

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS EN EL RELLENO DE TIERRA DE  
MORELIA, MICHOACÁN”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**PRESENTA**

**CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ RAZO**

**DIRECTOR DE TESIS**

**Dr. OTONIEL BUENROSTRO DELGADO**

**MEXICALI, B. C.**

**DICIEMBRE DE 2012.**

# INDICE

|  | Paginas   |
|--|-----------|
| <b>Resumen</b>   | <b>1</b>  |
| <b>Abstract</b>  | <b>3</b>  |
| <b>1 Introducción</b>  | <b>4</b>  |
| 1.1 Degradación anaerobia de la materia orgánica de los RSU      | 5         |
| 1.2 Factores que influyen en la degradación anaerobia de los RSU | 8         |
| 1.3 Problemática ambiental de los GEI                            | 9         |
| 1.4 Modelos para estimar la producción de biogás                 | 9         |
| 1.4.1 Modelo de descomposición de primer orden, FOD              | 11        |
| 1.4.2 Modelo de emisión LanGEM                                   | 13        |
| 1.4.3 Modelo Mexicano de Biogás (versión 2.0)                    | 14        |
| 1.5 Parámetros asociados a los modelos                           | 16        |
| 1.5.1 Potencial de generación de metano, $L_0$                   | 16        |
| 1.5.2 Índice de generación de metano, $k$                        | 21        |
| 1.6 Situación actual de las emisiones de biogás en México        | 25        |
| <b>2 Antecedentes</b>  | <b>27</b> |
| 2.1 Estimaciones de producción de biogás en otros países         | 28        |
| 2.2 Estimaciones de producción de biogás en México               | 34        |
| <b>3 Planteamiento del Problema</b>                              | <b>38</b> |
| <b>4 Justificación</b>   | <b>39</b> |
| <b>5 Objetivos</b>   | <b>40</b> |
| 5.1 General  | 40        |

|   | <b>Paginas</b> |
|---|----------------|
| 5.2 Específicos   | 40             |
| <b>6 Hipótesis</b>  | <b>41</b>      |
| <b>7 Materiales y Métodos</b>   | <b>42</b>      |
| 7.1 Descripción del área de estudio   | 42             |
| 7.2 Muestreo y caracterización de RSU   | 42             |
| 7.3 Análisis fisicoquímico en las muestras de RSU   | 45             |
| 7.4 Análisis de biogás en el sitio de estudio   | 45             |
| 7.5 Determinación matemática de $L_0$   | 46             |
| 7.6 Determinación matemática de k   | 47             |
| 7.6.1 Despeje de k en la ecuación 1.24  | 47             |
| 7.6.2 Método a prueba y error asignando valores a k en la ecuación 1.24                         | 48             |
| 7.7 Valores de $L_0$ y k establecidos en el modelo mexicano de biogás                           | 48             |
| 7.8 Estimación de la emisión de metano utilizando el Modelo<br>Mexicano de Biogás (Versión 2.0) | 48             |
| 7.9 Análisis estadístico de los datos   | 50             |
| 7.9.1 Análisis de varianza  | 50             |
| 7.9.2 Prueba de Tukey   | 50             |
| <b>8. Resultados y Discusión</b>  | <b>52</b>      |
| 8.1 Muestreo y Caracterización de RSU   | 52             |
| 8.2 Análisis fisicoquímico en las muestras de RSU   | 59             |
| 8.3 Análisis de biogás en el sitio de estudio   | 64             |
| 8.4 Determinación matemática de $L_0$   | 68             |

|   | <b>Paginas</b> |
|---|----------------|
| 8.5 Determinación matemática de k   | 73             |
| 8.5.1 Despeje de k en la ecuación 1.24  | 75             |
| 8.5.2 Método a prueba y error asignando valores a k en la ecuación 1.24   | 75             |
| 8.6 Valores de $L_0$ y k establecidos en el Modelo Mexicano de Biogás   | 78             |
| 8.7 Estimación de la emisión de $CH_4$ utilizando el Modelo Mexicano de Biogás (Versión 2.0)                                | 79             |
| 8.8 Análisis estadístico de los datos   | 84             |
| 8.8.1 Análisis de varianza  | 84             |
| 8.8.2 Prueba de Tukey   | 84             |
| <b>9 Conclusiones</b>   | <b>87</b>      |
| <b>10 Recomendaciones</b>   | <b>90</b>      |
| <b>11 Bibliografía</b>  | <b>91</b>      |
| <b>12 Anexo 1</b>   | <b>98</b>      |
| Métodos para la determinación del potencial hidrógeno (pH), humedad, sólidos totales (ST), cenizas y sólidos volátiles (SV) | 98             |

## Índice de Tablas

| <b><u>Tabla</u></b>   | <b><u>Página</u></b> |
|---|----------------------|
| 1.1. Valores de $L_0$ determinados en algunos RESA de México  | 17                   |
| 1.2. Valores de $L_0$ utilizados en el Modelo Mexicano de Biogás, versión 2.0                           | 17                   |
| 1.3. Valores de MCF sugeridos por SCS Engineers, 2009   | 19                   |
| 1.4. Valores de F por cuadrante y sitio   | 20                   |
| 1.5. Valores de k obtenidos de mediciones experimentales a partir de Modelos por pruebas teóricas       | 22                   |
| 1.6. Valores de k en la región 2, Oeste (SCS Engineers, 2009)   | 25                   |
| 1.7. Composición de biogás en distintos RESA de México (% v/v)  | 26                   |
| 7.8. Número de pozos perforados y tubos de venteo en cada cuadrante del RTC                             | 43                   |
| 7.9. Valores de $t_{1/2}$ para la zona de estudio   | 47                   |
| 7.10. Factores de operación en el RTC de Morelia  | 49                   |
| 8.11. Composición de las muestras de RSU en 16 pozos del RTC de Morelia (% peso fresco)                 | 52                   |
| 8.12. Composición promedio por cuadrante en muestras de RSU en el RTC de Morelia (% peso fresco)        | 53                   |
| 8.13. Composición promedio en muestras de RSU (% Peso fresco)   | 55                   |
| 8.14. Componente orgánico e inorgánico promedio en las muestras del RTC de Morelia (%) por pozo         | 56                   |
| 8.15. Capacidad de degradación de los RSU en el RTC de Morelia (%)                                      | 57                   |
| 8.16. Componente Orgánico por categoría de degradación de RSU, por cuadrante y promedio en el sitio (%) | 58                   |

| <b><u>Tabla</u></b>  | <b><u>Página</u></b> |
|--|----------------------|
| 8.17. Parámetros físicos promedio de temperatura, pH y<br>Humedad en las muestras del RTC de Morelia por pozo  | 59                   |
| 8.18. Parámetros físicos promedio de materia orgánica e inorgánica<br>en las muestras de RSU de Morelia (%) por pozo                                 | 60                   |
| 8.19. Parámetros fisicoquímicos en las muestras de RSU del RTC<br>de Morelia por Cuadrante   | 60                   |
| 8.20. Resultados promedio de las emisiones de biogás en el RTC<br>de Morelia (% v/v)   | 64                   |
| 8.21. Resultados promedio de las mediciones de biogás en el RTC<br>de Morelia, por cuadrante (% v/v)   | 65                   |
| 8.22. Resultados promedio por tubo de venteo del flujo emitido a 10 metros<br>en el RTC de Morelia (m <sup>3</sup> /año) durante el muestreo en 2011 | 67                   |
| 8.23. Contenido de DOC por cuadrante (fracción peso húmedo)  | 69                   |
| 8.24. Contenido de DOCf por cuadrante (fracción)   | 69                   |
| 8.25. Contenido de DDOCm (Mg)  | 70                   |
| 8.26. Potencial de generación de metano por cuadrante y sitio<br>en m <sup>3</sup> /Mg (peso húmedo)   | 70                   |
| 8.27. Contenido de BFW por cuadrante y sitio (fracción peso seco)  | 71                   |
| 8.28. Contenido de Cm por cuadrante y sitio en m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Ton RSU (peso seco)   | 71                   |
| 8.29. Potencial de generación de CH <sub>4</sub> por cuadrante y sitio en<br>m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Ton RSU (peso seco)                     | 73                   |
| 8.30. Índice de generación de CH <sub>4</sub> , k por cuadrante y sitio (año <sup>-1</sup> )   | 75                   |

| <b><u>Tabla</u></b>   | <b><u>Página</u></b> |
|---|----------------------|
| 8.31. Índice de generación de CH <sub>4</sub> , k por cuadrante y sitio de acuerdo con los valores de vida media (año <sup>-1</sup> ) | 75                   |
| 8.32. Índice de generación de CH <sub>4</sub> , k por prueba y error (año <sup>-1</sup> )   | 76                   |
| 8.33. Valores de L <sub>0</sub> y k calculados en el RTC de Morelia   | 77                   |
| 8.34. Valores de k y L <sub>0</sub> por categoría de degradación en el RTC de Morelia   | 78                   |
| 8.35. Proyección de la generación de biogás y recuperación en el RTC de Morelia   | 80                   |
| 8.36. Resultados del ANOVA sobre las variables fisicoquímicas por cuadrante   | 84                   |
| 8.37. Comparaciones de las medias de temperatura con respecto al cuadrante  | 85                   |
| 8.38. Comparaciones de las medias de Cenizas y SV con respecto al cuadrante   | 85                   |
| 8.39. Comparaciones de las medias del componente orgánico e inorgánico con respecto al cuadrante                                      | 86                   |
| 8.40. Comparaciones de las medias de CH <sub>4</sub> con respecto al cuadrante  | 86                   |

