculación y sin recirculación de lixiviados en VG

En la tabla 3.25 se concentran los valores de humedad y generación de CH_4 de diversos autores con el fin de poner en contexto la relación que tiene la humedad en la generación de CH_4 .



*s/r: sin recirculación, r/p: recirculación en pozos.

Figura 3. 28 Máximo contenido de humedad en la celda C4Z

Bereinther *et al.*, (2010) observaron que presentando humedades de 20-30%Hbh los resultados no son los esperados ya que si el porcentaje de humedad estuviera cerca de la capacidad de campo (aprox. 50%), la metanización en la matriz de RSU alcanzaría un rendimiento de 3 a 4 veces más. Para este estudio, la capacidad de campo en MODUELO fue un parámetro definido por el usuario y el que se utilizó fue menor (27%) que el porcentaje de humedad (34%Hbh) al igual que lo reportado por Olay (2014), si este valor hubiera sido más alto, la generación de CH₄ que se registró pudiera haber sido mayor.

Tabla 3. 25 Comparación de humedades y generación de CH₄

Recirculación	Capacidad de Campo (CC, % p/p)	Humedad de RSU, (Hbh, %)	Metano (CH ₄)	Autor
20 m ³ /mes	27	29.5	0.13 m ³ /a kg RSU	C4Z, este trabajo
40 %V/semana 223 días	0.0013 m ³ /kg 130	26.38	0.023 m ³ /kgSVT	Hernández, 2015
NR	0.6	54	-	Komilis, 2014
NR	NR	14-40	500-170,000t/a ⁷	Cárdenas-Moreno, 2014
40 %V/semana 262 días	0.0008 m ³ /kg 80	23.5	0.007 m ³ /kgSVT	Olay, 2014
60 %V/2 veces por semana	65	37.34	0.025 m ³ /kgRSU	Hernández-Berriel, 2014
6758 m ³ /mes, 250 días 4092m ³ /mes, después de 250 días	40	28-48	0.025 m ³ /kg	Jain, 2014
-	-	25.29	-	Delgado, 2013
-	NR	32.48	0.294 m ³ /kg SVT	Xing, 2013
-	45	20	NR	Bareither, 2010
Agua potable inicial lixiviados 40%/dos veces por semana 201 días	NR	40	0.031 m ³ /kgSVT	Hernández-Berriel, 2010
0.240m ³ /mes 0.062 m ³ /mes	48.4- 50	20-30	0.085 Nm ³ /kg 0.040 Nm ³ /kg	Benbelkacem, 2010
NR	NR	10-40, promedio 30	50-75%	Alghni, 2010
3.3. m ³ /m-mes	37.5	25	50%	Zhao, 2008
NR	45	15-45	NR	Benson,2002

NR: No Reportado

⁷ Estimación de la generación de CH₄ en 83 SDF del Estado de México

3.6.3 Análisis comparativo de las simulaciones

Los cálculos con ambos modelos tuvieron como objetivo comparar la información obtenida de los dos SDF (ZIN y VG). Como se puede observar en las figuras 3.29 y 3.30, con MODUELO se obtuvo más del doble de generación en un año que con el MMB. Sin embargo, el mínimo lo alcanzaron los dos modelos hasta 35 años después. En el caso de VG, el MODUELO también se predijo una mayor generación de biogás alcanzando el mínimo más rápido que el MMB, asumiendo también que se agota la fracción orgánica de los RSU en menor tiempo, después de alcanzar el mínimo se observa que la generación de biogás tiende a cero.

El MMB es un modelo que ayuda a estimar la generación y recuperación del biogás en un RESA, sin embargo existen variaciones con respecto al MODUELO que hacen que el MMB pierda precisión en la proyección de generación de CH_4 contra el MODUELO. Algunas de estas variaciones son que, éste último contempla en los datos de alimentación un fichero meteorológico que contiene información más precisa sobre la zona en la que se encuentra el sitio (precipitaciónn horarias, viento, horas sol, entre otras). Por el contrario el MMB asigna automáticamente los valores de k basándose en la información de clima y caracterización de residuos. Los valores de k varían dependiendo del clima y el grupo de residuos. El clima se distribuye en cinco regiones basándose en la precipitación anual promedio y la temperatura así, cada Entidad Federativa está asignada a una de las cinco regiones y el usuario introduce únicamente el Estado en el que está el sitio. El MMB no contempla la parte hidrológico como lo hace MODUELO, éste modelo aporta información valiosa sobre la humedad de los RSU, parámetro que influye de manera sustancial en la degradación de los RSU y por consiguiente en la generación de biogás

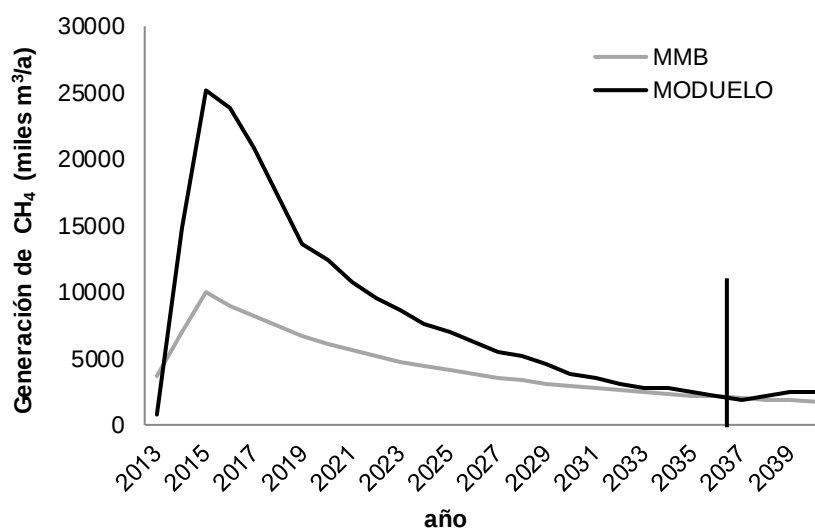


Figura 3. 29 Proyección de generación de CH₄ con MMB y MODUELO en ZIN

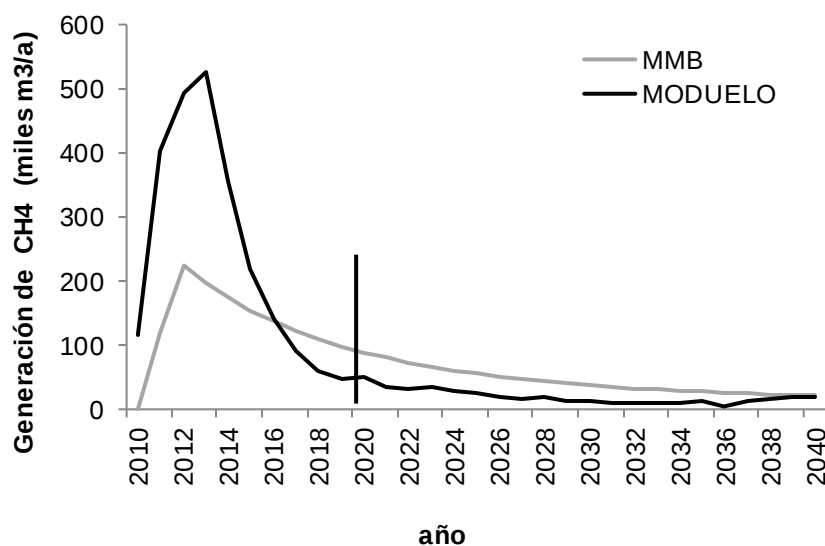


Figura 3. 30 Proyección de generación de CH₄ con MMB y MODUELO en VG

Con los resultados obtenidos se puede decir que en el caso puntual de este estudio, MODUELO a diferencia del MMB, utiliza información más detallada de los SDF para la estimación de generación de CH₄, lo que provoca menor incertidumbre en las estimaciones.

3.7 DIAGNÓSTICO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS

El estudio de generación de CH₄ en SDF comprendió tres tipos de sitios, ZIN (RESA) que busca día a día cumplir con los lineamientos de la normatividad, VG (SC) que tiene diversas áreas de oportunidad para alcanzar la categoría de RESA, y TV (TCA) que en el momento que se realizó el estudio, lo operaba el municipio siendo un tiradero, posteriormente cerró sin embargo, se seguía tirando clandestinamente. Actualmente una empresa comenzó con el saneamiento del sitio.

Las zonas en las que están ubicados los tres sitios tienen en promedio anual la misma precipitación pluvial, sin embargo, las actividades económicas de los tres sitios son diferentes, ZIN está ubicado cerca de una zona industrial, VG es un municipio fluoricultor y TV basa su economía en el pequeño comercio, sin embargo, la diferencia de composición de los RSU es mínima y puede deberse a la gran variedad de municipios que disponen. Debido a que los sitios se vuelven de alguna forma intermunicipales, para futuros estudios se debe tomar en cuenta que la composición de los RSU está basada en la actividad económica de la comunidad donde esté ubicado el sitio y de las demás comunidades que también disponen ahí sus RSU.

Diversos estudios han confirmado que la composición es una variable que determina la cantidad de generación del CH₄, sin embargo, en el caso particular del presente estudio, se detectó como variable de peso el tipo de operación que se da en cada sitio, es decir: la compactación, las capas de cobertura, la captación de lixiviados y la recirculación de los mimos. Respecto a esta última, el contenido de humedad marcó la diferencia en la cantidad de generación de CH₄ entre los dos SDF que se analizaron (ZIN y VG). Las diferencias que existen en cada sitio demuestra la necesidad de llevar a cabo la operación de un SDF bajo los lineamientos de la normatividad vigente para evitar mayores emisiones de GEI a la atmósfera.

Precipitación pluvial, promedio anual (mm)

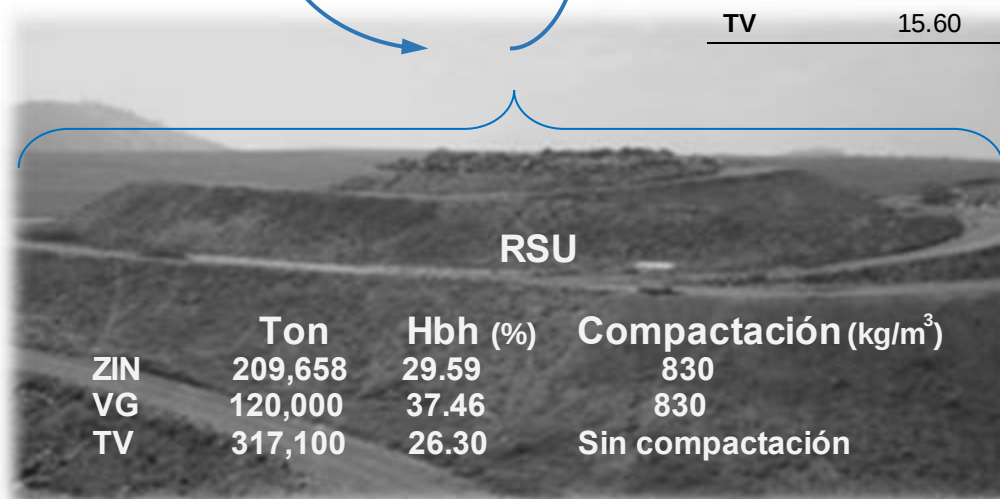
ZIN: 800 – 1500

VG: 1000 - 1500

TV: 1205.5

CONCENTRACIÓN DE CH₄ y ESTIMACIÓN CON MODELOS

Sitio	Campo* %v/v	MMB m ³ CH ₄ /a	MODUELO m ³ CH ₄ /a
ZIN	59.25	1,068,753	25,545
VG	53.75	200138	737.24
TV	15.60	498,902	-



	DQO Campo* (mg O ₂ /L)	MMB	MODUELO, (mg O ₂ /L)
ZIN, fosa 1	4,300	11,983	-
ZIN, fosa 2	43,283	20,475	-
VG, fosa 1	1,672	7,567	-
VG, LFrescos	11,369	9,583	-
TV	15,980	16,567	-

Figura 3. 31 Variables de entrada y Salida en el diagnóstico de la generación de CH₄ en los SDF

CONCLUSIONES

Las diferencias en las composiciones de RSU detectadas entre las celdas, son muestra de la variación que puede haber en un mismo sitio, entre sitios de la misma zona geográfica del país y entre diferentes temporadas del año (estiaje y lluvias), denotando la importancia de realizar caracterizaciones periódicas en cada celda, con el fin de obtener información precisa con menor incertidumbre posible.

Las mediciones de CH₄ de los pozos de venteo en los tres sitios de disposición muestran que las fases de degradación dependen de la zona en las que están localizados los pozos en cada celda y a su vez demuestran que existe variabilidad en las condiciones de operación aun en un mismo sitio.

Las emisiones detectadas en superficie varían también entre zonas de cada celda y se confirma que en el caso de existir una grieta, las emisiones de CH₄ en ésta puede exceder hasta el 30%v/v.

Las mediciones de biogás realizadas en campo permiten validar los estudios sobre este tipo de emisiones y contribuir con datos sobre la generación de CH₄ en México, al mismo tiempo, representa un parámetro importante para dimensionar la contribución a los GEI.

La generación de CH₄ por Mg de RSU es tres veces mayor en el sitio de ZIN que en VG, lo que puede atribuirse en promedio a que los RSU se encuentran en una etapa de mayor madurez en ZIN. Ambos sitios muestran viabilidad de aprovechamiento de CH₄, ya que el MMB estima una recuperación mayor al 65% y este valor varía de acuerdo a la cobertura que se le da a los RSU.

Los escenarios probados muestran que al realizar la recirculación en superficie, el área y volumen de RSU en los que se esparcen los lixiviados es mayor y por consiguiente es mayor el CH_4 generado. Cuando se realiza en pozos la recirculación debe ser supervisada ya que la saturación en el fondo desestabilizaría la celda.

La empresa que opera ZIN y VG recircula de acuerdo a sus capacidades, tomando en consideración las áreas de oportunidad, se podría optimizar su operación y en un futuro aprovechar energéticamente el CH_4 no sin antes, realizar un estudio previo de costo-beneficio.

Los resultados de las simulaciones con MODULO son de ayuda para los responsables de la operación de un sitio y una alternativa que deben estudiar a fondo al realizar recirculación, ya que se ha observado que existe un cambio significativo en el aumento de la generación de CH_4 .

RECOMENDACIONES

Se recomienda que la etapa inicial de la gestión de RSU se lleve a cabo de manera responsable, es decir, que desde el punto de generación los RSU se separen y recuperen todos los reciclables. Esto ayudaría a que la capacidad de los SDF ya existentes y los nuevos por construir se aprovechen al máximo en espacio.