## Índice de figuras

| <b><u>Figura</u></b>  | <b><u>Página</u></b> |
|---|----------------------|
| 7.1. RTC del municipio de Morelia, Michoacán  | 43                   |
| 8.2. Comparación entre el % de SV y materia orgánica en muestras de RSU del RTC de Morelia, por cuadrante                   | 63                   |
| 8.3. Emisión de CH <sub>4</sub> durante el periodo de muestreo por cuadrante  | 65                   |
| 8.4. Emisión de CH <sub>4</sub> (% v/v) por mes en el RTC de Morelia  | 66                   |
| 8.5. Flujo promedio de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /año) en el RTC de Morelia durante el muestreo de 2011 por cuadrante | 68                   |
| 8.6. Generación actual de CH <sub>4</sub> calculado en el RTC de Morelia  | 81                   |



## Acrónimos y abreviaciones

|                  |   |
|------------------|---|
| RSU              | Residuos Sólidos Urbanos                                  |
| INEGI            | Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática |
| RESA             | Relleno Sanitario   |
| RTC              | Relleno de Tierra Controlado                              |
| GEI              | Gases de Efecto Invernadero                               |
| CH <sub>4</sub>  | Metano  |
| CO <sub>2</sub>  | Dióxido de Carbono  |
| O <sub>2</sub>   | Oxígeno   |
| N <sub>2</sub>   | Nitrógeno   |
| H <sub>2</sub> S | Anhídrido Sulfuroso                                       |
| CO               | Monóxido de Carbono                                       |
| NH <sub>3</sub>  | Amonio  |
| AGV              | Ácidos Grasos Volátiles                                   |
| pH               | Potencial Hidrógeno                                       |
| SEMARNAT         | Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales        |
| IPCC             | Panel Internacional sobre Cambio Climático                |
| USEPA            | Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos   |
| FOD              | Método de Descomposición de Primer Orden                  |
| LandGEM          | Modelo de emisión de gas en un sitio de disposición       |
| DOC              | Carbono Orgánico Degradable                               |
| k                | Índice de Generación de Metano                            |

|                  |  |
|------------------|--|
| L <sub>0</sub>   | Potencial de Generación de Metano                                |
| W                | Humedad  |
| DOCf             | Carbono Orgánico Degradable Asimilado                            |
| DDOCm            | Carbono Orgánico Degradable Disuelto Depositado                  |
| MCF              | Factor de Corrección de Metano                                   |
| F                | Fracción volumétrica de metano en el biogás generado en el sitio |
| Q                | Emisión de biogás  |
| N                | Número de años de disposición de los residuos                    |
| Q                | Índice de generación específico del metano                       |
| MAP              | Precipitación Media Anual  |
| MAT              | Temperatura Media Anual  |
| PET              | Evapotranspiración Potencial                                     |
| Mg; ton          | Toneladas  |
| VOC              | Compuestos Orgánicos Volátiles                                   |
| SV               | Sólidos Volátiles  |
| ST               | Sólidos Totales  |
| MW               | Megawatt   |
| SECOFI           | Secretaria de Comercio y Fomento Industrial                      |
| BFw              | Fracción Biodegradable de los residuos como una unidad           |
| Cm               | Potencial de generación de la materia orgánica de los residuos   |
| t <sub>1/2</sub> | Tiempo de vida media de los residuos                             |





## Resumen

Las estimaciones de las emisiones de biogás que produce un sitio de disposición de residuos sólidos urbanos (RSU) se realizan con base en modelos matemáticos, cuyos insumos principales son los valores del índice de generación de metano en l/año ( $k$ ) y el potencial de generación de metano en  $m_3$ /año ( $L_0$ ); sin embargo, en México, la incertidumbre en las estimaciones es alta, ya que estos parámetros han sido calculados con base en datos de generación y composición de los RSU y de condiciones climáticas, tecnológicas y de consumo distintas. El objetivo del presente trabajo fue establecer  $L_0$  y  $k$ , utilizando distintas ecuaciones matemáticas con la finalidad de optimizar las estimaciones de emisión de metano ( $CH_4$ ) en sitios de disposición de RSU. La investigación se realizó en el Relleno Controlado de Morelia (RTC) clausurado de Morelia, Michoacán. Se analizaron las variables físicas (temperatura, humedad), químicas (pH, cenizas, sólidos totales y volátiles) y de composición de muestras de RSU de 16 pozos, clasificados en cuatro cuadrantes, de acuerdo con el tiempo de confinamiento de los RSU; se midieron el volumen y el flujo del biogás durante un año y cuatro meses respectivamente. Los resultados presentan una diferencia estadística en la composición y los SV de los RSU en los diferentes pozos, lo cual indica diferentes niveles de degradación, además se observó una producción y composición diferencial del biogás. Los resultados de la aplicación del Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 y las mediciones en el sitio de estudio difieren, siendo más bajas las proyecciones del primero. Con respecto al cálculo de  $L_0$ , la aplicación de la ecuación propuesta por Lobo (2003), dio una  $L_0$  menor con respecto al Modelo Mexicano. El mismo caso se presentó en el cálculo de la constante  $k$ , ya que los métodos empleados dieron resultados diferentes, con lo cual este trabajo corrobora la necesidad de ampliar la medición de



biogás en los sitios de disposición nacionales, a efecto de mejorar el cálculo de las constantes  $k$  y  $L_0$  y precisar su producción de biogás.

*Palabras Clave:* composición, índice, potencial, generación, biogás, metano.



## Abstract

Estimates of biogas emissions produced by disposition site of municipal solid waste (MSW) are based on mathematical models, whose main inputs are the values of methane generation rate ( $k$ ) in l/year and the potential methane generation ( $L_0$ ) in  $m^3$ /year. However, in Mexico, the uncertainty about these estimates is high, since these parameters have been calculated based on data from different generations and compositions of MSW, and climatic, technological and consumption conditions. The goal of this work was to establish  $L_0$  and  $k$ , using diverse mathematical equations in order to optimize methane ( $CH_4$ ) emission estimates in MSW disposal sites. The research was conducted in the closed landfill (RTC) in Morelia, Michoacán. We analyzed the physical variables (temperature, humidity), chemical (pH, ash, total and volatile solids) and composition of MSW samples from 16 wells, classified into four quadrants in accordance with the confinement time of MSW; the volume and flow of biogas were measured for one year and four months respectively. The results show a statistical difference in the composition and the SV of MSW in different wells, indicating different levels of degradation of the organic matter; a differential production and composition of biogas were also showed. The results of the application of the Mexico Landfill Gas Model Version 2.0 and measurements of biogas in the study site differed, being lower projections of  $CH_4$  production with the above. With respect to the calculation of  $L_0$ , applying the equation proposed by Lobo (2003), gave a lower result of  $L_0$  regarding Mexican Model. Similar results were calculating the constant  $k$ , since the methods gave different results. This study supports the need to extend the measurement of biogas into the national disposition site in order to improve the constants  $k$  and  $L_0$  and clarify the production of biogas our country.

*Key words:* composition, index, potential, generation, biogas, methane.



## 1 Introducción

La situación por la que atraviesa México en los últimos años con respecto a la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) conlleva una serie de afectaciones al ambiente. A pesar de que la legislación mexicana presenta regulaciones ambientales bien definidas con una clara reglamentación sobre un manejo adecuado, la falta de presupuesto, la aplicación o el desconocimiento de las leyes ambientales ocasionan impactos ambientales y riesgos en la salud pública, pues no se llevan a cabo las medidas adecuadas con respecto a su control. La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, en el artículo 3 fracción XIX, define el término impacto ambiental como la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza (LGEEPA, 2005). En México, se estima una generación de RSU de 34.6 millones de toneladas con un 87% de residuos recolectados, de los cuales el 64% se envía a Rellenos Sanitarios (RESA) y 21 sitios controlados y el resto se deposita en tiraderos a cielo abierto o sitios sin control (PNPGIR 2009-2012, 2009).

Cuando en un RESA no tiene sistemas adecuados de captación del biogás se ocasionan afectaciones al ambiente, debido a que sus principales componentes son Gases de Efecto Invernadero, GEI (IPCC, 2006). El biogás se define como una mezcla gaseosa, resultado del proceso de descomposición anaerobia de la parte orgánica de los RSU (Wang-Yao et al., 2004; SEMARNAT, 2003). Su proceso de generación ocurre cuando los residuos son tapados con una capa de material de cobertura dentro de las labores que se llevan a cabo en los sitios de disposición final., En este escenario se desarrollan condiciones de anoxia y posteriormente de anaerobiosis, favoreciendo el desarrollo de la actividad metanogénica (Robles, 2008). Generalmente estos gases se componen de 40 a 60% de metano ( $\text{CH}_4$ ), 30 a 50% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), 0 al



2% de oxígeno (O<sub>2</sub>) y 0 al 10% nitrógeno (N<sub>2</sub>), así como ciertos gases en niveles traza como el anhídrido sulfuroso (H<sub>2</sub>S) y monóxido de carbono (CO) (Qian et al., 2001).

## 1.1 Degradación anaerobia de la materia orgánica de los RSU

El proceso de la degradación anaerobia de la parte orgánica de los RSU involucra cuatro fases (Ehrig, 1983; Tchobanoglous et al., 1994; Herrero, 1999; Robles, 2008), que corresponden a:

### 1. *Hidrólisis*

Los microorganismos que comprenden grupos aerobios o anaerobios facultativos y metabólicos intermedios, liberan exoenzimas que hidrolizan los biopolímeros sólidos de alto peso molecular como polisacáridos, lignina, proteínas, ácidos nucleicos y lípidos, generando peptonas, aminoácidos, cetoácidos, azúcares simples, ácidos orgánicos y alcoholes. En algunos casos, ciertos polímeros de baja solubilidad como las grasas, limitan la acción hidrolítica enzimática del sustrato.

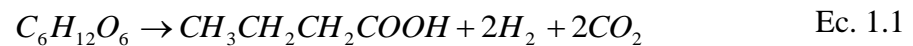
### 2. *Acidogénesis*

Posteriormente se presenta un grupo de bacterias acidogénicas, caracterizadas por ser anaerobias estrictas y facultativas; estas últimas consumen el oxígeno residual del medio y lo llevan a la anaerobiosis completa. A la par se realizan una serie de reacciones bioquímicas para convertir los ácidos grasos de cadena larga a corta por *B*-oxidaciones sucesivas; este proceso involucra la transformación de un ácido de *n* carbonos en uno de *n*-2 carbonos, de los cuales los ácidos con números impares de carbonos, originan acetatos y propionatos, mientras que los ácidos grasos de número par producen acetatos únicamente. El tipo de ácidos grasos formados en esta etapa por reacciones de desaminación, transaminación y descarboxilación, dependen del tipo de aminoácidos y de las especies de bacterias presentes. Por su parte, los aminoácidos

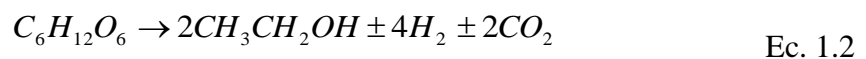


producto de la proteólisis, son degradados en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  y ácidos grasos volátiles (AGV). Los AGV incluyen ácidos carboxílicos como acético, valérico, propiónico y butírico. Si no son degradados durante la fase de acetogénesis, éstos se acumulan progresivamente, lo que trae consigo una disminución del potencial Hidrógeno (pH) del sustrato, una vez que su efecto amortiguador es rebasado. Esta acidificación puede ser la causa de la inhibición en el desarrollo de los microorganismos acetogénicos y metanogénicos, debido a que ambos crecen en un medio neutro. Por último los azúcares son degradados en alcoholes siguiendo la vía de la glicólisis.

El proceso bioquímico de acidogénesis se puede describir mediante la ecuación 1.1.



También pueden acompañarse por una fermentación alcohólica de acuerdo con la ecuación 1.2.



### 3. Acetogénesis

Las bacterias acetogénicas están conformadas por grupos de tres poblaciones distintas. Por un lado, cuando la presión de hidrógeno es baja existen las bacterias fermentativas que producen alcoholes, gas carbónico, hidrógeno y acetato principalmente. Por otro lado, se encuentran las bacterias productoras obligadas de hidrógeno, que degradan los AGV y alcoholes como el etanol en acetato. Por último están las bacterias homoacetogénicas, que producen acetato a partir de azúcares o de la mezcla  $\text{H}_2/\text{CO}_2$ ; sin embargo, esta vía de formación es poco significativa en comparación con la metanogénesis. Debido a la existencia de microambientes en el seno

del medio de fermentación, tanto los microorganismos formadores como los consumidores de hidrógeno pueden coexistir.

Las ecuaciones 1.3, 1.4 y 1.5 describen en forma general el proceso de acetogénesis, a partir del ácido propiónico, butírico y etanol respectivamente (Alexander, 1980).



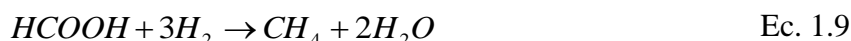
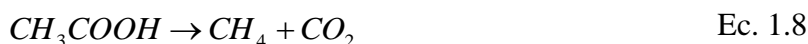
#### 4. *Metanogénesis*

En esta fase, compuestos como el ácido acético y el metanol, son transformados en gas carbónico y en  $CH_4$  en condiciones estrictas de anaerobiosis. De acuerdo con Barlaz (1997), los sustratos más comunes para las bacterias Archaea, son el acetato y la mezcla  $H_2/CO_2$ , las cuales presentan un crecimiento de cinco a seis veces más lento que el de las bacterias acidógenas. Comprenden dos grupos: las acetoclásticas, las cuales metabolizan el acetato, metanol, metilaminas y la mezcla  $H_2/CO_2$  y las hidrogenófilas que utilizan como sustrato el formiato utilizando la mezcla  $H_2/CO_2$ .

Los otros sustratos posibles son el formiato, el metanol y aminas o sulfuros metilados. Se presenta también la conversión del lactato en metano, el cual es más rápidamente consumido que el acetato.

En reactores, la conversión del acetato es la principal vía de producción de  $CH_4$ , las ecuaciones 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9 describen la fase de la metanogénesis a partir de diversos sustratos (Alexander, 1980):





En condiciones anaerobias óptimas, la metanogénesis presenta una producción débil de  $H_2$ ,  $N_2$  y  $H_2S$ .

## 1.2 Factores que influyen en la degradación anaerobia de RSU

Los parámetros fisicoquímicos y biológicos que mayor influencia tienen sobre la actividad microbiana en la biodegradación anaerobia incluyen la humedad, pH, temperatura, demanda química de oxígeno, así como el tiempo de confinamiento y composición de los residuos (Yilmaz et al., 2003).

En un RESA, generalmente se degradan en su totalidad los residuos alimenticios y aproximadamente dos terceras partes del papel y cartón, mientras que en otros materiales es incompleta (Gendebien et al., 1992). Si alguna parte de la materia orgánica es insoluble en el proceso de la hidrólisis, puede ser un factor limitante en toda la digestión (Yilmaz et al., 2003).

Existen otros factores que indirectamente intervienen en los procesos de degradación de los RSU de un sitio con respecto a otro, por lo que se debe tener precaución al momento de su interpretación en términos de valores anuales. Los factores son las labores de manejo de los RESA, el uso de diferentes tecnologías o reglamentaciones, el clima y sus variaciones estacionales, la precipitación, regiones diferentes y diversidad en los estilos de vida (IPCC, 2006; Chiemchaisri et al., 2007).

### **1.3 Problemática ambiental de los GEI**

Los GEI se producen de manera natural en el ambiente, no obstante la producción antropogénica durante los últimos veinte años, ha incidido en un aumento del 70% de su concentración en la atmósfera, debido principalmente a la industrialización de materias primas para la obtención de alimentos así como la inadecuada disposición de RSU en sitios no controlados (IPCC, 2007).

La Agencia para la Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en Ingles), estimó que los RESA de este país aportaron aproximadamente el 22% de las emisiones globales del CH<sub>4</sub> durante el periodo de 2000 al 2006. Por este motivo, su producción no controlada, representa un riesgo para las poblaciones circunvecinas a los RESA y para el ambiente por el aumento en su concentración atmosférica (USEPA, 2008).

Hoy en día, varias dependencias gubernamentales han considerado la necesidad de conocer las emisiones de CH<sub>4</sub> en los distintos sitios de disposición de RSU, ya que no obstante del impacto ambiental, se puede aprovechar como carburante en calderas y turbinas para generar electricidad, debido al alto poder calórico (Hernández et al., 2006).

### **1.4 Modelos para estimar la producción de biogás**

Actualmente la implementación de sistemas de monitoreo del biogás, implica un alto costo económico, lo cual incide en que no haya suficiente información al respecto. La disponible, resulta insuficiente o no es aplicable, ya que son bases de datos obtenidas de mediciones parciales y de sitios con condiciones diferentes, por lo que se han propuesto modelos de producción de biogás con carácter predictivo que permiten prever el eventual comportamiento bajo diferentes escenarios.