Aunado a lo anterior, se recomienda que en el diseño de un RESA se considere la instalación de ductos por los que se deba recircular lixiviados de manera vertical y horizontal para así garantizar una distribución de la humedad más homogénea a diferentes alturas, esto ayudaría a una mayor generación de CH₄. Es necesario hacer mención que debe considerarse una recirculación de tal modo que el contenido de humedad sea muy cercano a la capacidad de campo de los RSU.

Los RESA pueden almacenar por largos periodos los RSU y con ello una cantidad masiva de contaminantes en los lixiviados, por lo tanto, se recomienda llevar a cabo la recirculación para así evitar en un futuro su fuga al ambiente. La recirculación también ayudaría a aumentar la capacidad de los SDF existentes.

Se recomienda que durante el diseño de un sitio, se considere desde un inicio la captación de CH₄ para facilitar en un futuro el aprovechamiento energético del mismo y así apoyar con las medidas de mitigación del Calentamiento Global.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Semestre Actividad	1er 2013	2º 2013	1er 2014	2º 2014	1er 2015	2º 2015	1er 2016	2º 2016
Estudio del Arte								
Gestión de Municipios								
Evaluación de sitios								
Caracterización de RSU y Lixiviados								
Análisis fisicoquímico de RSU y Lixiviados								
Muestreo de biogás								
Análisis de biogás								
Estimación y proyección de generación de biogás								
Proyección de generación de biogás con dos modelos								
Análisis de resultados								
Presentación de avances								
Participación en eventos y artículos								
Redacción de Tesis								

REFERENCIAS

- AE, E.A., 2010. Guidance on Monitoring landfill gas surface emissions, LFTGN07 v2.
- Aguilar, 2012. Estimación de las constantes k y Lo de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en Baja California, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), pp.43–49.
- Alberto, C., 1971. SISTEMAS , MODELOS Y SIMULACION Ver “ La teoría general de Sistemas ” de Pedro Voltes Bou , Editorial Hispano Europea. , pp.2–20.
- Alexander, Burklin & Singleton, 2005. *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02. User's Guide*, Washington, USA.
- Alghni, R.S., 2010. *METHANE GAS: A RENEWABLE ENERGY SOURCE*. Pennsylvania State University.
- Amaya, L. et al., 2003. *Herramienta Gestión y Biorrecuperación de Suelos Contaminados por Vertederos de RSU*,
- Aminollah, 2012. *Leachate recirculation modeling using vertical Wells in bioreactor landfills*. University of Texas at Arlington in Partial Fulfillment of th Requerements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering.
- Bareither, C.A. et al., 2013. Microbial diversity and dynamics during methane production from municipal solid waste. *Waste Management*, 33(10).
- Bareither, C.A. et al., 2010. Performance of North American Bioreactor Landfills . I: Leachate Hydrology and Waste Settlement. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, pp.824–838.
- Barlaz, M., 1996. Microbiology of solid waste landfills, In: *Microbiology of Solid Waste*. In (Ed) CRC Press, pp. 541–557.
- Barlaz, M.A. et al., 1997. Biodegradative Analysis of Municipal Solid Waste in Laboratory-Scale Landfills, Project Summary. *Research and Development*.
- Barlaz, M.A. et al., 2010. Performance of North American Bioreactor Landfills . II : Chemical and Biological Characteristics. , (August).
- Barlaz, M.A., Schaefer, D.M. & Ham, R.K., 1989. Bacterial Population Development

- and Chemical Characteristics of Refuse Decomposition in a Simulated Sanitary Landfill. *Applied and Environmental Microbiology*, pp.55–65.
- Barry, D., B., G. & C, H., 2004. Minimising methane emissions from MSW landfill. *Atkins Environment*.
- Benbelkacem, H. et al., 2010. Effect of leachate injection modes on municipal solid waste degradation in anaerobic bioreactor. *Bioresource Technology*, 101, pp.5206–5212.
- Benson, C.H. et al., 2006. Practice review of five bioreactor / recirculation landfills. *Elsevier Ltd*.
- Bitton, G., 2005. Wastewater microbiology. In I. John Wiley Sons, ed. Hoboken. USA and Canada, pp. 350–354.
- Calace et al., 2001. Municipal landfill leachate-soil interactions: a kinetic approach. *Chemosphere*, 44, pp.1025–1031.
- Camargo&Vélez, 2009. Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. In // *Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Barranquilla.
- Cárdenas-Moreno, P.R., 2014. Estimación de biogás y lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos del Estado de México. , p.175.
- Carey, P. et al., 2000. *Landfill manuals - Landfill Site Design*,
- Carpenter, P.J., Reddy, K.R. & Thompson, M.D., 2013. Seismic Imaging of a Leachate-Recirculation Landfill: Spatial Changes in Dynamic Properties of Municipal Solid Waste. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 17(October).
- Castrillón, L. et al., 2010. Physicochemical and biological treatment of MSW landfill leachate. *Waste Management*, 30, pp.228–235.
- CFE-IIE, 2012. Guía del usuario, Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos. , pp.2–79.
- Chugh et al., 1998. Effect of recirculated leachate volume on MSW degradation. *Waste Management & Research*.
- CICC, (Comisión Intersecretarial de Cambio Climático), 2009. *Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio*

- Climático*, México.
- CONAPO, 2016. De los Municipios de México 2010-2030. (*Consejo Nacional de Población*). Available at: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/De_los_municipios_de_Mexico_ [Accessed April 5, 2014].
- Contreras, G.I.H., 2015. *CARACTERIZACIÓN MICROBIANA DURANTE EL PROCESO DE DEGRADACIÓN ACELERADA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS*.
- Cuartas, H.M., 2012. *Optimización del diseño de vertederos de residuos sólidos basada en modelización*. Universidad de Cantabria.
- Czepiel, P.M. et al., 2003. The influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions. *Waste Management*, 23(7), pp.593–598.
- Davis & Masten, 2005. *Ingeniería y Ciencias Ambientales, En: Ingeniería de Residuos Sólidos* E. M. G. Hill, ed.,
- Delgado, M.C.D.H., 2013. *Estudios de Parámetros físicoquímicos en Lixiviados recirculados en residuos sólidos Urbanos*.
- EA, 2009. Landfill (EPR 5.02).
- El-salam, M.M.A. & Abu-zuid, G.I., 2014. Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt. *JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2014.02.003>.
- EPA, 2016. Global Greenhouse Gas Emissions Data. Available at: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data> [Accessed October 29, 2016].
- FAO, 2011. *Manual de Biogas*,
- Feng, S. et al., 2015. Modeling of leachate recirculation using vertical wells in bioreactor landfills. *Environ Sci Pollut Res*.
- Feng, S.J. et al., 2014. Leachate recirculation in bioreactor landfills considering the stratification of MSW permeability. *Environmental Earth Sciences*, 73(7), pp.3349–3359.

- Florisbela dos Santos, A.L. & Wehenphl, G., 2001. De pepenadores y tiradores. El sector informal y los residuos sólidos municipales en México y Brasil. *Gaceta Ecológica*, (60), pp.70–80. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2898304>.
- Francois et al., 2007. Leachte recirculation effects on waste degradation: Study on columns. *Waste Management*, 27(9), pp.1259–1272.
- García, Patel, B.K. & Olivier, B., 2000. No Title. *Anaerobe*, 6, pp.205–226.
- GEM, 2012. *Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*,
- GEM-SEMARNAT, G. del E. de M.& S. del M.A., 2008. Bases de diagnóstico: Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Vulnerabilidad del Estado de México ante el Cambio Climático.
- Gerardi, M.H., 2003. *The Microbiology of Anaerobic Digester* Wiley-Interscience, ed., USA.
- González-Razo, C., 2012. *Caracterización del biogás en el Relleno de tierra de Morelia, Michoacán*. Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B.C.N.
- GRID, 2013. Vital Waste Graphics.
- Hernández-Berriel, M.C. et al., 2014. LANDFILL LEACHATE RECIRCULATION . PART I: SOLID WASTE DEGRADATION AND BIOGAS PRODUCTION. , 13(10), pp.2687–2695.
- Hernández-berriel, M.C. et al., 2008. The effect of moisture regimes on the anaerobic degradation of municipal solid waste from Metepec (México). , 28, pp.14–20.
- Hubert, J., Liu, X.F. & Collin, F., 2016. Numerical modeling of the long term behavior of Municipal Solid Waste in a bioreactor landfill. *Computers and Geotechnics*, 72.
- ICCEM, (Iniciativa ante el Cambio Climático en el Estado de México), 2015. Iniciativa ante el Cambio Climático en el Estado de México. Available at: http://sma.edomex.gob.mx/iniciativa_ante_el_cambio_climatico. [Accessed June 20, 2016].

- INE, 2010. *Potencial de mitigación de GEI en México al 2020 en el contexto de la cooperación internacional*,
- INECC, 2013. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- INEGI, 2016a. Número de habitantes por municipio. Available at: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/poblacion/> [Accessed June 29, 2016].
- INEGI, 2016b. Residuos. Available at: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb309&s=est&c=33221> [Accessed November 14, 2016].
- INEGI.c, 2015. *Anuario Estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2015*, México.
- IPCC, 2016. CAMBIO CLIMÁTICO 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Available at: http://ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml [Accessed June 15, 2016].
- IPCC, 2014. Drivers, Trends and Mitigation. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. pp. 351–412.
- Kjeldsen et al., 2002. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), pp.297–336.
- Komilis, D. & Athinotou, A., 2014. A water budget model for operating landfills: An application in Greece. *Waste Management & Research*, 32, pp.717–725.
- Kyoto, 1998. *Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*,
- LANDTEC, 2009. *GEM 2NAV Plus GEM 2000 Plus*,
- Laner, D., Fellner, J. & Brunner, P.H., 2009. Flooding of municipal solid waste landfills —An environmental hazard? *Science of the Total Environment*, 407(12), pp.3674–3680. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.03.006>.
- LGPGIR, 2012. *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*,

- Lobo, A., Muñoz, J. & Tejero, I., 2004. Assessment of a new waste biodegradation model for MODUELO. In *Waste Management and the Environment II*. pp. 419–428.
- Lobo, G. de C.A., 2003. *Desarrollo de MODUELO 2: herramienta para la evaluación de la contaminación en vertederos de residuos sólidos urbanos*. Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Depto. de Ciencias y Técnicas del agua y del medio ambiente.
- López-Martínez, A., 2010. Cuantificación de emisiones difusas mediante cámara de flujo en un vertedero de residuos urbanos. In *REDISA-Red de Ingeniería de Saneamiento Ambiental*. Joao Pessoa- PB, Brasil.
- Machado et al., 2008. Methane generation in tropical landfill: Simplified methods and field results. *Waste Management*.
- Madigan, Martinko & Parker, 2004. *Biología de los microorganismos* Décima edi. S. A. Pearson Educación, ed., Madrid, España.
- MASERA, 2007. *Proyecto ejecutivo para el saneamiento y construcción de dos celdas de disposición final de residuos sólidos urbanos, en el municipio de Zinacantepec, Edo. Mex*, Zinacantepec, Edo. Méx.
- Masi, S. et al., 2014. Assessment of the possible reuse of MSW coming from landfill mining of old open dumpsites. *Waste Management*, 34(3).
- Mata, J., 2003. Fundamentals of the Anaerobic Digestion Process. In *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid*. In *Waste*. London.
- Mazzarri, Agbogbo, F.K. & Holtzapple, M.T., 2005. Conversion of municipal solid waste to carboxylic acids using a mixed culture of mesophilic microorganisms. *Bioresource Technology*, 97(1), pp.47–56.
- MODUELO, 2012. *Manual del Usuario*, España.
- Mohammed, F.M.A., B. Noor, E.A. & K. Abdul, A.H., 2009. Review on Landfill Gas Emission to the Atmosphere. *European Journal of Scientific Research*.
- NOM-083-SEMARNAT-2003, *Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras*

- complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial,*
- OCDE, 2015. *Environment at a Glance 2015: OECD Indicators*,
- OCDE, 2016. Population growth rate. Available at: <http://stats.oecd.org/index.aspx?queryid=27482>. [Accessed June 19, 2016].
- OMM, 2015. Convenciones y convenios sobre el medio ambiente. Available at: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> [Accessed June 18, 2016].
- PECC, 2016. *Programa Especial del Cambio Climático 2014-2018*,
- PECC, 2014. Versión de Difusión del Programa Especial de Cambio Climático.
- PND, 2016. *Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018*, México, D.F.
- PNPGIR, 2012. *Programa Nacional para la prevención y Gestión Integral de Residuos, 2009-2012*,
- PNUD, 2014. *Informe sobre Desarrollo Humano 2014*,
- PNUMA, 2016. Waste. Available at: <http://www.unep.org/climatechange/mitigation/Waste/tabid/104349/Default.aspx> [Accessed May 5, 2016].
- Reddy, K.R., Giri, R.K. & Kulkarni, H.S., 2014. Design of drainage blankets for leachate recirculation in bioreactor landfills using two-phase flow modeling. *Computers and Geotechnics*, 62.
- Robles, F., 2008. *Generación de Biogás y Lixiviados en los Rellenos Sanitarios* Segunda ed., México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Rodriguez, A., 2015. MANAGEMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE IN MEXICO. In *Proceedings Sardinia 2015, Fifteenth International Waste Management and Landfill Symposium*. Available at: http://www.academia.edu/4254191/Management_of_Municipal_Solid_Waste.
- Samir, S., 2014. *Effect of enhanced leachate recirculated (ELR) landfill operation and gas extraction on greenhouse gas emissions*. University of Texas at Arlington.
- Schiappacasse, M.C., Chamy, R. & Poirrier, P., 2008. Efecto de la recirculación de lixiviado tratado en el comportamiento del relleno sanitario. , 1(4).