En la actualidad, diversos grupos académicos tales como Attenborough et al., 2002; Scharff and Jacobs, 2006 o Thompson et al., 2008 y agencias gubernamentales (USEPA, 1998) han elaborado diversos modelos matemáticos para estimar la cantidad de biogás que se produce en un RESA. Por un lado, se incluyen cálculos estequiométricos de las reacciones de descomposición anaeróbica de la parte orgánica de los RSU que proveen el máximo teórico de generación y por otro, estimaciones cinéticas que proporcionan información de los procesos de sus índices de producción de biogás (Paraskaki, 2005). Existen modelos como el First Order Model (TNO), Multi-phase Model (Afvalzorg), GasSim, EPER model France, EPER model Germany, EPER model Belgium, Scholl Canyon, Triangular, de Palos Verdes, GASFILL, LFGGEN, Sheldon Arleta, Equilibrio de Masas, el modelo de descomposición de primer orden (FOD), y los modelos que promueve la USEPA y SCS Enginners, como el LandGEM, el modelo colombiano de biogás o el Mexicano de Biogás versiones uno y dos, los cuales varían unos con respecto a otros por las condiciones climáticas consideradas en cada uno de ellos. Los modelos propuestos se clasifican generalmente de acuerdo con las ecuaciones de degradación de cero, primer y segundo orden, polifásicos o una combinación de éstos, cuya diferencia radica en la velocidad de degradación de la parte orgánica (representada como  $n$ ) (USEPA, 2005).

Los resultados de los modelos de cero orden no son confiables debido a errores relativamente más altos; en cambio, modelos de orden superior tienen menos errores cuando se comparan con resultados datos medidos en campo, aunado a que el aumento de primer a segundo orden hace de la modelación un procedimiento más complicado debido a que no se justifica la precisión del aumento (Oonk et al., 1994). Con base en diversos estudios se ha determinado que los modelos de primer orden son los más representativos para estimar la producción de biogás. Su valor de  $n$  es igual a uno, lo



que significa que la velocidad de degradación no es constante, asumiendo una declinación en la producción de  $\text{CH}_4$  con el paso del tiempo (Scharff and Jacobs, 2006).

Los modelos más comunes son los que promueve el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en Inglés) y la USEPA por ser los que permiten establecer una estimación más exacta en los RESA y por su simplicidad para utilizarlos. Por un lado, existe el modelo de descomposición de primer orden (FOD, por sus siglas en Inglés) del IPCC (2006) y el modelo de emisión de gas en un sitio de disposición (LandGEM) de la USEPA (2005), que considera el efecto de la antigüedad de los RSU. De este modelo se desprendió una variante denominada Modelo Mexicano de Biogás que se estableció en el 2003, cuya segunda versión se presentó en el 2009.

#### **1.4.1 Modelo de descomposición de primer orden**

El modelo de descomposición de primer orden FOD se basa en la premisa de que el Carbono Orgánico Degradable (DOC por sus siglas en inglés) de los RSU se descompone paulatinamente a lo largo de unos cuantos años, durante los cuales se forman el  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . Durante los primeros años posteriores a la disposición de los RSU, las emisiones serán más altas y luego decrecerán en los años siguientes a medida que el DOC sea consumido por las bacterias degradadoras (IPCC, 2006).

Para estimar la producción de  $\text{CH}_4$ , el modelo FOD utiliza datos sobre disposición y composición de RSU específicos, tipos de sitios y parámetros que incluyen el potencial de generación de  $\text{CH}_4$  ( $L_0$ ) o en su defecto, el contenido de DOC, la vida media de los RSU y/o la fracción que llega a descomponerse ( $\text{DOC}_f$ ). El DOC en los RSU puede calcularse a partir de valores específicos del Carbono Degradable para los distintos tipos y/o materiales de los RSU (alimentos, papel, madera, textiles, etc.) mediante la ecuación 1.10:



$$DOC = \sum_i (DOC_i \cdot W_i) \quad \text{Ec. 1.10}$$

Donde:

$DOC$  = Carbono Orgánico Degradable en los RSU, Gg C/Gg residuos (fracción)

$DOC_i$  = DOC en los residuos de tipo  $i$  (fracción)

$W_i$  = Residuo específico  $i$  (específico)

La base para calcular las emisiones de  $CH_4$  es la cantidad de Carbono Orgánico Degradable Disuelto Depositado (DDOC<sub>m</sub>) que se define como la parte del carbono orgánico que se degrada en condiciones anaeróbicas en los sitios de disposición. El  $DOC_f$  es la fracción estimada de carbono que se degrada y libera realmente en un RESA bajo condiciones anaerobias, es dependiente de muchos factores tales como la humedad, temperatura y composición de RSU (IPCC, 2006).

Para determinar la cantidad de  $CH_4$  que se forma a partir del DDOC<sub>m</sub> en descomposición se utiliza la ecuación 1.11:

$$CH_4 \text{ generador} = DDOC_m \text{ descomp}_T \cdot F \cdot 16/12 \quad \text{Ec. 1.11.}$$

Donde:

$CH_4 \text{ generador}_T$  = Cantidad de metano generado a partir del material en descomposición

$DDOC_m \text{ descomp}_T$  = DDOCM descompuesto para generar metano durante el año de muestreo  $T$ , (Gg)

$F$  = Fracción volumétrica de metano en el gas generado en el sitio (fracción)

$16/12$  = Constante estequiométrica producto de la división de pesos



moleculares  $\text{CH}_4/\text{C}$

La ecuación 1.11 no estima de manera segura la cantidad de  $\text{CH}_4$  generado durante el primer año de disposición de RSU. Cuando se conoce la cantidad de RSU degradables dentro de los RESA en la primera estimación, cada año puede considerarse como el año 1 para el método (el modelo puede ajustar las fechas al comienzo de las reacciones a la fecha indicada posterior a la disposición).

Durante el 2006, el IPCC desarrolló una hoja de cálculo simple utilizando el modelo FOD con base en las ecuaciones 1.10 y 1.11 citadas anteriormente, para calcular la cantidad de DOC que se descompone en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  cada año, la cual proporciona dos opciones para estimar las emisiones a partir de los RSU. La primera opción es un modelo por fases múltiples basado en datos sobre la descomposición de la parte orgánica de los RSU (alimenticios, de jardín, papel, cartón, madera, textiles, etc.) cuyas cantidades se registran de manera separada. La segunda opción es un modelo por fase única basado en la cantidad total de los RSU.

El modelo es bastante simple de usar, pero es estático. Asume que los residuos depositados en un año se convierten en biogás y que el  $\text{CH}_4$  producido se emite el mismo año. De esta manera, si la cantidad de RSU depositados está en crecimiento, tendrá un efecto inmediato en el modelo, a pesar del hecho de que puede tomar algunos años antes de que la producción de  $\text{CH}_4$  llegue a su máximo (Borjesson et al., 1997a).

#### **1.4.2 Modelo de emisión LandGEM**

El modelo LandGEM está basado en una ecuación cinética de primer orden considerando que la parte orgánica de los RSU disminuye exponencialmente después del primer año de su disposición, lo que resulta en la generación de  $\text{CH}_4$ . Se emplea la ecuación 1.12 (USEPA, 1998):



$$Q = 2 \sum_{i=1}^n k L_0 M_i e^{-k t_i} \quad \text{Ec. 1.12}$$

Donde:

$Q$  = Emisión total de metano en Mg/año ó  $\text{m}^3/\text{año}$

$n$  = Número de años de disposición de los residuos

$k$  = Índice de generación de metano recíproca en años (1/año)

$L_0$  = Potencial de generación de metano ( $\text{m}^3/\text{Mg}$ )

$M_i$  = Peso de RSU dispuestos en el año  $i$  (Mg)

$t_i$  = Tiempo de los residuos depositados en el año  $i$  (años)

Para efectuar los cálculos de la cantidad de biogás generado, considera una serie de datos de entrada al modelo como son los datos históricos de disposición, la cantidad o el índice de generación anual de los RSU, la capacidad y diseño del RESA, fecha de apertura,  $k$  y  $L_0$ .

Para sitios donde se conocen los índices de disposición de RSU, el modelo estima las emisiones anuales de biogás, en una proporción de un 50 % de  $\text{CH}_4$  y 50 % de  $\text{CO}_2$  con respecto al volumen. El máximo en la generación de biogás normalmente ocurre en el año de clausura o el siguiente.

### 1.4.3 Modelo Mexicano de Biogás (Versión 2.0)

El modelo Mexicano de Biogás versión 2.0, estima los índices de producción y recuperación de  $\text{CH}_4$  para sitios de disposición final en México para un año en específico. Fue desarrollado por la USEPA en el 2009, con base en la primera versión elaborada en el 2003. Está elaborado en una hoja de cálculo de Excel basado en una ecuación exponencial de primer orden. El modelo utiliza 4 valores de la constante  $k$

como en el modelo FOD del IPCC y para calcular los índices de emisión emplea la ecuación 1.13 (SCS Engineers, 2009):

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad \text{Ec. 1.13}$$

Donde:

$Q_{LFG}$  = Máximo expectativo de generación del índice de flujo de LFG ( $\text{m}^3/\text{año}$ )

$i$  = Incremento en tiempo de 1 año

$n$  = Año de cálculo – año inicial de disposición de los residuos

$j$  = Incremento en tiempo de 0.1 por año

$k$  = Tasa de generación de  $\text{CH}_4$  (1/año)

$L_0$  = Capacidad potencial de generación de  $\text{CH}_4$  ( $\text{m}^3/\text{Mg}$ )

$M_i$  = Masa de residuos sólidos dispuestos en el año  $i^{\text{th}}$  (Mg)

$t_{ij}$  = Edad de la  $j^{\text{th}}$  sección de la masa de residuos  $M_i$  dispuestos en el año  $i^{\text{th}}$  (años decimales)

$MCF$  = Factor de Corrección de metano

$F$  = Factor de ajuste de incendios

El modelo requiere que el usuario ingrese los datos de un sitio en específico, desde la apertura y clausura, la cantidad de RSU dispuestos anualmente, localización y condiciones de operación del sitio. El modelo proporciona valores predeterminados de  $k$  y  $L_0$  para cada estado de la república mexicana y estima la eficiencia de captura usando datos específicos de 5 regiones climáticas que comprenden al Noroeste y Norte Central, Noreste, Centro, Oeste y el Suroeste mexicano; utiliza datos de caracterización de residuos de 40 ciudades que abarcan a 18 estados y el distrito federal., además, evalúa información de los índices de recuperación reales de biogás de los RESA de Mérida,



San Nicolás en el estado de Aguascalientes, Ciudad Juárez y Simeprodeso en Monterrey.

## 1.5 Parámetros asociados a los modelos

Para estimar la cantidad de  $\text{CH}_4$  que se genera en un RESA, los modelos utilizan las siguientes variables:

### 1.5.1 Potencial de generación de metano ( $L_0$ )

Representa la cantidad máxima de  $\text{CH}_4$  el cual puede ser generado de una cantidad fija de residuos, dado un periodo de tiempo infinito para su descomposición (SCS Engineers, 2009). Depende de los siguientes factores (Barlaz et al., 1990):

- Composición orgánica de los residuos,
- Biodegradabilidad (celulosa y hemicelulosa),

Generalmente  $L_0$  se expresa como el volumen de  $\text{CH}_4$  en  $\text{m}^3/\text{Mg}$  de RSU. Se puede estimar con base en estudios de producción real de gas en experimentos de laboratorio o en campo que sirvan como datos de entrada al modelo (IPCC, 2006). Algunos estudios basan la generación de  $L_0$  en la composición química de los RSU que pueden llegar a dar el potencial máximo absoluto; sin embargo, en realidad, nunca se llegaría a alcanzar este potencial debido a la inaccesibilidad de ciertos componentes de la parte orgánica, a la biodegradación y a la probable producción de otros compuestos derivados del carbono no metanogénicos. De acuerdo con la EPA los valores de  $L_0$  se encuentran entre 6.2 y 270  $\text{m}^3/\text{Mg}$  de RSU (EPA, 1991). La tabla 1.1 muestra valores de  $L_0$  de algunos sitios de disposición en México.



**Tabla 1.1.** Valores de  $L_0$  determinados en algunos RESA en México

| Sitios de disposición de RSU       | $L_0$ (m <sup>3</sup> /Mg) | Año  |
|------------------------------------|----------------------------|------|
| Chihuahua <sup>a</sup>             | 63.2                       | 2005 |
| Queretaro <sup>a</sup>             | 73.1                       | 2005 |
| SIMEPRODESO Monterrey <sup>b</sup> | 95.4                       | 2007 |
| Mexicali <sup>c</sup>              | 79.529                     | 2009 |
| Ensenada <sup>c</sup>              | 89.371                     | 2009 |

Fuente: <sup>a</sup>SCS Engineers, 2005; <sup>b</sup>LFG Consult, 2007; <sup>c</sup>Aguilar et al., 2011.

El Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0, considera valores predeterminados de  $L_0$  para cada uno de los 31 estados y el Distrito Federal en México los cuales se derivaron de la caracterización promedio de residuos de 40 ciudades (incluyendo 3 RESA en la Ciudad de México) que representan 18 estados y el Distrito Federal (SCS Engineers, 2009). Los valores de  $L_0$  utilizados por el Modelo se muestran en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2.** Valores de  $L_0$  utilizados en el Modelo Mexicano de Biogás, versión 2.0

| Categoría de degradación de RSU | Sureste | Oeste | Centro | Noreste | Noroeste |
|---------------------------------|---------|-------|--------|---------|----------|
| Muy Rápida                      | 69      | 69    | 69     | 69      | 69       |
| Moderadamente Rápida            | 115     | 126   | 138    | 138     | 149      |
| Moderadamente Lenta             | 214     | 214   | 214    | 214     | 214      |
| Muy Lenta                       | 202     | 202   | 202    | 202     | 202      |

Fuente: SCS Engineers, 2009

Para calcular  $L_0$  se emplean diversas ecuaciones matemáticas; como es el caso de la ecuación 1.14 que se toma como referencia para calcular las emisiones de CH<sub>4</sub> con el modelo FOD (IPCC, 2006):

$$L_0 = DDOCm \cdot F \cdot 16/12 \quad \text{Ec. 1.14}$$

Donde:

$DDOCm$ = Carbono Orgánico Degradable Disuelto depositado, Mg

$F$ = Fracción de metano en el biogás generado en el sitio (fracción de volumen)

El valor de  $DDOC_m$  se calcula con la ecuación propuesta en IPCC, 2006 (ecuación 1.15) que considera los valores del DOC,  $DOC_f$  y MCF.

$$DDOC_m = DOC \cdot DOC_f \cdot MCF \quad \text{Ec. 1.15.}$$

Donde:

$DOC$ = Carbono Orgánico Degradable durante el año de disposición, Gg de C/Gg de residuos (fracción)

$DOC_f$ = Carbono Orgánico Degradable Asimilado (fracción)

$MCF$ = Factor de Corrección de metano (fracción)

El valor del DOC (fracción peso húmedo) se obtiene con la ecuación del IPCC, 1996 (ecuación 1.16), reportado en los trabajos de Thompson et al., 2009 e IIE, 2007:

$$DOC = (0.4)(A) + (0.17)(B) + (0.15)(C) + (0.30)(D) \quad \text{Ec. 1.16}$$

Donde:

$A$ = Fracción de RSU que corresponde a papel, cartón y textiles

$B$ = Fracción de residuos de jardín u otros residuos putrescibles

$C$ = Fracción de residuos alimenticios

$D$ = Fracción de madera y paja

En esta ecuación las unidades empleadas del DOC se expresan en fracción aunque todas ellas provienen de un porcentaje peso húmedo.

Para calcular los valores de  $DOC_f$  se utilizan las ecuaciones 1.17 (Tchobanoglous et al., 1993) y 1.18 (USEPA, 2002) que se desglosan a continuación:

$$DOCf = SVI - SVF \quad \text{Ec. 1.17}$$

Donde:

$SVI$ = sólidos volátiles iniciales

$SVF$ = sólidos volátiles finales

Los  $SVF$  no incluyen el contenido de plásticos debido a su difícil degradación y su presencia eleva los valores en una muestra resultante debido a la cantidad de sustancias fibrosas no celulósicas (Kelly et al., 2007).

$$DOCf = 0.014T + 0.28 \quad \text{Ec. 1.18}$$

Donde:

$T$ = Temperatura promedio en el sitio

El MCF es un ajuste a las estimaciones de generación de biogás establecidas en los modelos, que toma en cuenta el grado de descomposición anaeróbica, el tiempo de depósito y profundidad de los residuos en un sitio de disposición (SCS Engineers, 2009). Se asignan distintos valores al MCF, dependiendo de su manejo y tipo de RESA (Tabla 1.3).

**Tabla 1.3.** Valores de MCF sugeridos por SCS Engineers, 2009

| <b>Manejo del Sitio</b> | <b>Profundidad &lt; 5 m</b> | <b>Profundidad ≥ 5 m</b> |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Sin manejo              | 0.4                         | 0.8                      |
| Con manejo              | 0.8                         | 1                        |
| Semi-aeróbico           | 0.4                         | 0.5                      |
| Condición desconocida   | 0.4                         | 0.8                      |

Por último, cada cuadrante genera distintos volúmenes de  $CH_4$  en el área de estudio, los cuales se emplean para obtener la variable  $F$  representada como una fracción (Tabla 1.4).