- Schroeder et al., 1994. *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3.*, Washington, DC (USA).
- SCS, E., 2009. Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0.
- SEMARNAT.b, 2013. Inventario nacional de emisiones. Available at: www.semarnat.gob.mx=temas=gestionambiental.
- SEMARNAT, S. de M.A. y R.N., 2016. El Medio Ambiente en México 2013-2014. Available at: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14 [Accessed May 25, 2016].
- SEMARNAT & GTZ, S. del M.A. y R.N.& A. de C.T.A., 2004. Guía de Cumplimiento de la NOM – 083 – SEMARNAT – 2003.
- SEMARNAT-a, S. de M. y R.N., 2016. Marco Jurídico del Sector Medio Ambiente. Available at: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/normas-mexicanas> [Accessed November 8, 2016].
- SEMARNAT-b, 2016. Consulta temática, Residuos sólidos Urbanos. Available at: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia_mce/html/mce_index.html?De=BADESNIARN [Accessed May 1, 2016].
- SEMARNAT-INECC, 2012. *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*,
- Sivakumar, B. et al., 2013. Approach for the use of MSW settlement predictions in the assessment of landfill capacity based on reliability analysis. *Waste Management*, 33(10).
- Smith, a et al., 2001. *Waste management options and climate change: Final report to the European Commission, DG Environment*, Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Waste+management+options+and+climate+change+Final+report+to+the+European+Commission,+DG+Environment#0>.
- Spokas et al., 2003. Implications of spatial variability of landfill emission rates on geospatial analyses. *Waste Management*, 23, pp.599–607.
- Spokas, K. et al., 2005. Methane mass balance at three landfill sites: What is the

- efficiency of capture by gass colletion systems? *Elsevier*.
- Staines, F., 2007. Cambio Climático: interpretando el pasado para entender el presente. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), pp.345–351.
- Stephany, D. et al., 2011. Biometanización de residuos sólidos urbanos por adición de lixiviados de alta carga orgánica en régimen mesófilo. , 13(2), pp.58–61.
- Swati, Kurgan & Nagendran, R., 2005. Bioreactor landfill lisymeter studies on Indian urban refuse. In *Proceedings Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*. S. Margherita di Pula. Cagliari, Italy.
- Tchobanoglous, G., H., T. & S., V., 1994. *Gestión Integral de Residuos Sólidos* McGraw-Hill, ed., Madrid, España.
- UE, 2012. *Tendencias en las emisiones globales de CO2-informe 2012*,
- Wagner, C. & Santos, B., 2007. Generación y manejo de gases. , pp.1–33.
- Walter, G.R. et al., 2012. Effect of biogas generation on radon emissions from landfills receiving radium-bearing waste from shale gas development Effect of biogas generation on radon emissions from landfills receiving radium-bearing waste from shale gas development. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(9), pp.1040–1049.
- Wang-Yao, K. et al., 2006. Seasonal Variation of Landfill Methane Emissions from Seven Solid Waste Disposal Sites in Central Thailand. In Bangkok.
- WB, 2016. World Development Indicators: Trends in greenhouse gas emissions. Available at: <http://wdi.worldbank.org/table/3.9> [Accessed November 3, 2016].
- Xing, W. et al., 2013. Environmental impact assessment of leachate recirculation in landfill of municipal solid waste by comparing with evaporation and discharge (EASEWASTE). *Waste Management*, 33(2), pp.382–389. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.017>.
- Yesiller, N. et al., 2014. Determination of specific gravity of municipal solid waste. *Waste Management*, 34(5).
- Zhan, T.L.T. et al., 2014. Vertical migration of leachate pollutants in clayey soils beneath an uncontrolled landfill at Huainan, China: A field and theoretical

investigation. *Science of the Total Environment*, 470–471, pp.290–298. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.081>.

Zhang, H. et al., 2013. Effect of rainfall of the diurnal variations of CH₄, CO₂ and N₂O fluxes from a municipal solid waste landfill. *Science of the Total Environment*, 442, pp.73–76.

ANEXOS

Determinación de la DQO en lixiviados: se realizó por duplicado de acuerdo al método HACH de dicromato de potasio III (aprobado por la USEPA), usando tubos HACH (cat. 10067 20-1,000 mg/l) y un espectrofotómetro portable HACH DR/820. Previo a su análisis, la muestra de lixiviado se clarificó (2.0 ml) en una centrifuga eppendorf, a 9000 rpm/5 min.

ANEXO A

Figura A 1. Ejemplos de oficios de participación de los Municipios



Oficio de formalización de Tenango del Valle



Oficio de confirmación de Almoloya de Juárez

ANEXO B

Figura B. 1 Ejemplo de lista de verificación con base a la guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA																
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO																
MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL																
Toda esta información será totalmente confidencial y será de apoyo para el equipo evaluador																
NOMBRE Y GUIA DE APLICACION																
Nombre o Razón Social del Solicitante:		Instituto Tecnológico de Toluca														
Domicilio:		Av Tecnológico S/n														
Fecha de elaboración:		30-09-14														
Nombre del equipo evaluador:		Laura Verónica Díaz Archundia														
Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs										
5. Disposiciones Generales																
¿Reciben RSU y RME?	5.1	✓														
¿Cantidad de RSU y RME ingresan por día?	5.2				A											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIPO</th> <th>TON/DIA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>Mayor a 100</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>50 hasta 100</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>10 y menor a 50</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>Menor a 10</td> </tr> </tbody> </table>							TIPO	TON/DIA	A	Mayor a 100	B	50 hasta 100	C	10 y menor a 50	D	Menor a 10
TIPO	TON/DIA															
A	Mayor a 100															
B	50 hasta 100															
C	10 y menor a 50															
D	Menor a 10															
6. Especificaciones para la selección del sitio																
6.1 Restricciones para la ubicación del sitio																
Si el sitio se ubica a una distancia menor de 13km de un aeródromo o un aeropuerto. ¿Cuenta con un estudio de riesgo aviario?	6.11	✓														
¿El sitio se ubica dentro de una área natural protegida?	6.12	✓														
Si lo anterior es Si ¿El plan de manejo lo contempla?																

Figura B.1. Ejemplo de lista de verificación con base a la guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, Continuación

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003		Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/obs
E	El sitio, ¿No se ubica en zonas de: marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas?	6.1.4	✓				
	¿El sitio se ubica fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años?	6.1.5	✓				
	En caso de estar dentro de zonas de inundación, ¿Se demuestra que no existe obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que afecten la estabilidad física de las obras que integran el sitio?		✓				
	¿El sitio se ubica a mínimo 500m con respecto a cuerpos de agua superficiales como caudal continuo, lagos y lagunas?	6.1.6	✓				
	¿El sitio se ubica a mínimo 100m adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, con respecto a pozos de extracción de agua para uso domestico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados?	6.1.7	✓				
Para el anterior en caso que no se pueda determinar el el cono de abatimiento, ¿La distancia al pozo no es menor a 500m?	✓						
6.2 Estudios y análisis previos requeridos para la selección del sitio							
ESTUDIO GEOLÓGICO:		6.2.1					
El estudio determina el marco geológico regional con el fin de obtener: descripción			✓				
Geometría y distribución			✓				
Identificación de discontinuidades tales como fallas o fracturas			✓				
Otra información para conocer el sitio como: cortes litológicos de pozos perforados			✓				
Informes realizados por alguna institución particular u oficial			✓				
ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO:		6.2.2					
Evidencias y usos del agua subterránea		a)					
¿Se define la ubicación de las evidencias de agua subterránea tales como manantiales, pozos y norias en la zona de influencia para conocer el			✓				
¿Se determina el volumen de extracción?			✓				
¿Se determinan las tendencias de la explotación?			✓				
¿Se determinan planes de desarrollo en la zona de estudio?			✓				
Identificación del tipo de acuífero		b)					
¿Se identifican las unidades hidrogeológicas ?			✓				
¿Se identifica el tipo de acuífero (confinado o semiconfinado)?			✓				
¿Se identifica la relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas que definen el sistema acuífero?			✓				
Análisis del sistema de flujo		c)					
¿Se determina la dirección del flujo subterráneo regional?			✓				
6.3 Estudios y análisis, en el sitio, previos a la construcción u operación de un sitio de disposición final.							

Figura B.1. Ejemplo de lista de verificación con base a la guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, Continuación

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs
ESTUDIO TOPOGRÁFICO ¿El estudio incluye planimetría y altimetría a detalle del sitio seleccionado?	a)	✓				
ESTUDIO GEOTÉCNICO ¿El estudio incluye al menos las siguientes pruebas?: Exploración y Muestreo: Exploración para definir sitios de muestreo. Muestreo e identificación de muestras. Análisis de permeabilidad de campo. Peso Volumétrico <i>in situ</i> . Generación de lixiviado ¿Se tiene cuantificado el lixiviado mediante algún balance hídrico?	b) b.1 c)	 ✓ ✓	 ✓	 	 No se realiza, existe guía que se puede tomar como estimado	
6.5 Cumplimiento de estudios y análisis previos VER TABLA 2 de la NOM-083-SEMARNAT-2003.						
Estudios en laboratorio: Clasificación de muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos. Análisis granulométrico. Permeabilidad. Prueba Proctor. Límites de consistencia (Límites de Atterberg). Consolidación unidimensional. Análisis de resistencia al esfuerzo cortante. Humedad. ¿Con los resultados de las propiedades físicas y químicas del laboratorio se realizaron los análisis de estabilidad de taludes de las obras de terracería correspondientes?	b.2	✓ ✓				
EVALUACIÓN GEOLÓGICA: ¿Se precisa la litología de los materiales, así como la geometría, distribución y presencia de fracturas y fallas geológicas en el sitio? ¿Se determinan las características estratigráficas del sitio?	c) c.1 c.2	 ✓ 	 		Existen planos, sin embargo hay fracturas en Celda 2 y celda 3 En el reporte Ejecutivo, revisar porque falta un estrato	
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA: ¿Se determinan los parámetros hidráulicos, dirección del flujo subterráneo, características físicas, químicas y biológicas del agua? ¿Se determinan las unidades hidro geológicas que componen el subsuelo, así como las características que las identifican (espesor y	d) d.1 d.2	 ✓ ✓	 			
6.4 Estudios de generación y composición						
Generación y composición de los RSU y RME ¿Se elaboraron los estudios de generación y composición de los RSU y RME de la población por servir, con proyección para al menos la vida	a)	✓				
Generación de biogás ¿Se tiene estimada la cantidad de generación esperada de biogás, mediante análisis químicos estequiométricos, que tomen en cuenta la composición química de los residuos por manejar?	b)	✓			Se encuentra en proyecto ejecutivo de la Primera etapa	
Generación de lixiviado ¿Se tiene cuantificado el lixiviado mediante algún balance hídrico?	c)		✓		No se realiza, existe guía que se puede tomar Para estimado	
6.5 Cumplimiento de estudios y análisis previos VER TABLA 2 de la NOM-083-SEMARNAT-2003.						

Figura B.1. Ejemplo de lista de verificación con base a la guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, Continuación

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/obs
7. Características constructivas y operativas del sitio de disposición final						
El sitio de disposición final ¿Cuenta con una barrera geológica natural o equivalente a un espesor de 1m?	7,1	✓			En Proyecto ejecutivo	
El sitio de disposición final ¿Cuenta con un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos 1×10^{-7} cm/s sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final o bien garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente?						
¿Se garantiza la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el sitio de disposición final?	7,2	✓			Se retiraron quemadores aproximadamente en Marzo de 2013, todo va al ambiente	
¿Se efectúa la quema a través de pozos individuales o mediante establecimiento de una red con quemadores centrales?		✓				
¿Cuenta con un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado en el sitio de disposición final?	7,3	✓				
¿El lixiviado se recircula en las celdas de los RSU confinados en función de los requerimientos de humedad o bien es tratado o una combinación de ambos?		✓				
¿Se tiene diseñado un drenaje pluvial para el desvío de escurrimientos pluviales y el desalojo del agua de lluvia?	7,4	✓				
¿Cuenta con una área de emergencia para la recepción de RSU y RME, cuando una eventualidad, desastre natural o emergencia de cualquier orden no permita la operación en el	7,5	✓				
De acuerdo a la tabla No. 3 de la NOM-083, ¿se alcanzan los niveles mínimos de compactación?	7,6				830 en Abril 2014, con maquinaria 826C CAT	
¿Los residuos son cubiertos en forma continua y dentro de un lapso menor a 24h posteriores a su depósito?	7,7	✓			Aproximadamente cubren después de 7 m la celda se llena hasta nivel de suelo.	
¿El sitio ha adoptado medidas para que los residuos enlistados en el punto 7.8 de la norma no sean admitidos?	7,8	✓				
¿Los lodos son tratados o acondicionados antes de su disposición final en el frente de trabajo, conforme la normatividad vigente?	7.8.1	✓				
¿Los sitios de disposición final contiene las obras complementarias indicas en la Tabla No.4?	7,9					
El sitio ¿cuenta con un manual de operación? Y este contiene:	7.10 a)	✓				
Dispositivos de control de accesos de personal, vehículos y materiales, prohibiendo el ingreso de RP, radiactivos o inaceptables		✓				
Método de registro de tipo y cantidad de residuos ingresados		✓			peso y los clasifican con boleta	
Cronogramas de operación						
Programas específicos de control de calidad, mantenimiento y monitoreo ambiental de biogás, lixiviados y acuíferos		✓			Reportes semestrales	
Dispositivos de seguridad y planes de contingencia para: incendios, explosiones, sismos, fenómenos meteorológicos y manejo de lixiviados, sustancias reactivas, explosivas e		✓				
Procedimientos de operación			✓		Solo Verbal y prácticas	
Perfil de puestos			✓		En Oficina	
Reglamento interno			✓		En entrada	

Figura B.1. Ejemplo de lista de verificación con base a la guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, Continuación

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs
Un control de registros de ingreso de RSU y RME, materiales, vehículos, personal y visitantes	b)	✓			No se registra	
Secuencia de llenado del sitio de disposición final			✓			
Generación y manejo de lixiviados y biogás			✓			
Contingencias		✓				
Informe mensual de actividades	c)	✓				
Se tiene instrumentado un programa que incluya la medición y control de los impactos ambientales, además del programa de monitoreo ambiental de dichos sitios	7.11		✓			
Los registros se conservan y mantienen		✓				
¿Se tiene un programa de monitoreo del biogás?	7.11.1	✓			ITT	
¿Se conoce el grado de estabilización de los residuos y las migraciones fuera del predio?			✓			
¿Se especifican los parámetros de composición, explosividad y flujo del biogás?		✓				
¿Se tiene un programa de monitoreo del lixiviado		✓				
¿Se conoce el potencial de hidrogeno (pH)?	7.11.2	✓				
¿Se conoce la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)?		✓				
¿Se conoce la Demanda Química de Oxígeno (DQO)?		✓				
¿Se conoce los metales pesados?		✓				
¿Se tiene un programa de monitoreo de Acuífero	7.11.3	✓				
¿El programa cuenta con puntos de muestreo que correspondan a las condiciones particulares del sistema de flujo hidráulico, mismo que define la zona de influencia?		✓				
Por lo menos dos pozos de muestreo, uno aguas arriba y otro aguas debajo de sitio?					En proyecto Ejecutivo	
Se consideran los parámetros básicos en el diseño de los pozos como: El gradiente superior y descendente hidráulico		✓				
Variaciones naturales del flujo del acuífero						
Variaciones estacionales del flujo del acuífero						
Calidad del agua antes y después del					En Proyecto Ejecutivo	
Las actividades de separación de residuos no afectan el cumplimiento de las especificaciones de operación contenidas en la presente Norma, ni significan un riesgo para las personas que la realicen?	7.12		✓		Los pepenadores no hacen caso al segregar RSU y cenizas	
8. Requisitos mínimos que deben cumplir los Sitios de Disposición Final de los RSU y RME, tipo D (menos de 10 Ton/día)						
¿El sitio garantiza un coeficiente de conductividad hidráulica de 1×10^{-5} cm/s, con un espesor mínimo de un metro, o su equivalente, por condiciones naturales del terreno, o bien, mediante la impermeabilización del sitio con barreras naturales o artificiales?	8.1				Se desconoce	
¿El sitio garantiza una compactación mínima de la basura, de 300 Kg/m ³ ?	8.2	✓			830	
¿El sitio garantiza una cobertura de los residuos, por lo menos cada semana?	8.3		✓		depende de la operación	
¿El sitio evita el ingreso de los RP en general?	8.4	✓			Se pide pruebas CRETB	
¿El sitio garantiza el control de una fauna nociva y evitar el ingreso de animales?	8.5		✓			
¿El sitio cerca en su totalidad el sitio de disposición final?	8.6	✓				
9. Clausura del sitio						
¿La cobertura final de clausura aísla los residuos, minimiza la infiltración de los líquidos en las celdas, controla el flujo del biogás generado, minimiza la erosión y brinda un drenaje	9.1		✓		La Celda 2 y 3 están en revisión	
¿Las áreas que alcancen su altura final y tengan una extensión de dos hectáreas son cubiertas conforme el avance en los trabajos y el diseño específico del sitio?			✓			

Figura B.1. Ejemplo de lista de verificación con base a la guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, Continuación

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs
La conformación final que se da al sitio de disposición final ¿Contempla las restricciones relacionadas con el uso del sitio, estabilidad de taludes, límites del predio, características de la cobertura final de clausura, drenajes superficiales y la infraestructura para el control del lixiviado y biogás?	9,2	✓				
¿El sitio elabora y opera un programa de mantenimiento de posclausura para todas las instalaciones, por un periodo de 20 años?	9,3	✓				
¿El programa incluye el mantenimiento de la cobertura final para reparar las grietas y hundimientos provocados por la degradación de los RSU y RME, así como los daños ocasionados por erosión?		✓			revisión diaria en temporada de lluvias y secas	
¿El sitio elabora y opera un programa de monitoreo para detectar condiciones inaceptables de riesgo al ambiente por la emisión de biogás y generación de lixiviado?	9,4		✓			
¿El uso final del sitio de disposición final es acorde con el uso del suelo aprobado por la autoridad competente con las restricciones inherentes a la baja capacidad de carga, posibilidad de hundimientos diferenciales y	9,5	✓				
Marisol					Laura Verónica Díaz Archundia	
Representante Autorizado del Sitio					Equipo Evaluador	
Nombre y Firma					Nombre y firma	

ANEXO C

Tabla C. 1 Caracterización de Biogás en superficie C1Z, 2013 – 2015

Cámara	Muestreo (Min)	Lluvias 2013			Muestreo (Min)	Estiaje 2014			Muestreo (Min)	Lluvias 2014			Muestreo (Min)	Estiaje 2015		
		CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	Temperatura (°C)		CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	Temperatura (°C)		CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	Temperatura (°C)		CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	Temperatura (°C)
1	NR				0	1.00	0.40	36.60	0	0,00	0,10	21,70	0	0,00	0,10	22,10
	30	0.80	0.20	23.10	30	1.80	0.90	31.20	30	0,10	0,30	22,10	30	0,00	0,30	22.40
	60	1.00	0.30	23.20	60	2.30	1.30	38.00	60	0,00	0,30	22,10	60	0,10	0,30	23.43
					90	2.40	1.60	30.80	90	0,00	0,40	25,00	90	0,10	0,30	24.10
					120	2.70	1.80	28.50	120	0,90	0,60	25,60	120	0.40	0.60	24.30
2	NR				0	0.60	0.40	31.90	0	0,00	0,10	18,40	0	0,00	0,10	22.11
	30	0.30	0.10	22.80	30	0.70	0.60	32.90	30	0,00	0,00	19,60	30	0,00	0,00	22.12
	60	0.60	0.20	25.30	60	0.70	0.60	34.70	60	0,00	0,00	21,00	60	0,00	0,00	22.12
					90	0.70	0.40	32.30	90	0,00	0,00	22,80	90	0,00	0,00	22.31
					120	0.60	0.30	26.50	120	0,00	0,00	22,60	120	0.00	0.00	22.50
3	NR				0	0.60	0.10	32.30	0	0,00	0,10	19,40	0	0,00	0,10	22.20
	30	0.30	0.00	22.00	30	0.50	0.00	34.10	30	1,90	0,30	20,90	30	0,00	0,10	22.34
	60	0.40	0.00	21.70	60	0.50	0.00	35.40	60	3,00	2,20	20,70	60	1,80	0,30	22.43
					90	0.60	0.00	29.10	90	4,30	2,90	24,10	90	1,80	0,30	22.45
					120	0.40	0.00	31.90	120	4,40	4,30	24,80	120	1.40	1.10	23.10

Tabla C.1. Caracterización de Biogás en superficie C1Z, 2013 - 2015, Continuación

Cámara	Muestreo (Min)	Lluvias 2013			Muestreo (Min)	Estiaje 2014			Muestreo (Min)	Lluvias 2014			Estiaje 2015			
		CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	Temperatura (°C)		CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	Temperatura (°C)		CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	Temperatura (°C)	Muestreo (Min)	CH ₄ (%v/v)	CO ₂ (%v/v)	Temperatura (°C)
4		NR			0	0.50	0.10	32.60	0	0,00	0,10	19,80	0	0,00	0,10	22.32
	30	0.40	0.10	22.20	30	0.80	0.50	32.30	30	0,00	0,00	25,50	30	0,00	0,10	22.34
	60	0.40	0.10	21.40	60	1.40	0.80	30.90	60	0,00	0,00	24,60	60	0,00	0,10	23.45
					90	1.80	1.10	28.80	90	0,00	0,10	25,70	90	0,00	0,10	24.71
					120	1.70	1.10	30.10	120	0,00	0,10	28,50	120	0,00	0,10	25.40
5		NR			0	0.80	0.20	31.60	0	0,00	0,00	21,70	0	0,00	0,10	22.81
	30	1.00	0.50	27.00	30	1.00	0.60	30.30	30	0,00	0,00	20,60	30	0,00	0,10	22.16
	60	1.40	0.80	24.00	60	1.30	0.70	32.50	60	0,00	0,00	23,90	60	0,00	0,10	24.31
					90	1.60	2.10	27.90	90	0,00	0,00	24,80	90	0,00	0,10	24.58
					120	0.80	0.30	27.20	120	0,10	0,00	24,60	120	0,10	0,00	25.60
6		NR			0	0.50	2.00	34.70	0	0,00	0,10	21,10	0	0,10	0,00	22.67
	30	0.40	0.20	22.60	30	0.50	0.10	40.10	30	0,00	0,20	21,00	30	0,10	0,00	22.45
	60	0.40	0.20	25.00	60	0.50	0.10	37.80	60	0,00	0,20	22,60	60	0,10	0,00	23.56
					90	0.50	0.20	29.40	90	0,00	0,20	23,20	90	0,10	0,00	24.78
					120	0.50	0.20	30.30	120	0,10	0,20	27,90	120	0,10	0,20	26.01

Tabla C. 2 Caracterización de Biogás en superficie C3ZIN, estiaje 2014

Cámara	Estiaje 2014			
	Muestreo (Min)	CH4 (% v/v)	CO2 (% v/v)	Temperatura (°C)
1	0	0.30	0.10	28.30
	30	0.40	0.20	27.00
	60	0.50	0.30	28.00
	90	0.50	0.40	31.30
	120	0.50	0.50	25.00
2	0	0.70	1.30	30.20
	30	1.40	2.80	30.30
	60	1.70	3.70	31.00
	90	2.00	4.30	31.80
	120	2.10	4.70	28.80
3	0	0.40	0.20	25.40
	30	3.90	5.20	31.40
	60	3.30	4.80	28.70
	90	1.70	2.50	31.80
	120	1.50	1.60	29.00
4	0	2.30	1.70	31.20
	30	3.10	2.10	33.10
	60	4.30	2.70	32.90
	90	3.10	1.80	35.80
	120	4.20	2.40	36.00
5	0	0.40	0.20	30.10
	30	0.50	0.20	31.90
	60	0.50	0.20	27.20
	90	0.50	0.10	33.80
	120	0.60	0.50	30.70
6	0	0.40	0.40	31.90
	30	0.50	0.30	34.80
	60	0.50	0.10	33.00
	90	0.50	0.20	32.40
	120	0.50	0.70	34.70

Tabla C. 3 Caracterización de Biogás en superficie CSVG, 2013 - 2015

Cámara	Lluvias 2013				Estiaje 2014			
	Muestreo (Min)	CH ₄ (% v/v)	CO ₂ (% v/v)	Temperatura (°C)	Muestreo (Min)	CH ₄ (% v/v)	CO ₂ (% v/v)	Temperatura (°C)
1	0	0.20	0.10	28.30	0	0.30	2.10	38.30
	30	0.30	0.20	27.00	30	0.50	3.90	38.10
	60	0.30	0.20	28.50	60	0.50	5.30	38.70
	90	0.30	0.10	28.50	90	0.60	9.00	33.70
					120	0.60	6.30	30.70
2	0	0.20	0.00	26.80	0	0.30	0.40	35.70
	30	0.20	0.10	27.00	30	0.50	2.20	41.60
	60	0.30	0.10	29.50	60	0.40	1.20	40.60
	90	0.30	0.10	30.60	90	0.50	2.30	43.50
					120	0.40	2.30	33.40
3	0	0.20	0.00	25.30	0	0.30	0.10	33.40
	30	0.80	0.50	26.60	30	0.40	1.30	38.10
	60	0.90	0.50	29.50	60	0.40	0.90	36.60
	90	0.90	0.50	28.80	90	0.40	1.60	41.20
					120	0.30	0.80	30.90
4	0	0.20	0.00	25.30	0	0.30	0.00	30.80
	30	0.30	0.00	26.20	30	0.40	0.40	33.20
	60	0.30	0.00	28.50	60	0.40	0.50	32.00
	90	0.30	0.00	29.10	90	0.40	0.60	31.30
					120	0.30	0.70	27.80
5	0	0.30	0.00	23.90	0	0.40	0.00	31.20
	30	1.30	0.60	26.20	30	0.60	0.60	32.80
	60	7.40	3.90	28.50	60	0.80	0.90	32.00
	90	15.20	8.40	28.70	90	0.80	1.00	33.80
					120	0.90	1.50	27.20
6	0	0.20	0.00	24.00	0	0.40	0.00	28.50
	30	0.30	0.00	27.40	30	0.40	0.00	34.00
	60	0.30	0.00	27.60	60	0.80	0.90	34.30
	90	0.40	0.10	29.30	90	0.80	1.00	39.20
					120	7.10	4.80	28.70

Tabla C.3 Caracterización de Biogás en superficie CSVG, 2013 – 2015, continuación

Cámara	Lluvias 2014				Estiaje 2015			
	Muestreo (Min)	CH ₄ (% v/v)	CO ₂ (% v/v)	Temperatura (°C)	Muestreo (Min)	CH ₄ (% v/v)	CO ₂ (% v/v)	Temperatura (°C)
1	0	0.00	0.00	30.50	0	0.30	0.10	22.90
	30	0.00	0.000	34.20	30	-	-	-
	60	0.00	0.00	33.10	60	1.30	0.90	26.10
	90	0.10	0.00	30.30	90	-	-	-
	120	0.10	1.20	28.00	120	0.90	1.00	24.80
2	0	0.10	1.10	29.30	0	16.00	11.10	24.40
	30	0.40	4.80	31.60	30	-	-	-
	60	1.00	8.40	31.80	60	37.50	28.00	29.80
	90	1.30	9.70	31.60	90	-	-	-
	120	1.40	10.90	28.70	120	34.40	26.70	25.70
3	0	0.00	0.80	30.00	0	0.70	0.50	22.10
	30	0.10	1.00	31.70	30	-	-	-
	60	0.10	1.10	32.20	60	-	-	-
	90	0.10	1.30	29.30	90	-	-	-
	120	0.10	0.90	28.20	120	4.10	2.90	25.50
4	0	0.00	0.40	34.10	0	0.40	0.20	22.20
	30	0.00	0.20	31.60	30	-	-	-
	60	0.20	1.80	35.30	60	-	-	-
	90	0.20	1.70	34.50	90	-	-	-
	120	0.10	1.00	30.50	120	0.50	0.70	28.30
5	0	0.00	0.00	30.50	0	0.30	0.30	23.30
	30	0.00	0.00	30.10	30	-	-	-
	60	0.00	0.00	32.40	60	-	-	-
	90	0.00	0.00	29.20	90	-	-	-
	120	0.00	0.00	29.80	120	0.50	0.70	26.90
6	0	0.00	0.00	31.90	0	0.30	0.20	23.50
	30	0.10	0.10	34.60	30	-	-	-
	60	0.10	0.30	31.70	60	-	-	-
	90	0.10	0.30	30.90	90	-	-	-
	120	0.10	0.40	29.40	120	2.00	0.30	27.10

Tabla C. 4 Caracterización de Biogás en superficie en TV.
2013 – 2015

Cámara	Lluvias 2013				Estiaje 2014			
	Muestreo (Min)	CH4 (% v/v)	CO2 (% v/v)	Temperatura (°C)	Muestreo (Min)	CH4 (% v/v)	CO2 (% v/v)	Temperatura (°C)
1	0	0.20	0.00	22.60	0	0.70	0.50	26.20
	30	0.40	0.00	28.00	30	0.60	0.40	30.40
	60	0.50	0.20	27.90	60	0.50	0.30	31.60
	90	0.40	0.20	28.00	90	0.50	0.30	33.90
	120	0.50	0.30	30.70	120	0.50	0.20	29.50
2	0	0.40	0.30	27.40	0	7.20	5.50	32.50
	30	0.30	0.00	25.80	30	3.90	2.50	34.80
	60	0.50	0.50	24.80	60	10.90	8.50	34.10
	90	0.50	0.30	27.20	90	10.10	0.50	36.90
	120	0.70	0.40	28.70	120	6.80	5.00	31.90
3	0	0.40	0.30	26.40	0	0.80	0.30	27.40
	30	0.40	0.10	23.10	30	1.20	0.60	29.10
	60	0.50	0.20	26.90	60	1.30	0.70	29.90
	90	0.30	0.00	28.30	90	1.10	0.60	32.32
	120	0.40	0.00	30.10	120	1.00	0.40	28.40
4	0	0.30	0.00	26.30	0	0.50	0.00	23.00
	30	0.30	0.00	25.40	30	0.50	0.00	27.60
	60	0.40	0.00	26.20	60	0.50	0.00	28.10
	90	0.30	0.00	31.50	90	0.50	0.00	31.50
	120	0.40	0.00	26.20	60	0.50	0.00	28.10
5	0	0.40	0.60	27.10	0	0.50	0.00	27.40
	30	0.40	0.30	27.90	30	0.50	0.00	25.20
	60	0.40	0.20	29.90	60	0.50	0.00	26.50
	90	0.60	0.60	30.90	90	0.50	0.00	25.50
6	0	0.50	0.10	32.00	0	0.50	0.00	26.60
	30	1.20	0.80	32.20	30	0.50	0.00	26.60
	60	2.50	2.20	32.80	60	0.50	0.10	27.00
	90	6.50	4.90	33.00	90	0.60	0.10	26.10
	120	3.00	2.10	29.40	120	0.50	0.10	25.40