**Tabla 1.4.** Valores de F por cuadrante y sitio

| Parámetro            | F (fracción de volumen) |
|----------------------|-------------------------|
| I                    | 0.41                    |
| II                   | 0.49                    |
| III                  | 0.49                    |
| IV                   | 0.45                    |
| Promedio en el sitio | 0.46                    |

Lobo (2003), la siguiente ecuación para calcular  $L_0$  (ecuación 1.19):

$$L_0 = \frac{BF_w * C_m}{1 + w} \quad \text{Ec. 1.19}$$

Donde:

$BF_w$ = Fracción biodegradable de los residuos como una unidad (fracción peso seco)

$C_m$ = Potencial de generación de  $CH_4$  ( $m^3/Mg$  de la parte orgánica de RSU peso seco)

$w$ = Contenido de humedad (fracción)

El valor de  $BF_w$  (fracción peso seco) se puede calcular con la ecuación citada en Machado et al., 2008 (ecuación 1.20):

$$BF_w = \sum_{i=1}^n BF_i * FR_i \quad \text{Ec. 1.20}$$

Donde:

$BF_w$ = Fracción biodegradable de los residuos como una unidad

$BF_i$ = Fracción biodegradable de los residuos (fracción peso seco)

$FR_i$ = Fracción de los componentes de la composición de residuos (fracción peso seco)

Por su parte, el valor de  $C_m$ , se obtuvo mediante la ecuación citada en Machado et al., 2008 (ecuación 1.21):

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^n BF_i * FR_i * C_{mi}}{BF_w}$$

### 1.5.2 Índice de generación de metano (k)

Determina el índice estimado en el cual la parte orgánica de los RSU se descompone a cierta velocidad y generan  $\text{CH}_4$  en un RESA. Describe la producción promedio de  $\text{CH}_4$  y se utiliza para extrapolar los resultados de emisión a otros sitios con características y condiciones similares. Como constante se piensa que todos los sitios de disposición final cumplen criterios en los cuales se da una estabilidad en la producción de este tipo de gases. Las unidades de k ( $\text{año}^{-1}$ ) se expresan en función de la degradación posterior a un año después de su disposición (SCS Engineers, 2009).

Según varios autores (USEPA, 2005, Scharff y Jacobs; 2006, Machado et al., 2008, Wang Yao et al., 2004, SCS Engineers, 2009), los valores de k están en función de:

- Condiciones climáticas del sitio (precipitación y temperatura),
- Contenido de humedad, temperatura pH, composición, edad y cantidad vertida anual de residuos,
- Prácticas de disposición,
- Disponibilidad de los nutrientes para la metanogénesis y,
- Tipo de sustrato.

El conjunto de estas condiciones en un RESA se optimizan con respecto a la degradación de la parte orgánica de los RSU, de tal forma que k puede incrementarse asumiendo que el remanente de  $L_0$  sea el mismo. Sin embargo, hasta la fecha han sido insuficientes los datos para cuantificar la magnitud de este aumento (USEPA, 2005). En caso de no disponer de datos de k para un sitio en particular, estos pueden adquirir valores específicos como si fueren sido medidos en campo (Paraskaki, 2005).



Respecto a las condiciones climáticas de un RESA, se consideran los patrones de la Precipitación Media Anual (MAP), Temperatura Media Anual (MAT) y la evapotranspiración potencial (PET) (Leventon, 1991, IPCC, 2006). La temperatura de los RSU está asociada a la temperatura del aire, la profundidad y los índices de generación de gas (Machado et al., 2008).

En lo que concierne a la composición de los RSU, los diversos subproductos se han catalogado con base en su índice de degradación en cierto tiempo. De tal forma, se presentan los de degradación muy rápida que incluyen a los alimenticios, lodos residuales, material fino, cenizas y el 20% del material con que se fabrican los pañales; de degradación medio rápida que consideran a los RSU de jardín (verdes) y papel higiénico; de degradación medio lenta que involucran al papel, cartón y textiles (trapo); y por último, los RSU de degradación lenta que incluyen a la madera, caucho, paja, cuero o huesos (SCS Engineers, 2009). El plástico, vidrio, metal, concreto, escombros u otros materiales inertes se consideran no biodegradables (Gregory et al., 2003; USEPA, 2002, Machado et al., 2008). Con estos datos, se han desarrollado valores de  $k$  para las distintas regiones climáticas que son dados en los modelos, los cuales varían desde 0.02 a  $0.4 \text{ años}^{-1}$  (tabla 1.5).

**Tabla 1.5.** Valores de  $k$  obtenidos de mediciones experimentales, a partir de modelos o por pruebas teóricas

| Tipo de Residuos                   |  | Zona climática                      |             |                      |             |                       |             |                                    |              |
|------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------|----------------------|-------------|-----------------------|-------------|------------------------------------|--------------|
|                                    |  | Boreal y templada (MAT $\leq$ 20°C) |             |                      |             | Tropical (MAT > 20°C) |             |                                    |              |
|                                    |  | Seco (MAP/PET < 1)                  |             | Húmedo (MAP/PET > 1) |             | Seco MAP < 1000 mm)   |             | Húmedo y seco (MAP $\geq$ 1000 mm) |              |
|                                    |  | Por defecto                         | Rango       | Por defecto          | Rango       | Por defecto           | Rango       | Por defecto                        | Rango        |
| Residuos de degradación lenta      | Papel/textiles                         | 0,04                                | 0,03 – 0,05 | 0,06                 | 0,05 – 0,07 | 0,045                 | 0,04 – 0,06 | 0,07                               | 0,06 – 0,085 |
|                                    | Madera/paja                            | 0,02                                | 0,01 – 0,03 | 0,03                 | 0,02 – 0,04 | 0,025                 | 0,02 – 0,04 | 0,035                              | 0,03 – 0,05  |
| Residuos moderadamente degradables | Residuos de jardín y parques           | 0,05                                | 0,04 – 0,06 | 0,1                  | 0,06 – 0,1  | 0,065                 | 0,05 – 0,08 | 0,17                               | 0,15 – 0,2   |
| Residuos fácilmente degradables    | Residuos alimenticios/lodos residuales | 0,06                                | 0,05 – 0,08 | 0,185                | 0,1 – 0,2   | 0,085                 | 0,07 – 0,1  | 0,4                                | 0,17 – 0,7   |
| Residuos brutos                    |  | 0,05                                | 0,04 – 0,06 | 0,09                 | 0,08 – 0,1  | 0,065                 | 0,05 – 0,08 | 0,17                               | 0,15 – 0,2   |

Fuente: IPCC, 2006.



Los valores altos de  $k$ , indican una tasa más rápida de generación de  $\text{CH}_4$  debido a condiciones de gran humedad y temperatura, así como a una mayor cantidad de RSU de degradación muy rápida. Por su parte, valores más bajos se presentan en condiciones secas y templadas con menos de 635 mm de MAP por año y materiales de degradación lenta.

A continuación se describen tres ecuaciones para obtener el valor de  $k$  por ser las que permiten obtener un resultado más eficiente sobre generación, porque involucran datos de sitios de estudio de interés y por ser aplicables a México:

El primer cálculo de  $k$  se puede llevar a cabo de acuerdo con la ecuación 1.22 (USEPA, 2004):

$$k = 3.2 \times 10^{-5}(x) + 0.01 \quad \text{Ec. 1.22}$$

Donde:

$x$  = Precipitación media anual durante el periodo de vida del sitio de disposición de los residuos.

Las condiciones de humedad dentro del RESA generalmente son difíciles de determinar por lo que son estimadas en base a la precipitación media anual (SCS Engineers, 2009).

Un segundo cálculo de  $k$  se desglosa de la ecuación 1.23, propuesta para calcular la cantidad de biogás en un RESA (USEPA, 1996):

$$LFG = 2L_0R(e^{+kc} - e^{-kt}) \quad \text{Ec. 1.23}$$

Donde:



$LFG$  = Cantidad total de biogás generado en el sitio en un año determinado ( $m^3/año$ )

$L_0$  = Potencial de generación de metano ( $m^3/Mg$  por año)

$R$  = Cantidad anual promedio de residuos depositados (Kg)

$q$  = Índice de generación específico para el metano ( $m^3/Mg$  por año)

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

$t$  = Tiempo desde la apertura del sitio (años)

$c$  = Tiempo desde la clausura del sitio (años)

A partir de esta ecuación Machado et al., (2008), proponen la ecuación 1.24 para calcular el  $CH_4$  generado en el sitio:

$$q = L_0 * k * e^{-kt} \quad \text{Ec. 1.24}$$

Donde:

$q$  = Índice de generación específico de metano ( $m^3/Mg$  por año)

$L_0$  = Potencial de generación de metano ( $m^3/Mg$  por año)

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

La diferencia entre  $q$  y  $k$  se presenta en las unidades; mientras  $q$  se expresa en  $m^3/Mg$  por año, los resultados de  $k$  se dan en una emisión del año posterior al que son reportadas.

Una tercera opción para calcular  $k$  incluye la vida media de los residuos ( $t_{1/2}$ ) (IPCC, 2006), que se define como el tiempo necesario para que la parte orgánica de los RSU se descomponga a la mitad de su masa inicial., Considera el índice de descomposición y composición de los residuos, el tipo de clima y el sitio. Para calcular  $k$  por este procedimiento se utilizó la ecuación citada en IPCC, 2006 (ecuación 1.25):

$$k = \ln(2)/t_{1/2} \quad \text{Ec. 1.25}$$

Donde:

$t_{1/2}$ =tiempo de vida media de los residuos

Otra forma de estimar k es mediante la utilización de valores asignados por categoría de degradación de los residuos para una de las 5 zonas climáticas en que el Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0, divide el país (SCS Engineers, 2009). El estado de Michoacán se encuentra ubicado en el Modelo en la región 2 Oeste, en cuya zona se emplean valores de precipitación media anual de 990 mm/año, una temperatura de 21.4°C y datos de caracterización de residuos de 5 ciudades; los valores de k para esta región se muestran en la tabla 1.6.