Tabla C.4. Caracterización de Biogás en superficie en TV
2013 – 2015, continuación

Cámara	Lluvias 2014				Estiaje 2015			
	Muestreo (Min)	CH4 (% v/v)	CO2 (% v/v)	Temperatura (°C)	Muestreo (Min)	CH4 (% v/v)	CO2 (% v/v)	Temperatura (°C)
1	0	0,10	0,00	22,40	0	0.30	1.00	20.30
	30	0,00	0,10	25,30	30	0.30	0.00	26.60
	60	0,10	0,00	27,10	60	0.30	0.00	28.90
	90	0,10	0,00	27,10	90	0.40	0.00	24.10
	120	0,10	0,00	32,80	120	0.40	0.00	26.40
2	0	0,00	0,50	21,30	0	0.30	0.00	20.80
	30	0,10	1,10	25,30	30	0.30	0.10	25.00
	60	0,10	1,10	30,90	60	0.30	0.20	27.90
	90	0,10	1,80	29,40	90	0.40	0.20	28.80
	120	0,20	2,30	32,40	120	0.40	0.20	32.10
3	0	0,00	0,10	21,60	0	0.30	0.00	21.50
	30	0,00	0,20	28,10	30	0.30	0.00	22.80
	60	0,10	0,20	27,20	60	0.50	0.00	24.30
	90	0,10	0,20	35,40	90	0.40	0.00	25.00
	120	0,10	0,20	28,40	120	0.40	0.00	29.10
4	0	0,10	0,10	28,30	0	0.30	0.00	21.90
	30	0,00	0,00	32,80	30	0.30	0.00	22.70
	60	0,10	0,00	30,20	60	0.40	0.00	24.40
	90	0,10	0,00	33,90	90	0.40	0.00	26.20
	60	0,10	0,00	24,90	60	0.40	0.00	26.00
5	0	0,10	0,10	22,80	0	0.30	0.00	16.60
	30	0,00	0,30	30,70	30	0.30	0.10	21.10
	60	0,10	0,30	29,60	60	0.40	0.10	24.80
	90	0,10	0,30	31,80	90	0.40	0.10	26.70
	120	-	-	-	120	0.40	0.10	27.80
6	0	0,10	0,30	24,70	0	0.30	0.00	21.60
	30	0,00	0,00	22,40	30	0.30	0.10	21.60
	60	0,10	0,10	29,50	60	0.40	0.10	24.00
	90	0,10	0,20	32,10	90	0.40	0.00	26.40
	120	0,10	0,10	30,30	120	0.40	0.00	27.00

Tabla C. 5 Caracterización de Biogás en superficie CSTV, estiaje 2014

Cámara	Estiaje 2014			
	Muestreo (Min)	CH4 (% v/v)	CO2 (% v/v)	Temperatura (°C)
1	0	0.60	0.10	30.10
	30	0.70	0.60	29.80
	60	0.80	1.00	31.30
	90	0.80	1.10	28.30
	120	0.80	1.10	29.20
2	0	0.60	0.30	23.60
	30	0.70	1.40	30.50
	60	0.90	2.70	27.80
	90	0.90	2.80	27.40
	120	0.90	2.90	28.70
3	0	0.60	0.00	27.10
	30	0.60	0.20	28.80
	60	0.50	0.40	25.60
	90	0.50	0.50	29.10
	120	0.50	0.50	26.00
4	0	0.60	0.00	25.80
	30	0.50	0.40	29.80
	60	0.50	0.70	27.50
	90	0.50	0.80	27.00
	120	0.50	0.80	27.00
5	0	0.50	0.10	32.60
	30	0.60	0.00	23.10
	60	0.60	0.20	29.80
	90	0.60	0.40	23.90
	120	0.60	0.40	23.90
6	0	0.50	0.50	25.90
	30	0.50	0.60	34.90
	60	0.60	0.00	24.30
	90	0.60	0.40	23.90
	120	0.50	0.70	23.60

ANEXO D

Tabla D. 1 Ejemplo de las simulaciones realizadas y variación de algunos parámetros

Sim 19 valores iniciales en la biodegradación*

	g/h CH ₄	kg/d
<i>in situ</i>	226.51	5.4362
MODUELO	5570.4	133.69

Sim 20, se bajaron los valores de biodegradación con respecto a la Sim 19

	g/h CH ₄	kg/d
<i>in situ</i>	226.51	5.4362
MODUELO	3402.5	81.66

Sim 21, se bajaron los valores de biodegradación con respecto a la Sim 20

	g/h CH ₄	kg/d
<i>in situ</i>	226.51	5.4362
MODUELO	2592.9	62.23

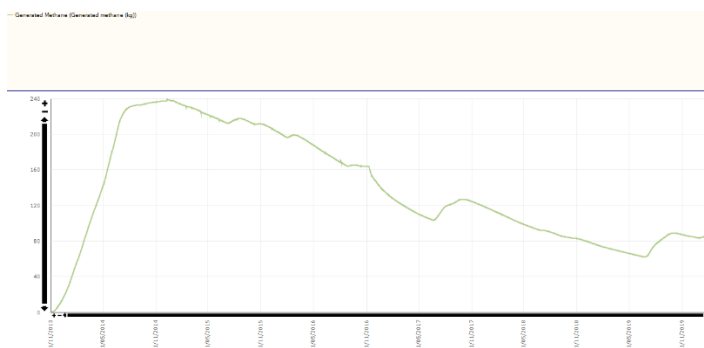
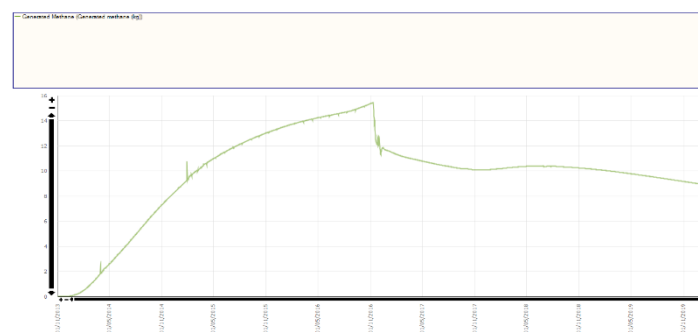
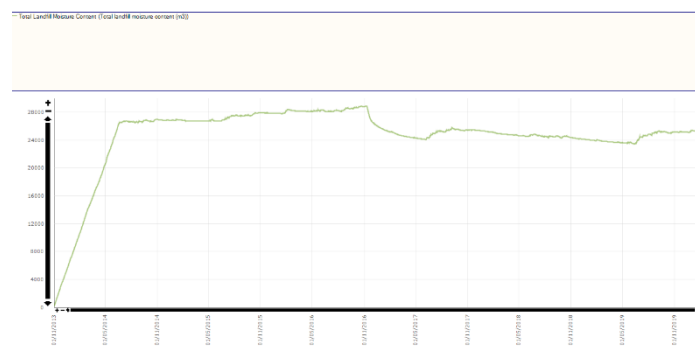
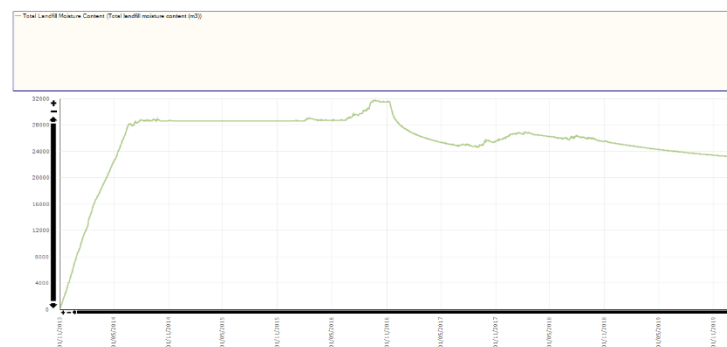
Sim 26 bajando al mínimo los valores de metanogénesis, de 0.18 a 0.1

	g/h CH ₄	kg/d
<i>in situ</i>	226.51	5.4362
MODUELO	639.17	15.34

Sim 31 y Sim 13 cambiando la velocidad de hidrólisis

	g/h CH ₄	kg/d
<i>in situ</i>	226.51	5.4362
MODUELO	639.17	15.34

* Tiempo de activación de hidrólisis rápida: 397-0; Tasa de hidrólisis rápida (d-1): 0.-0025-0.0004; Tasa de acetogénesis (d-1): 0.03-0.01;.

Figura D. 1 Ejemplo de la variación en la generación de CH₄ y contenido de humedad**Sim 13,
Generación de CH₄ (kg)****Sim 13,
Contenido de Humedad (m³)****Sim 26,
Generación de CH₄ (kg)****Sim 26
Contenido de Humedad (m³)**

ANEXO E

PUBLICACIÓN DE ARTÍCULO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

REVISTA INGENIERÍA INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA



Ref. 1174

Dra. María del Consuelo Hernández Berriel

Instituto Tecnológico de Toluca
Tecnológico Nacional de México
División de Estudios de Posgrado e Investigación
PRESENTE

Estimada Dra. Hernández Berriel

Me es muy grato saludarle e informarle que ha concluido la evaluación del artículo "Emisión de Gases de Efecto Invernadero de Residuos Sólidos urbanos en dos diferentes Sitios de Disposición Final en México", cuyos autores son Laura Verónica Díaz Archundia, Otoniel Buenrostro Delgado, María del Consuelo Mañón Salas y María del Consuelo Hernández Berriel. Se nos recomendó la publicación del manuscrito en su forma actual.

Una vez que se tenga definido el volumen y número en el cual se publicará su artículo, le informaremos vía correo electrónico para iniciar el proceso de publicación (pruebas de galera, revisiones, correcciones y firma y cesión de derechos).

Sin más por el momento, aprovecho para enviarle un cordial saludo.

Atentamente:

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Ciudad Universitaria, 25 de octubre de 2016.


CIPRIANO SÁNCHEZ

Coordinador de Arbitraje

DICTAMEN FINAL: ACEPTADO

Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología. ISSN: 1405-7743

Facultad de Ingeniería, UNAM Cú. Universitaria 04510, México, D. F. Tel. (55) 5622-0876 / Fax (55) 5616-1899

e-mail: ir.revista@gmail.com

www.ingenieria.unam.mx/~revista/

Emisión de Gases de Efecto Invernadero en dos Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos en México

Greenhouse Gases emissions of Municipal Solid Waste from two Final Disposal Sites in Mexico

M. en C. Díaz-Archundia, Laura Verónica¹., Dr. Buenrostro Delgado, Otoniel², Dra. Mañón-Salas, María del Consuelo³, Dra. Hernández-Berriel, María del Consuelo⁴

^{1,3,4}Laboratorio de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Instituto Tecnológico s/n. Fraccionamiento La Virgen, 52149, Metepec, Edo. De México, México.

Teléfono: (+52) 01722 2 08 72 00 ext. 3630

¹ lauradiazarch@yahoo.com.mx , ³consuelomanon@gmail.com, ⁴hberriel_1999@yahoo.com

²Laboratorio de Residuos Sólidos y Medio Ambiente, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. San Juanito Itzicuaró S/N, Col. San Juanito Itzicuaró, C.P.58302. Morelia, Michoacán, México.

Teléfono (+52) 01443-3340475,
otonielb@umich.mx

Resumen: En México, el 74% de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) generados son dispuestos en rellenos sanitarios (RESA), sin embargo, los reportes sobre las condiciones de operación de éstos así como de los tiraderos a cielo abierto (TCA) son escasos. El objetivo del estudio fue determinar la generación del metano como Gas de Efecto Invernadero en un RESA y un TCA. Para ello se evaluaron las condiciones de operación, se caracterizaron los RSU confinados en temporadas de lluvias y estiaje y se determinó la generación de metano puntual y difusa. Con el fin de mejorar la operación del RESA bajo estudio se detectaron ocho áreas de oportunidad y fueron documentados los problemas ambientales del TCA. Si bien, el tipo de operación y la cantidad de materia biodegradable en los RSU (50.36% en RESA y 58.49% en TCA) influyen directamente la generación de metano por tonelada de RSU, en el TCA se incrementa en temporada de lluvias, mientras que en los pozos de venteo del RESA fue 15% más alto en temporada de estiaje, a causa de la recirculación de lixiviados durante la misma. Las emisiones superficiales de metano en el TCA fueron 97% más bajas que en el RESA, debido a su posible dispersión en los alrededores, lo cual es un riesgo potencial que requiere atención inmediata de las autoridades.

Palabras clave: *Sitio de Disposición Final, Relleno Sanitario, Tiradero a Cielo Abierto, Metano, Residuos sólidos urbanos.*

Abstract: In Mexico, 74% of the Municipal Solid Waste (MSW) generated are disposed in Landfills, however the operating conditions reported of the landfills as well as the open dumps Sites are scarce (ODS). The objective of this study was to determine the methane generation as Greenhouse gas in a Landfill and in an ODS. For it the sites operating conditions were evaluated, the MSW disposed were characterized in wet (rainy) and dry (Dec-May) seasons, and the methane generation in venting wells and the surface emissions were determinated. In order to improve the Landfill operations, eight opportunity areas were detected and environmental problems of the ODS were documented. Even though, the type of sites operation and the amount of biodegradable matter in the MSW (50.36% in Landfill and 58.49% in ODS) influence directly the methane generation per ton MSW, in ODS is increased during the wet season, while venting wells Landfill was 15% higher in the dry season due to leachate recirculation during it. The surface methane emissions in the ODS were 97% lower than in the Landfill, because of its possible spread around, which is a potential risk that requires immediate attention from the authorities.

Keywords: *Final Disposal Site, Landfill, Open Dump Site, Methane, Wastes.*

1. Introducción

América Latina y el Caribe en 2010 reportaron 588.65 millones de habitantes y una generación de RSU de 0.93 kg/hab-día, de los cuales sólo el 54.4% llegó a SDF (IERMRSUALC, 2010). La población de México ascendió a 119.5 millones de habitantes en 2015, con un crecimiento poblacional del 1.4% lo que conduce al aumento en la demanda de bienes y servicios, así como al incremento en la generación de RSU (INEGI, 2016). Estos RSU requieren de una gestión apropiada, ya que el pasivo ambiental por su confinamiento inadecuado en el país es alto. Esta disposición final se realiza tradicionalmente en RESA, los cuales llegan a la estabilización con la degradación de los residuos. El proceso de degradación genera contaminantes como lixiviados y biogás, ambos influenciados por la composición de los RSU y la operación del sitio, contribuyendo el biogás al Calentamiento Global debido a que contiene principalmente CH₄ y CO₂, ambos GEI. Conforme a lo anterior y debido a que se carece de información confiable en la mayoría de los SDF del país, el objetivo de este estudio fue determinar la generación del CH₄

en un RESA y en un TCA, con el fin servir y motivar a la revisión de la operación de sitios, la caracterización de sus RSU y la influencia de éstos en la generación de CH₄.

2. Fundamentos

La gestión de residuos sólidos urbanos en México

La falta de financiamiento e infraestructura principalmente en los municipios pequeños, es uno de los problemas que cada gobierno debe enfrentar con el fin de alcanzar una adecuada disposición de los RSU. Estos municipios, en el mejor de los casos, deben depositar sus residuos en los RESA de las ciudades cercanas, asumiendo los gastos de transporte y cuotas por disponer en sitios ajenos. En el peor de los casos terminan dejando sus RSU en TCA, provocando con esto contaminación en aire, agua y suelo. México en el año 2012, generó 42.10 millones de toneladas de RSU que fueron dispuestos en 1883 SDF, de los cuales sólo 238 eran RESA. Del total generado se confinó 74.39% en RESA y rellenos de tierra controlados, 20.62% en TAC y solo el 4.99% se recicla (OCDE-1, 2013). Es preocupante que en México el número de los tres tipos de sitios de 2000 al 2012 se haya triplicado alcanzado 1883, de los cuales 1645 fueron TCA (SEMARNAT-INECC, 2012).

Durante la operación de los SDF se deben implementar revisiones periódicas y supervisiones de operación. En México, la PROFEPA y la SEMARNAT vigilan los RESA conforme a los lineamientos establecidos en la normatividad Federal, Estatal y Local (Guía de Cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003), que se basa también en estándares internacionales. La PROFEPA solicita el monitoreo constante de los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados y del biogás, además recomienda que los RSU sean caracterizados al menos una vez al año para determinar el contenido de carbono que puede ser transformado en CH₄ y CO₂, con lo que los gobiernos municipales podrían estimar sus emisiones y tener un mayor control sobre ellos (SEMARNAT-1, 2016). Sin embargo, es difícil tener acceso a la información y en muchos casos ésta no se encuentra actualizada, además de que para los TCA se carece de datos confiables o no hay registros.

Emisiones de GEI

De acuerdo con la Organización para la OCDE la contribución mundial de las emisiones de GEI de todos los sectores entre los años 1990 y 2000, incluyendo residuos sólidos, fue de 20,973 Megatoneladas equivalentes de CO₂ (MtCO_{2e}) y de 30,523 MtCO_{2e} del 2000 a 2010 (CICC, 2006; OCDE, 2014). En México, durante el año 2010, las emisiones de GEI fueron de 748.252 MtCO_{2e} con un incremento del 33.4% en los últimos 20 años. Los sectores responsables de las

emisiones fueron: Sector energético (67.3%), Procesos Industriales (8.2%), Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (6.3%), Agricultura (12.3%) y residuos (5.9%). Este último sector incluye la descomposición de RSU en RESA y plantas de tratamiento de aguas residuales (INECC, 2012). El INE ha reportado que México podría reducir hasta 30% sus emisiones en 2020 y 53% en 2030 y, en forma particular en el sector de residuos disminuir hasta 20% en 2020 y 41% en 2030, con estrategias como el saneamiento de TCA y el aprovechamiento energético de biogás en los RESA para la generación de energía eléctrica y calórica (INE, 2010). Otra opción para reducir las emisiones de CH_4 es disminuir la FO en los RSU, para lo cual es necesario implementar programas de separación y valorización, así como incrementar la recuperación de reciclables y realizar caracterizaciones periódicas en los sitios (Hyung *et al.*, 2013).

Fuentes de generación de CH_4 en los sitios de disposición

La biodegradación de los RSU en un RESA y su generación del biogás (metanización) tiene que ver con la coordinación entre bacterias que depende a su vez de los microambientes (Czepiel *et al.*, 2003; Jokela *et al.*, 2002; Madigan *et al.*, 2004). Estos microambientes a nivel macro se identifican como factores ambientales y operacionales (Zhang *et al.*, 2008). Entre los ambientales se tienen la cantidad, características y descomposición de los RSU (constituyentes orgánicos e inorgánicos) y el clima (temperatura, precipitación pluvial, etc); mientras que los factores operacionales incluyen la compactación, tiempo de disposición (año de inicio y clausura), trituración, material de cobertura intermedia y final (características del suelo y altura), recirculación del lixiviado (humidificación) (GMI, 2012), cantidad de RSU dispuestas en una celda y su profundidad (Chen *et al.*, 2008; Wrefor *et al.*, 2000).

La generación de biogás comienza por lo general alrededor de los 6 a 8 meses de colocados los RSU y se prolonga por un lapso de 50 años después de la clausura del sitio. Aunque, es posible detectar CH_4 (a bajas concentraciones) al inicio de la biodegradación, es en la fase de fermentación acelerada donde las concentraciones de CH_4 se incrementan hasta valores entre 50 y 70 % volumen (%v/v) (Benson *et al.*, 2007). Las emisiones de CH_4 en un SDF se pueden presentar a partir de pozos de venteo, superficie y taludes con altas variabilidades espacial y temporal. En diversas partes del mundo se han realizado estudios sobre la producción de biogás a partir de puntos establecidos y/o medibles en una celda, es decir los pozos de venteo en los que se delimitan los factores que influyen en dicha generación (López, 2010; Mohammed *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2006); sin embargo, solo algunos miden las emisiones en los taludes y en la superficie de la celda. A este tipo de emisiones se les llama emisiones difusas y contribuyen con un porcentaje considerable (30 a 60%) de las emisiones totales de un sitio (Czepiel *et al.*, 2003; Barry *et al.*, 2004; Spokas *et al.*, 2003).

Cabe mencionar que los trabajos sobre emisiones difusas en RESA o en TCA son escasos (ADEME, 2008; Babilotte *et al.*, 2010). Para el caso de México, resulta preocupante que la información sea incompleta o en algunos casos el procesamiento de los datos sea lento, debido a que afecta la elaboración del Reporte Nacional de Emisiones retardando su publicación.

3. Método

Descripción de sitios de estudio

Los sitios de estudio se encuentran en el Estado de México, ubicado en el centro del país (Figura 1). El RESA se localiza cerca de una zona industrial y tiene una altitud de 2772 msnm, con clima es templado-subhúmedo (*Cwb*), una temperatura media anual de 12.0°C y una precipitación de 1225.6 mm. El RESA tiene un área total de 95,918 m² en la que se distribuyen una celda saneada y cinco celdas que cumplen con la NOM-083-SEMARNAT-2003 y tienen instalados 25 pozos (Figura 2). Las celdas 1, 2 y 3 están clausuradas, la celda 4 está en operación y la celda 5 en construcción. El RESA cuenta con dos fosas de lixiviados.



Figura 1. Ubicación del RESA y el TCA, Estado de México

El TCA se ubica en una zona agrícola y comercial y tiene una altitud de 2600 msnm (Figura 1). El clima es templado subhúmedo (*Cwb*), su temperatura media es de 13.5 ° y precipitación anual de 852.9 mm. El TCA cuenta con una celda saneada clausurada a un lado, la cual no es considerada para este estudio (Figura 2). El TCA en operación tiene un pozo de venteo y una fosa de lixiviados. La operación de los sitios se evaluó mediante la aplicación de una lista de verificación, la cual fue elaborada con base en los criterios de la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT-1, 2016). Esta lista consta de siete apartados donde cada uno de ellos contiene varias preguntas. La LV se aplicó con ayuda de los responsables de seguridad y operación de cada uno de los sitios.

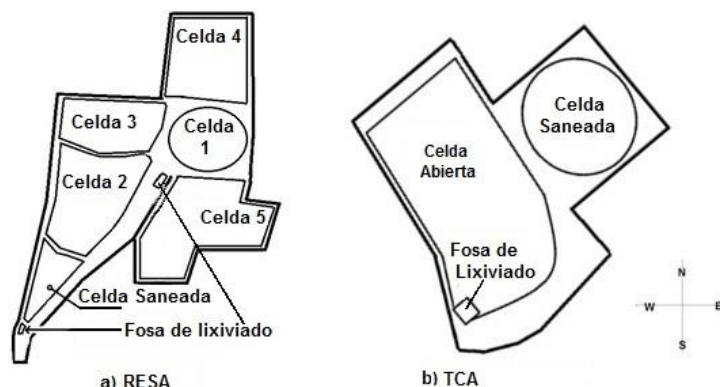


Figura 2. Sitios de Disposición Final de RSU del Estado de México; a) RESA, b) TCA

Caracterización de RSU

En el caso del RESA se eligieron las Celdas 1 y 3 para caracterizar los RSU. Se seleccionaron aleatoriamente cinco puntos en cada una de ellas con el fin de cubrir el total del área. Para el TCA se siguió el procedimiento descrito anteriormente en la celda en operación. En cada sitio se realizaron muestreos durante un año. Los RSU de los cinco puntos se depositaron en un solo lugar y se mezclaron para conformar una muestra compuesta de cada celda y mediante el método de cuarteo (NMX-AA-015-1985) se obtuvieron muestras mayores a 50 kg. Estas muestras se caracterizaron de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-022-1985. Se pesó cada subproducto y se fraccionó para formar una muestra representativa, que se analizó fisicoquímicamente. Los análisis efectuados a cada una de las muestra representativas fueron: pH (NMX-AA-013-SCFI-2006), %Hbh (NMX-AA-16-1984), SVT (Método 2540G), MO (NMX-AA-021-1985) y relación Carbono/Nitrógeno (C/N) (NMX-AA-067-1985) (APHA, 2005; SEMARNAT-1, 2016). Posteriormente los subproductos clasificados se agruparon con base a las categorías de degradación sugeridas por el Modelo Mexicano de biogás, con el fin de identificar los diferentes grados de biodegradación para éstos (SCS, 2009).

Muestreo y cuantificación de CH_4

Para el RESA se muestrearon 24 pozos de venteo de biogás y las superficies de las celdas Saneada, 1, 2 y 3. En el TCA se analizó el único pozo activo, ya que los otros pozos fueron destruidos. Para el muestreo en superficie se utilizaron cámaras estáticas de 15.08 L que se colocaron en puntos seleccionados sobre la capa superficial de cada celda. La selección

espacial de puntos se realizó con base a la metodología de la EA del Reino Unido, distribuyéndolos de un modo aleatorio simple considerando la distancia recomendada de 30 m entre punto y punto (EA, 2009; Zhang *et al.*, 2013). El muestreo y análisis del biogás se realizó en los pozos de venteo y en la superficie mediante un medidor de gases portátil GEM Modelo 2000 LANDTEC®. El análisis de biogás en pozos fue de 40 s, tiempo recomendado por el proveedor del equipo GEM portátil (LANDTEC, 2009). Las lecturas en superficie se realizaron a diferentes tiempos, iniciando la primera lectura (tiempo cero) al momento de ser instalada la cámara, las siguientes lecturas fueron cada 30 min hasta que se detectó la estabilización de la concentración de CH₄.

La generación de CH₄ en pozos representada por $F_{CH_4 \text{ pozo}}$ (g/m².h) se calculó por medio de las ecuaciones 1 y 2, donde los moles de CH₄ representadas por n_{CH_4} se estimaron con la ecuación 1, a partir de la información de cada pozo obtenida por medio del GEM portátil, donde P_{CH_4} corresponde a la presión (atm), F_{CH_4} es el flujo de CH₄ (m³/h), R corresponde a la constante de los gases (atm.m³/K.mol) y T es la temperatura (K). En la ecuación 2, PM_{CH_4} corresponde al Peso Molecular del CH₄ (g/mol), A es el área del pozo (m²) y n_{CH_4} son las moles del CH₄ (mol) calculadas con la ec. 1.

$$n_{CH_4} = P_{CH_4} * F_{CH_4} / R * T \quad (1)$$

$$F_{CH_4 \text{ pozo}} = n_{CH_4} * PM_{CH_4} / A \quad (2)$$

La generación de CH₄ en superficie representada por $F_{CH_4 \text{ sup}}$ (g/m².h) se calculó por medio de las ecuaciones 3 y 4. Primero se calculó con la ecuación 3 el volumen de CH₄ simbolizado por V_{CH_4} (L), donde V_{camp} es el volumen de la campana (L) y Y_{CH_4} es la fracción de CH₄ en el biogás. Con el volumen calculado se obtuvo el número de moles del CH₄ a partir de la ecuación de los gases ideales, convirtiendo moles a gramos mediante el peso molecular CH₄, para posteriormente calcular el $F_{CH_4 \text{ sup}}$ con la ecuación 4, donde $\Delta masa$ (g) es la diferencia de la masa final e inicial del CH₄ acumulado en la campana, Δt es la diferencia de tiempo entre el inicio y la estabilización de la lectura (h) y A_{camp} es el área de la campana (m²).

$$V_{CH_4} = V_{camp} * Y_{CH_4} \quad (3)$$

$$F_{CH_4 \text{ sup}} = \Delta masa / \Delta t * A_{camp} \quad (4)$$

4. Resultados y discusión

Operación de los sitios de disposición final

El concentrado de los resultados obtenidos de la aplicación de la Lista de Verificación y sus observaciones se presentan en la Tabla 1. El RESA empezó a recibir RSU desde 1989 operando inicialmente como un TCA. En el 2003 una empresa privada comenzó las actividades de saneamiento, recuperación y regularización del sitio. Una vez saneado, se construyeron celdas conforme a la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, operándose la celda 1 de 2008 a 2009, la celda 2 de 2010 a 2011 y la celda 3 de 2012 a 2014.