**Tabla 1.6.** Valores k en la región 2, Oeste (SCS Engineers, 2009)

| <b>Categorías de biodegradación</b> | <b>Año<sup>-1</sup></b> |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Muy rápida                          | 0.220                   |
| Moderadamente rápida                | 0.100                   |
| Moderadamente lenta                 | 0.040                   |
| Lenta                               | 0.020                   |

El procedimiento de la obtención de k consiste en multiplicar las categorías de biodegradación con los valores de k correspondientes a la región dos, Oeste considerada en el Modelo Mexicano. Las categorías se determinan con datos del análisis de composición de los RSU en los sitios de estudio.

## 1.6 Situación actual de las emisiones de biogás en México

En México existen 196 RESA (SEMARNAT-SNIARN, 2011), desafortunadamente, la gran mayoría de estos sitios, no cuentan con sistemas de monitoreo y de captación de biogás por carencias presupuestales y deficiencias en el



diseño de los rellenos debido a una inadecuada asesoría técnica. La tabla 1.7 presenta datos sobre la composición de biogás de algunos RESA en México.

**Tabla 1.7.** Composición de biogás en distintos RESA de México (% v/v)

| Localización del RESA | Año  | Composición     |                 |                |         |
|-----------------------|------|-----------------|-----------------|----------------|---------|
|                       |      | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | Balance |
| Prados de la Montaña  | 2006 | 55.31           | 38.09           | 0.94           | 5.66    |
| Santa Catarina        | 2006 | 41.28           | 58.08           | 0              | 0.64    |
| Tlalnepantla          | 2006 | 57.41           | 40.95           | 0.23           | 1.4     |
| Querétaro             | 2006 | 57.27           | 42.17           | 0.08           | 0.48    |
| Puebla                | 2006 | 59.13           | 37.54           | 0.83           | 2.50    |
| Tehuacán              | 2006 | 54.43           | 38.82           | 1.44           | 5.3     |
| Huejotzingo           | 2006 | 39.98           | 48.04           | 2.55           | 9.43    |
| Jalapa                | 2006 | 55.8            | 42.31           | 0.39           | 1.5     |

Fuente: Kiss et al., 2007.

Debido a lo anterior, los municipios del país que actualmente evalúan las emisiones de biogás para inventariar la producción de CH<sub>4</sub>, lo hacen con base en datos extrapolados de otras regiones. Son pocos los estudios disponibles de países en vías de desarrollo (IPCC, 2006), por lo que hasta la fecha han sido insuficientes los datos para cuantificar la magnitud de las diferencias entre regiones (USEPA, 2005).



## 2 Antecedentes

Los gases producidos durante la degradación biológica de la materia orgánica de los RSU dispuestos en sitios de disposición incluyendo al  $\text{CH}_4$ , pueden ser arrojados a la atmósfera contribuyendo al cambio climático global., Hoy en día es común la recuperación de biogás como una medida para la reducción de las emisiones de GEI generadas en los RESA. El monitoreo de biogás y su capacidad de ser usado por la conversión a calor y posteriormente a energía alternativa, es uno de los principales parámetros sobre los RSU que se están tratando en países desarrollados haciendo frente al problema sobre cambio climático (Yilmaz et al., 2003).

Los inventarios en países en vías de desarrollo son importantes, ya que el  $\text{CH}_4$  también pudiera ser utilizado como fuente de energía alternativa, debido a que su recuperación requiere de información precisa acerca de los parámetros que influyen en la tasa de generación, cantidad y composición de los RSU que ingresan a estos sitios (Buenrostro et al., 2001).

Se han realizado distintas investigaciones sobre las implicaciones que conlleva la generación de  $\text{CH}_4$ , que incluyen el total de las estimaciones de las cantidades producidas directamente en campo, técnicas que promueven su oxidación, cálculos de las tasas de eliminación, establecimiento de modelos y problemática de sus emisiones.

Se ha trabajado en varios países sobre la factibilidad de utilizar algún modelo para predecir la producción de biogás y los resultados han concordado en que los modelos son confiables y precisos, siempre y cuando, los datos que se utilicen como insumos para el modelo sean confiables. Esto porque las investigaciones han demostrado que la producción de biogás difiere de un sitio con respecto a otro e incluso, dentro del mismo RESA, ya que no todos los sitios de disposición presenta las mismas condiciones. Por un lado, el hecho de medir biogás directamente en algunos sitios es



inviabile por los costos que representa y por otro, se ha comprobado que los modelos no son tan eficientes porque las variables utilizadas pueden estar sobreestimadas o subestimadas (SCS Engineers, 2009).

## **2.1 Estimaciones de producción de biogás en otros países**

Existen trabajos que utilizan modelos encaminados a estimar la producción de  $\text{CH}_4$  que se produce en un sitio de disposición. Kumar et al., (2004) efectuaron un estudio en los sitios de disposición de residuos de la India entre 1980 y 1999 mediante revisión bibliográfica, seleccionaron los modelos utilizados por el IPCC, pues argumentaron que proporcionarían estimaciones anuales más razonables. Consideraron el método Default (decaimiento) establecida por Bingemer y Crutzen en 1987 y que utilizó el IPCC en sus directrices para los inventarios de los gases de efecto invernadero en 1996; esta metodología empleó el uso de constantes empíricas, tales como  $L_0$  y  $k$  y que se basa en una aproximación al equilibrio de masas. Por otra parte, utilizaron el modelo de emisión triangular que es una variante del modelo de decaimiento de primer orden (FOD), el cual utilizó datos de disposición de RSU, el grado de estabilización y el ciclo sobre el cual se generan las emisiones de  $\text{CH}_4$  a partir de la degradación de los RSU depositados. Con el objetivo de recabar y/o generar los datos de generación de RSU a nivel estatal y nacional, realizaron investigaciones en campo, utilizaron estadísticas nacionales disponibles provenientes de un inventario de emisión de GEI que realizó el gobierno de la India y consideraron datos anuales aportados por el servicio de recolección con respecto a rangos de población previamente establecidos. Categorizaron las ciudades en base a sus características geográficas (planas, montañosas y costeras) y demográficas; de tal forma, una ciudad representaba una diversa categoría cuyos datos se extrapolaban a las demás que cumplieran con las mismas características. Con toda la



información, hicieron una comparación de los valores de emisión del  $\text{CH}_4$  en los sitios de disposición. El modelo triangular asumió que las emisiones ocurren después del primer año de disposición con incrementos constantes a lo largo de 6 años y posteriormente van disminuyendo hasta alcanzar una estabilidad, que ocurre a los 15 años posteriores. Los resultados de emisión de  $\text{CH}_4$  de la India calculados con la metodología por decaimiento variaron en un rango de 263.02 Gg en 1980 a 502.46 Gg en 1999, y con el método triangular se encontraron entre 119.01 Gg en 1980 y 400.66 para 1999. De acuerdo a las comparaciones producto de las estimaciones entre los modelos sobre la cantidad generada anualmente, consideraron que con la metodología por decaimiento, el potencial de  $\text{CH}_4$  sería emitido en el mismo año en el cual se depositaron los RSU anualmente, lo cual pudo no ser real, en cambio, mencionan para el caso del modelo triangular el gas quedaría en una periferia o atrapado y se seguiría generando en los 15 años posteriores. Los valores del modelo triangular presentaron un menor incremento con respecto a los estimados usando la metodología por decaimiento. De tal forma mencionaron que el modelo triangular es más realista y puede ser utilizado para estimar las emisiones de  $\text{CH}_4$  a escala global., Llegaron a la conclusión que existen ciertas limitaciones en las estimaciones sobre el inventario de la emisión del  $\text{CH}_4$  calculada para los años 1980-1999 en la India, ya que se hicieron con base a documentos publicados sobre estudios realizados y poco sobre datos generados; además, los valores establecidos sugeridos por IPCC se han utilizado en estimaciones basadas en otras condiciones y por último, la mayor parte de los municipios no tienen datos de RSU debido a una carencia presupuestaria y de conocimiento con una prioridad baja. Sugieren un estudio detallado para obtener los factores apropiados con valores reales de acuerdo a las condiciones del país.