Tabla 1. Evaluación de condiciones de operación conforme a la Lista de Verificación para el RESA y el TCA

Sitio	RESA	Áreas de Oportunidad	TCA	Áreas de Oportunidad
Categoría	A		C	
Proyecto Ejecutivo y Evaluación	100%	No encontradas	0 %	No se cuenta con Proyecto Ejecutivo y evaluación de impacto ambiental
Restricción para ubicación del sitio	100%	No encontradas	0 %	No se tiene estudio previo de la ubicación, se encuentra dentro de un área protegida, distancia mínima a un desarrollo urbano
Estudios y análisis previos para la selección del sitio	100%	No encontradas	0 %	No se cuenta con estudios geológico (fallas, fracturas) e hidrológico
Estudios y análisis previos en el sitio	90%	No se determinaron inicialmente características estratigráficas	0 %	No se cuenta con estudios geológicos e hidrogeológicos
Estudios de generación y composición	80%	No se realiza balance hídrico del lixiviado	0 %	No realizan estudios de generación y composición de RSU, lixiviados y biogás
Características constructivas y operativas del sitio	70%	No garantiza la extracción del biogás, no cuenta con área de emergencia, cuenta con programa de control de fauna nociva pero no se controla, los residuos se cubren cada que se alcanza la altura de la terraza, no se conoce el grado de estabilización de los residuos	20%	No garantiza la extracción del biogás, no realiza la quema del biogás, no cuenta con área de emergencia en casos de eventualidad, no controla la fauna nociva, los residuos no se cubren y no se conoce el grado de estabilización de los residuos
Clausura del sitio	95%	No cuenta aún con programa de monitoreo posclausura	0 %	No cuenta con programa de monitoreo posclausura y plan de uso posclausura para el sitio
Cumplimiento Total %	91%		3%	

El RESA recibe en promedio 650 toneladas por día (t/d) de RSU, los cuales se vierten en el frente de tiro, donde los segregadores primarios (pepenadores) separan los materiales susceptibles de recuperación (cartón, PET, metal, vidrio). A continuación, los RSU son compactados a 830 kg/m^3 mediante un equipo marca CAT, modelo 816F. Las celdas tipo RESA (celdas 1-5) tienen un recubrimiento inferior que está constituido por tres capas impermeables, la primera está compuesta por material arcilloso con un espesor de 0.30 m compactado al 90% de la prueba Proctor, la segunda consiste de una geomembrana de polietileno de alta densidad de 1.5 mm de espesor y la tercera capa sirve de protección a la geomembrana y está compuesta por 0.20 m de material arcilloso compactado al 85% de la prueba Proctor (SEMARNAT-1, 2009; EPA, 2000).

A la celda en operación eventualmente se le coloca cobertura diaria y la cobertura intermedia se instala una vez que la terraza alcanza una altura promedio de 7 m, altura dentro del rango recomendado de 4-10 m por la ISWA (GMI, 2012). Los materiales utilizados en la base y superficie de la celda (corona y taludes) son del mismo tipo de suelo del sitio (tobas arcillosas y arcillo-arenosas), los cuales ayudan a prevenir infiltraciones, la dispersión de los RSU, la generación de malos olores y la fauna nociva. Para el manejo de lixiviados se cuenta con cárcamos y drenes colectores que los dirigen a las dos fosas de lixiviados (Figura 2).

En el RESA se recirculan lixiviados una vez por semana con una pipa de 8000 L, los cuales se vierten en coronas, taludes y caminos de acuerdo a la capacidad existente en las fosas y a las necesidades propias de humidificación. Los pozos de venteo son tubos de PVC rodeados con una estructura de piedras en la parte superior, para que a su vez el biogás pueda ser quemado y/o utilizado en un futuro para la generación de energía eléctrica. La ubicación de los pozos tiene un radio de influencia de 25 m. Conforme a la evaluación realizada, el RESA alcanzó una puntuación promedio del 91 %, destacando como áreas de oportunidad las categorías de Estudios previos al sitio, Estudios de generación y composición y, Características constructivas y operativas del sitio.

En cuanto al TCA, inició operaciones alrededor del año 1980 (comentario personal del encargado del sitio). Durante este año el TCA fue cercado con malla ciclónica, la cual fue destruida por falta de seguridad, posteriormente ocurrieron conatos accidentales de incendios y la destrucción de los pozos de venteo. La celda Saneada a un lado de la Celda abierta actualmente no tiene pozos y está cubierta por montículos de tierra de teyolote de una mina ubicada a un costado del sitio. La Celda abierta ubicada al sur-poniente del TCA inició su operación en 1995 y finalizó en enero del 2014. Actualmente solo existe un pozo de venteo fracturado de los cinco instalados inicialmente, debido a que los otros fueron destruidos por descuido con maquinaria que eventualmente compactaba los RSU. Los lixiviados tanto de la Celda Saneada y como de Celda abierta fluyen a la única fosa del sitio. El TCA carece de infraestructura para el control de ingreso de los RSU, no cuenta con báscula de pesaje y no son

compactados ni cubiertos con suelo. No cuenta con drenes perimetrales que impidan la infiltración de los escurrimientos pluviales a las celdas y se perciben olores desagradables, así como fauna nociva, principalmente perros, roedores e insectos (moscos, moscas, pulgas y escarabajos). Como puede observarse en la tabla 1, el TCA es un sitio que requiere atención de las autoridades, ya que al no existir ningún tipo de control representa un riesgo a la salud para las comunidades aledañas a corto plazo.

Caracterización de RSU

La Tabla 2 concentra la caracterización en porcentaje de los RSU de los sitios estudiados. Cabe mencionar que por cuestiones de operación del RESA, la Celda 1 solo se muestreó en temporada de estiaje y con fines comparativos se presenta la caracterización de la Celda 2 realizada por Delgado (2013). Comparando los subproductos orgánicos entre los dos sitios, el TCA tiene una mayor cantidad (58.49%) que el RESA (50.39%), lo cual se debe a que se encuentra en un área agrícola y el RESA está cercano a una zona industrial.

De acuerdo a las categorías propuestas por el Modelo Mexicano de biogás (SCS, 2009), los subproductos de degradación muy rápida (1) del RESA duplican prácticamente (25.79%) el valor de los del TCA (11.66%); por el contrario, el TCA triplica (21.90%) los subproductos de degradación moderadamente rápida (2) al RESA (6.85%). Para los subproductos de degradación moderadamente lenta (3) y subproductos de degradación lenta (4), el TCA presentó mayor porcentaje (24.93%) que el RESA (17.75%). Las diferencias anteriormente descritas corroboran lo reportado por Zhang *et al.* (2013) en cuanto al efecto de los factores propios de cada zona, resaltando en este trabajo el efecto de las actividades económicas. De manera particular, la Celda 3 del RESA en temporada de lluvias es la que presentó mayor porcentaje de subproductos orgánicos (58.74%), seguida de la Celda 2 (50.10%). La Celda 3 tiene diferencias insignificante en la composición de residuos orgánicos de degradación muy rápida (1) entre las temporadas de estiaje y lluvias, donde el promedio de ambas temporadas (26.28%) representa un valor inferior a la media nacional (37.97%) y a la media mundial (43.32%) (SCS, 2009; OCDE, 2014).

Tabla 2. Caracterización física de RSU (Muestreo temporadas húmeda 2013 y estiaje 2014)

Sitio	RESA (%)					TCA (%)			² Sub- categorías Modelo Mexicano
	Celda 1	Celda 2	Celda 3		Promedio General	TCA		Promedio General	
	Estiaje	¹ Estiaje	Lluvias	Estiaje		Lluvias	Estiaje		
Subproducto	2014	2012	2013	2014		2013	2014		

Comida	0.98	3.7	5.47	5.11	3.82	4.36	2.34	3.35	(1)
Otros Orgánicos	17.89	21.9	17.48	18.33	18.90	1.68	5.80	3.74	(1)
Pañales (20% orgánico / 80% inorgánico)	2.12	3.9	3.10	3.06	3.05	7.54	1.60	4.57	(1)
Papel Higiénico	2.12	3.9	3.10	3.06	3.05	15.09	3.94	9.52	(2)
Poda (jardines)	1.36	3.6	7.24	3.02	3.81	1.95	22.80	12.38	(2)
Textiles	5.70	2.8	4.54	4.47	4.38	2.04	7.35	4.70	(3)
Papel y Cartón	11.58	9.2	16.79	10.56	12.03	9.39	12.43	10.91	(3)
Madera	1.61	0.7	0.75	0.81	0.97	12.34	2.28	7.31	(4)
Caucho, Piel, Huesos y Paja	0.09	0.3	0.27	0.83	0.37	2.17	1.85	2.01	(4)
Metales	1.32	1.8	0.96	1.64	1.43	1.09	3.09	2.09	(i)
Construcción y Demolición	4.86	6.1	1.28	4.86	4.28	1.80	2.66	2.23	(i)
Vidrio y Cerámica	2.46	4.7	2.59	3.21	3.24	4.17	2.79	3.48	(i)
Plásticos	46.33	15.2	27.55	27.60	29.17	25.89	26.49	26.19	(i)
Otros Inorgánicos	1.56	22.1	8.89	13.37	11.48	10.48	4.56	7.52	(i)

¹ Delgado, (2013); ² SCS, 2009

Orgánicos: (1) Degradación muy rápida: Comida, Otros Orgánicos (material orgánico difícil de ser identificado por su tamaño y textura) y 20% de Pañales; (2) Moderadamente rápida (Poda y Papel Higiénico); (3) Moderadamente lenta (Papel y Cartón y, Textiles) y (4) Degradación lenta (Madera, Caucho, Piel, Huesos y Paja).

Inorgánicos: (i) Metales, 80% de Pañales, Construcción y Demolición, Vidrio y Cerámica, Plástico y Otros Inorgánicos (cabello, piedras y cenizas).

El mayor porcentaje de subproductos de degradación moderadamente rápida (2) y de degradación moderadamente lenta (3) lo tiene la celda 3 con 8.21% y 18.18% respectivamente. La mayor cantidad de subproductos (1.70%) de degradación lenta (4) y de inorgánicos (56.53%) la presenta la celda 1, que es la celda de mayor antigüedad, lo que confirma que la degradación de su fracción orgánica tipo (1) ha sido mayor. Como se dijo anteriormente, los factores ambientales y operacionales influyen en la biodegradación de los RSU y la generación de CH₄ (Czepiel *et al.*, 2003; Jokela *et al.*, 2002; Madigan *et al.*, 2004).

El alto contenido de humedad en la temporada de lluvias es notorio en ambos sitios (Tabla 3). La Celda abierta del TCA presenta un valor de humedad atípico (2.53%) en comparación con los encontrados en temporada de lluvias en el mismo sitio y en el RESA, además de los

reportados por Zhu *et al.*, (2009) que oscilan entre 40%Hbh y 55%Hbh, lo anterior se debe a que este sitio lleva diez meses que no recibe RSU y los ahí vertidos no se han removido, cubierto ni compactado.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de RSU

Sitio	RESA				TCA	
	Celda 1	Celda 2 ¹	Celda 3		Celda abierta	
Parámetro	Estiaje	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias 2013	Estiaje
	2014	2012	2013	2014		2014
pH	7.80 ±1.11	8.94 ±0.16	7.50 ±0.09	6.77 ±0.07	7.90 ±0.05	7.34 ±0.07
SVT(%)	54.53 ±8.25	46.18 ±17.37	58.68 ±11.47	56.50 ±5.55	84.97 ±4.03	60.09 ±6.16
Hbh (%)	29.40 ±8.04	25.29 ±0.16	38.74 ±1.09	15.35 ±2.19	40.99 ±3.12	2.53 ±0.16
N (%)	ND	0.78 ±0.012	0.85 ±0.019	0.68 ±0.016	0.90 ±0.021	0.58 ±0.013
C/N	ND	14.52	15.35	28.18	24.80	25.70
MO	ND	19.56 ±1.37	22.50 ±1.21	33.04 ±1.03	38.49 ±1.08	35.7 ±1.05
fácilmente oxidable (%)						

ND. No determinado, ¹ Delgado, (2013).

Los valores de pH, SVT y Hbh que se determinaron en el RESA son similares en las Celdas 1 y 3, sin embargo en la Celda 2 se obtuvo un pH básico y menor cantidad de SVT, así como de MO (Tabla 3), lo que se atribuye al tipo de residuos recibidos en esa temporada, ya que esta celda que recibió más porcentaje de Otros Inorgánicos (Tabla 2).

Generación de CH₄ en pozos de venteo

En promedio, en ambos sitios se detectó una emisión mayor de CH₄ en pozos que en superficie, sin embargo cada celda tiene particularidades, tabla 4.

En la Tabla 4 se muestran los promedios de generación en pozos de cada celda. El máximo valor en el RESA supera el 50%v/v de CH₄ en varios de sus pozos, valor característico de la biodegradación metanogénica acelerada (Benson *et al.*, 2007; Mor *et al.*, 2006), sin embargo en promedio cada celda presenta un valor inferior al 40%v/v con excepción de la Celda 1 (42.21%v/v) en temporada de lluvias. Las lecturas obtenidas evidencian que la infiltración de lixiviados y agua de lluvia hacia los RSU a través de la cobertura final y la cantidad de MO, hacen que se incremente significativamente la biodegradabilidad (Mohammed *et al.*, 2009;

Zhang *et al*, 2013). En el resto de pozos, las lecturas de CH_4 van desde 5%v/v hasta 25%v/v, lo que revela una biodegradación no homogénea, resultado de una menor infiltración en ciertas zonas de los lixiviados recirculados mediante riego en la superficie de las celdas ya que se detectaron en algunos pozos obstrucciones por lixiviados (taponeamiento).

La Celda Saneada del RESA en temporada de lluvias presentó una generación menor de CH_4 que en estiaje (Tabla 4), que puede deberse a la compactación de las partículas del suelo y a la obstrucción de los poros en la superficie por el agua que recibe, de tal manera que se limita su infiltración. Aunado a lo anterior esta celda tiene una altura de aproximadamente 20 m y las Celdas 2 y 3 están sobrepuestas en parte de ella. Las Celdas 1 y 2 mostraron un comportamiento acorde a las temporadas muestreadas y a la composición de los RSU ahí dispuestos, determinándose mayor generación de CH_4 en lluvias que en estiaje.

En la Celda 3 el muestreo y caracterización de biogás en temporada de lluvias se realizó durante su operación (disposición continua de RSU), detectándose una menor generación que en estiaje (Tabla 4), lo que puede atribuirse a que en lluvias la emisión de CH_4 se dispersó por los alrededores de la celda, mientras que en estiaje las mediciones se hicieron con esta celda ya cubierta con suelo, lo que ayudó a dirigir el biogás a los pozos, contabilizando así una mayor emisión de CH_4 .

En promedio la generación en pozos de venteo en temporada de lluvias fue $579.90\text{E-}7 \text{ kg/m}^2\text{h}$ para el RESA y $71.60\text{E-}7 \text{ kg/m}^2\text{h}$ para el TCA (Tabla 5). Durante estiaje, los niveles fueron $668.23\text{E-}7 \text{ kg/m}^2\text{h}$ y $8.18\text{E-}7 \text{ kg/m}^2\text{h}$ respectivamente. En lo que respecta al TCA, los resultados de CH_4 corroboran que este sitio es más joven que el RESA, sin embargo, la baja generación detectada de CH_4 del único pozo puede ser consecuencia de la fauna nociva (perros y ratas) que requieren de alimento, lo que reduce la materia orgánica en los RSU y permite la infiltración del aire.

Tabla 4. Emisión de CH_4 en pozos y superficie durante temporadas de lluvias y estiaje

Sitio de disposición	Celda	RSU (t)	Temporada de lluvias, 2013			Temporada de estiaje, 2014		
			Pozos		Superficial	Pozos		Superficial
			(% v/v)	($\text{kgCH}_4/\text{m}^2\text{h}$)	($\text{kgCH}_4/\text{m}^2\text{h}$)	(% v/v)	($\text{kgCH}_4/\text{m}^2\text{h}$)	($\text{kgCH}_4/\text{m}^2\text{h}$)
RESA	Saneada	545,500	16.68	2.27	ND	28.00	14.73	$80.0\text{E-}7$
	1	250,000	42.21	54.09	$18.0\text{E-}7$	36.12	51.58	$0.02\text{E-}7$
	2	290,000	30.30	25.04	ND	21.82	16.60	$79.00\text{E-}7$
	3	480,000	12.71	9.38	ND	31.19	24.83	$13.00\text{E-}7$
TCA	Saneada	NR	PI	PI	NC	PI	PI	NC
	Abierta	394,200	15.00	2.82	$2.00\text{E-}7$	6.70	0.32	$0.16\text{E-}7$

ND: No Determinado; NR: No Reportado; NC: No Cuantificado; PI: Pozos Inhabilitados.

Generación de Metano en superficie

Las cámaras en el RESA fueron instaladas principalmente sobre la corona y los caminos de las celdas y en el TCA se ubicaron en la parte poniente del sitio sobre los RSU y sobre la superficie de la Celda Saneada (Figura 2). Las bajas emisiones detectadas, pueden atribuirse a la compactación de los RSU y a que el suelo de cobertura en las celdas cumple su función (SEMARNAT, 2009). Tomando en cuenta los promedios de las emisiones en superficie y en pozos de venteo por tonelada de RSU, en el RESA fue menor en temporada de lluvias que en estiaje, ya que en esta última temporada fue mayor la recirculación de lixiviados y por consecuencia se incrementó la humedad y la MO (Benson *et al.*, 2007; Wrefor *et al.*, 2000).

Cabe mencionar que en el año 2013 se registró una alta precipitación pluvial en ciertas partes del país, dentro de estas se encuentra el municipio donde está ubicado el RESA, lo que provocó erosión en un costado de la Celda Saneada y Celda 2. Esto también debido a que el ángulo del talud es de 2:1, superior a lo recomendado por la ISWA (Laner *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2006). Resultado de lo anterior se originó una grieta, que se extendió sobre 60 m desde la parte superior de la Celda 3 hacia abajo, llegando a la superficie de la Celda Saneada. A lo largo de esta grieta se hicieron mediciones con tres campanas, cuantificando en promedio una emisión de $23.7\text{E-}6 \text{ kg/m}^2\text{h}$, que es 13 veces superior a la emisión superficial detectada. De aquí la importancia del mantenimiento que debe darse al material de cobertura de las celdas, para evitar que las emisiones difusas contribuyan con valores altos de GEI.

En la Tabla 5 se muestra el promedio pesado de la generación de los dos sitios en el periodo de muestreo. Respecto a las emisiones en superficie, en la temporada de lluvias fue $7.08\text{E-}10 \text{ kg/m}^2\text{h}$ y $0.42\text{E-}10 \text{ kg/m}^2\text{h}$ para el RESA y TCA respectivamente y en estiaje fue $11.00\text{E-}10 \text{ kg/m}^2\text{h}$ y $0.040\text{E-}10 \text{ kg/m}^2\text{h}$ respectivamente.

Tabla 5. Generación de CH_4 por tonelada de RSU (promedio pesado)

Sitio de disposición	Temporada de lluvias, 2013		Temporada de estiaje, 2014	
	Pozos	Superficial	Pozos	Superficial
	kg CH_4 / m^2h t RSU	kg CH_4 / m^2h t RSU	kg CH_4 / m^2h t RSU	kg CH_4 / m^2h t RSU
RESA	579.90E-7	7.08E-10	668.23E-7	11.00E-10
TCA	71.60E-7	0.42E-10	8.18E-7	0.040E-10

Las bajas emisiones detectadas superficialmente en el TCA son indicio de su dispersión por los alrededores, ya que la mayoría de los RSU no tienen cobertura intermedia y final. Estas emisiones se pueden considerar insignificantes en comparación de los valores que reporta y Chiemchaisri & Visuanathan (2008), de $8.33\text{E-}4$ a $3.91 \text{ gCH}_4/\text{m}^2\text{h}$; sin embargo no debe perderse de vista que en México el 87% del total de los sitios registrados son sitios que no

tienen control total o son TCA y como lo muestra la concentración detectada en pozos, existe degradación anaeróbica ya que las concentraciones del CH_4 van de 6 a 15%v/v (Tabla 4) y a que se reporta que los índices de explosividad van de 4.5 a 14.5% (PEMEX, 2016).

Con respecto a la Celda Saneada del TCA, las emisiones fueron nulas, lo que puede atribuirse a la edad de la celda que excede los 29 años, además del suelo de cobertura compactado y que actualmente en la corona existen montículos de teyolote que cubren el total de la superficie.

5. Conclusiones

La aplicación de la Lista de Verificación ayudó a detectar áreas de oportunidad en el RESA. En el TCA la Lista de Verificación resaltó la necesidad de que las autoridades responsables de este sitio tomen acciones para reducir el impacto al medio ambiente y a las comunidades aledañas, para disminuir el pasivo ambiental y promuevan el manejo adecuado de los RSU para incrementar el reciclaje de residuos valorizables.

Las diferentes composiciones de RSU en las celdas del RESA son muestra de la variación que puede existir en un mismo SDF. La variabilidad en la composición determinada entre los sitios de la misma zona geográfica de este estudio se atribuye a las actividades particulares de la región en la que está localizado cada sitio. Lo anterior, resalta la importancia de realizar caracterizaciones periódicas a los RSU, con el fin de obtener estimaciones con menor grado de incertidumbre.

Las caracterizaciones realizadas muestran proporciones interesantes de materiales susceptibles de ser recuperados para su reciclaje, con lo que se reduciría sobre el 40% de los RSU dispuestos.

La generación y las emisiones detectadas de CH_4 se vieron influidas por las temporadas estacionales y por las particularidades de cada celda (antigüedad y composición de los RSU, condiciones de operación, recirculación de lixiviados, entre otras). De las emisiones superficiales, el RESA tiene en promedio $7.08\text{E-}10 \text{ kg/m}^2\text{h}$, lo cual puede ser considerado despreciable comparado con la generación en pozos, destacando que se debe evitar la existencia de grietas, ya que podrían elevar las emisiones más de 13 veces a las detectadas en superficie.

En el TCA fueron mayores las emisiones superficiales en temporada de lluvias, las cuales a pesar de presentar valores pequeños, muestran la necesidad de implementar un programa de saneamiento y seguimiento del sitio.

El monitoreo del biogás permitió tener mayor certeza de la contribución de GEI de los sitios de disposición estudiados, lo cual es relevante para mejorar su operación, contemplar su aprovechamiento y reducir su impacto al ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Toluca, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a la Empresa Mantenimiento y Servicios Ambientales (MASERA) y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el apoyo brindado para el desarrollo del presente estudio.

Referencias

- ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, Field Comparision of methods for Landfill Fugitive methane emissions measurement, Convention ADEME; 2008. 07-74-C0034.
- APHA. Standard Methods for Water and Wastewater Examination 21st ed. American Public Health Association-American Water Works Association, Water Environment Federation Publication, Washington, DC. USA, 2005.
- Babilotte A., Lagier T., Fiani E., Taramini V., Fugitive Methane Emissions from Landfills: field Comparision of Five Methods on a French Landfill. Journal of Environmental Engineering©ASCE; 2010. 777-784.
- Barry, D., Gregory, B., Harries, C., Minimizing methane emissions from MSW landfill, Atkins Environment, UK 2004.
- Benson C. H., Barlaz M. A., Lane D. T., Rawe J. M., Practice review of five bioreactor/recirculation landfills, Waste Manage; 2007. 27:13-29.
- Chen Y., Cheng Jay J., Creamer Kurt S., Inhibition of anaerobic digestion process: A review, Bioresource Techonology; 2008. 99:4044-4064.
- Chiemchaisri C., Visvanathan C., Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand, Journal of the Air and Waste Management Association; 2008. 58:628-635.
- CICC, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, Hacia una estrategia nacional de acción climática. SEMARNAT, México, D.F, 2006.
- Czepiel, P., Shorter, J., Mosher, B., Allwine, E., McManus, J., Harriss, R., Kolb, C., Lamb, B, "The influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions". Waste Manage; 2003. 23(7): 593-598.
- Delgado-Hernández Claudia. Estudio de parámetros fisicoquímicos en lixiviados recirculados en residuos sólidos urbanos. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Toluca, Metepec, Estado de México, Agosto 2013.

- EA, Environment Agency. How to comply with your environmental permit Additional guidance for: Landfill (EPR 5.02), GEHO0209BP JD-E-E, 2009.
- EPA, Environmental Protection Agency, Landfill Manuals, Landfill Site Design, Ireland 2000.
- GMI, Global Methane Initiative, Solid Waste Disposal Site Design and Operational Considerations, Chapter 2, International Best Practices Guide for LFGE Projects-2012.
- Hyung Kim Mi, Byul Song Han, Song Yuleum, Jeong In Tae and Wk Kim Jung, Evaluation of food waste disposal options in terms of global warming and energy recovery: Korea. International Journal of Energy and Environmental Engineering; 2013, 4:1.
- INE, Instituto Nacional de Ecología, Potencial de mitigación de GEI en México al 2020 en el contexto de la cooperación internacional; 2010, México, DF.
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; 2012. Available at <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/new:consultaPublicacion:php>. México. DF.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Estadísticas Nacionales; 2016. Available at <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/default.aspx?tema=P>, Población. México, D. F.
- IERMRSUALC, Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos Urbanos en ALC 2010, IDB-MG-115; 2010, AIDIS-001/2011.
- Jokela, J.P.Y., R.H. Kettunen, J.A. Rintala. "Methane and leachate pollutant emission potential from various fractions of municipal solid waste (MSW): Effects of source separation and aerobic treatment". Waste Manage Res; 2002. 20:424-433.
- Laner D., Fellner J., Brunner Paul H., Flooding of Municipal solid waste landfills-An environmental hazard?, Sci Total Environ; 2009. 407:3674-3680.
- LANDTEC, 2009. GEM2xxx Instruments Operation Manual, Gas Analyzer & Extraction Monitors. www.LANDTECNA.com
- López Martínez Ana, Cuantificación de emisiones difusas mediante cámara de flujo en un vertedero de residuos urbanos. Universidad de Valladolid, REDISA (Red de Ingeniería de Saneamiento Ambiental), ISBN:978-85-7745-589-8, 2010. Joao Pessoa- PB, Brasil, 08 a 19 de Septiembre.
- Madigan, M.T., J.M. Martinko y J. Parker. Brock, Biología de los microorganismos. Décima edición. Pearson Educación, S.A. Madrid, España, 2004.
- Mohammed F. M. A., Noor E. A. B., Abdul A. H. K., Review on Landfill Gas Emission to the Atmosphere. European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X; 2009. 30(3):427-436.
- Mor Suman, Ravindra Khaiwal, De Visscher Alex, Dahiya R. P., Chandra A., Municipal Solid Waste Characterization and its assessment for potential methane generation: A case study.

- Sci Total Environ; 2006. 371:1-10.
- OCDE, Organization for Economic Co-operation and Development, 2014. Available at <http://www.oecd.org/>
- OCDE-1, Organization for Economic Co-operation and Development; 2014b, Country Reviews, 25-06-2014, <http://www.oecd.org/env/country-reviews/>.
- PEMEX, Hoja de Seguridad para sustancias químicas, PEMEX, Gas y Petroquímica básica, 2016.
- SCS Engineers, Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0. SCS Engineers Phoenix, AZ 85008. Contrato de EPA No. EP – W -06-023, 2009. Actividad 30. Landfill Methane Outreach Program. Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA).
- SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2009, Manual de Especificaciones Técnica para la construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME), Dirección de Manejo Sustentable de Residuos Sólidos, Contrato DGRMIS-DCA-DGFAUT-No. 018/2009.
- SEMARNAT-1, Secretaria de Medioambiente y Recursos Naturales, Marco Jurídico del Sector Medio Ambiente, 2016. Available at <http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/Pages/nmx-residuos.aspx>. México. D.F.
- SEMARNAT-INECC, 2012. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos.
- Spokas K., Graff C., Morcet M., Aran C., Implications of spatial variability of landfill emission rates on geospatial analyses. Waste Manage; 2003. 23:599-607.
- Wang-Yao K., Towprayoon S., Chiemchaisri Ch., Gheewala Sh. H., Nopharatana A., Seasonal Variation of Landfill Methane Emissions from Seven Solid Waste Disposal Sites in Central Thailand, 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE2006); 2006. Bangkok, Thailand.
- Wrefor, K.A., J.W. Atwater., L.M. Lavkulich, The effects of moisture inputs on landfill gas production and composition and leachate characteristics at the Vancouver Landfill Site at Burns Bog. Waste Manage Res; 2000. 18:386-392.
- Zhang Houhu, Pinjing He, Liming Shao, Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation, Atmospheric Environment; 2008. 42:5579-5588.
- Zhang Houhu., Yan Xiaofei, Cai Zucong., Zhang Yi, Effect of rain fall on the diurnal variations of CH₄, CO₂, and N₂O fluxes from municipal solid waste landfill, Sci Total Environ; 2013. 442:73-76.
- Zhu Baoning, Gikas Petros, Zhang Ruihong, Lord James, Jenkins Bryan, Li Xiujin, Characteristics and biogas production potential of municipal solid wastes pretreated with a rotary drum reactor, Bioresource Technology; 2009. 100:1122-1129.