Fourie et al. (2004), realizaron un estudio de emisiones de  $\text{CH}_4$  en cuatro grandes tiraderos situados en climas semiáridos de Sudáfrica. Durante su trabajo utilizaron una cámara de acumulación estática (SACT) con mediciones en cada sitio en lapsos de dos a tres días. Después de haber cubierto los RSU para la instalación de la cámara, se percataron que los índices de emisión del  $\text{CH}_4$  se redujeron más rápidamente que las emisiones del  $\text{CO}_2$ . Con ello mencionan la necesidad de diseñar un sistema de cobertura final adecuado como parte integral de cualquier sistema para la recuperación de la energía. Sus resultados muestran que las emisiones de GEI en los sitios de disposición final semiáridos y en particular del  $\text{CH}_4$ , son relativamente bajos, lo que les permite aseverar que los RSU se degradaron más lentamente.

Paraskaki et al. (2005), utilizaron tres diferentes modelos para estimar las cantidades de  $\text{CH}_4$  en el RESA clausurado de Ano Liosia, en Atenas Grecia, durante el año 2002. Para el desarrollo del trabajo utilizaron los modelos estequiométrico, de emisión triangular y el modelo LandGEM 2.01, en conjunción con el modelo atmosférico de dispersión a grandes distancias ISC3-LT, que estimó la cantidad de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC) como el cloruro de vinilo y benceno. Con la finalidad de conocer el comportamiento de los modelos con respecto a su estimación, realizaron una compilación de datos de emisión de su concentración en la atmósfera. El modelo LanGEM presentó valores promedio de  $30137 \text{ Nm}^3$  en comparación con los resultados de medición en campo de  $18400 \text{ Nm}^3$ . Aunque existe una diferencia entre estos dos valores, se anteponen que el modelo LandGEM prové la mayor confiabilidad con respecto a la estimación que ofrecen los otros dos modelos. Concluyen que la combinación entre el modelo LandGEM y el software ISC 3-LT permiten identificar la región con mayor concentración de contaminación por emisiones de RESA.



McBain et al. (2005), mencionan que cada año en Canadá el sector correspondiente a las viviendas contribuye con aproximadamente el 3% de los GEI del total lanzados a la atmósfera y de este porcentaje, el 91% se origina directamente de la disposición de RSU; sin embargo, estas estimaciones no provienen de monitoreos en campo, sino de modelos que tienden a sobre simplificar los procesos implicados. Por lo tanto, en los últimos años se ha puesto mayor énfasis en intentar entender la dinámica en la producción del gas dentro de un RESA con una gran variedad de estudios en laboratorio y campo que ayuden a los modelos empleados.

Scharff y Jacobs (2006), efectuaron un análisis comparativo de estimaciones de CH<sub>4</sub> entre 1999 y 2002, a partir de seis modelos matemáticos con respecto a la medición directamente en campo en Nauerna, Braambergen y Wieringermeer, Reino Unido. Los modelos utilizados fueron el de primer orden (TNO), el de fases múltiples, el LandGEM, el GasSim, el EPER de Francia y el EPER de Alemania, los cuales consideran los efectos de la disminución del carbono orgánico degradable, datos de emisión y la capacidad de oxidación de CH<sub>4</sub> en la cubierta superior de los residuos. Con respecto a la medición del biogás en los RESA, utilizaron un medidor de plumas móviles con diodo laser (TDL), uno de plumas estacionarias (SPM) y la técnica de medición de equilibrio total (MBM). Por otro lado, obtuvieron datos de disposición de residuos de  $9.4 \times 10^6$  Mg en el RESA de Nauerna,  $2.2 \times 10^6$  Mg en Braambergen y  $2.1 \times 10^6$  Mg en Wieringermeer. Los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos indicaron rangos de producción de CH<sub>4</sub> de 1.2 a 17 Gg, lo que representó una diferencia en las mediciones entre el 40 y 570 %. Determinaron que los modelos TNO, de fases múltiples, el GasSim, y LandGEM sobrestimaban la emisión de CH<sub>4</sub>, a diferencia de los modelos EPER de Francia y Alemania; por lo que los autores concluyen que la comparación de los datos obtenidos de la aplicación de los modelos, con los datos



medidos en los RESA es imprecisa. Respecto a las técnicas utilizadas para la medición en campo, se observó una menor diferencia en los resultados, con una emisión promedio de  $3 \text{ Gg CH}_4 \text{ año}^{-1}$  de las cuales, la técnica MBM obtuvo valores considerablemente más bajos que las otras dos. Concluyen que el desarrollo adicional de las técnicas descritas y su uso subsecuente pueden proporcionar herramientas más confiables que los modelos actuales, considerando en próximos estudios un número mayor de RESA. Recomiendan conjuntar los resultados obtenidos de los modelos para mejorar su comparación.

Algunos trabajos utilizan modelos con las constantes  $k$  y  $L_0$ ; de acuerdo con Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático se recopilaron los valores de  $k$  producto de mediciones experimentales en campo o a través de modelos matemáticos predictorios, basados en la composición de los RSU de alta, media, y baja degradabilidad para una determinada zona climática, temperatura y precipitación media anual. Obtuvieron valores promedio en zonas templadas húmedas de  $0.06 \text{ año}^{-1}$  para residuos de degradación lenta,  $0.1 \text{ año}^{-1}$  para aquellos moderadamente degradables y  $0.185 \text{ año}^{-1}$  para los fácilmente degradables (IPCC, 2007).

Por otra parte, la USEPA (2002), estimó datos de valores de  $k$  de RESA de los Estados Unidos con base en la composición de RSU. En su trabajo estimaron valores de  $k$  en un rango de  $0.003$  a  $0.21 \text{ m}^3/\text{Mg año}^{-1}$  cuyos valores para los residuos de fácil degradación fueron de  $0.28 \text{ año}^{-1}$ ,  $0.056$  para los de media y  $0.014 \text{ año}^{-1}$  para los de lenta degradación.

Wang Yao et al. (2004), realizaron un estudio de la emisión de  $\text{CH}_4$  en el RESA de Rachathewa, Samutprakan, Tailandia para evaluar su capacidad de producir energía utilizando el modelo LandGEM versión 2.01. Para determinar  $L_0$  y  $k$  analizaron la composición de los RSU de 2000 a 2002; en el caso de  $L_0$  se utilizó el modelo y los

datos de emisión de gas por un periodo de tres meses con un analizador de gas portable GEM 2000, en 3 tubos de venteo horizontales de una longitud de 150 metros con la finalidad de validar los resultados propuestos. Para determinar  $k$  se utilizaron las categorías de degradabilidad propuestas en el modelo GasSim desarrollada por Gregory et al. (2003). Los resultados mostraron 42.65% de residuos fácilmente degradables, 5.14% de residuos moderadamente degradables y 18.13% de aquellos lentamente degradables. Con esta información estimaron un valor de  $L_0$  de  $110 \text{ m}^3/\text{Mg}$  de residuos y una  $k$  promedio de  $0.32 \text{ año}^{-1}$ . La prueba de monitoreo mostró un índice de generación promedio de gas de  $0.97 \text{ m}^3/\text{hr}$ . Usando estos parámetros se estimó 1 MW de capacidad de energía eléctrica. Concluyen que las estimaciones con el modelo USEPA (versión 2.01) muestran un marcado decremento del flujo, por lo cual proponen ajustar los valores de  $L_0$  a valores promedio de  $170 \text{ m}^3/\text{Mg}$  (Acta del Aire Limpio (CAA) y de  $100 \text{ m}^3/\text{Mg}$  (AP-42)), ya que se determinaron diferencias considerables entre la composición de los RSU de los Estados Unidos, con respecto a los de Tailandia.

Anurag et al. (2006), utilizaron datos de precipitación, temperatura, composición y profundidad de las celdas de vertido de los RSU de 42 RESA de Estados Unidos y Canadá para calcular la constante  $k$ . Utilizaron un modelo basado en una técnica “fussy” para poder relacionarlos con la constante. Obtuvieron como resultado una variación en los valores de  $k$  de 0.4 a 18% en un rango de  $\pm 20\%$  de un sitio con respecto a otro. Con estos valores se estimó la producción de  $\text{CH}_4$  a periodos de 30, 60 y 90 años. Se determinó una variación del modelo del 12, 6.5 y 5% respectivamente.

Machado et al. (2008), estimaron la generación de  $\text{CH}_4$  en climas tropicales, utilizando el modelo de degradación de primer orden del IPCC (IPCC, 2006) y el LandGEM de la USEPA (USEPA, 1998), cuyo caso de estudio fue el RESA del Salvador, Brasil. Para calcular  $L_0$  y  $k$ , recopilaron datos de composición de distintas



edades, humedad, sólidos volátiles (SV), lignina, degradabilidad de los residuos y emisión de  $\text{CH}_4$ . Los resultados muestran una disminución de la materia orgánica de 20.8 a 5.25 % en nueve años. Con respecto a los SV, se obtuvo un valor promedio de 57.9 %, cuyas muestras de mayor edad representan el 16.19 %. Los contenidos de lignina y humedad fueron de 13% y 91% base húmeda respectivamente en muestras más recientes. El cálculo de  $L_0$  fue de  $65.9 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{Mg}$  de RSU en muestras de menor edad, con un decrecimiento a  $19.73 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{Mg}$  cuando se consideraron muestras más antiguas de hasta 9 años de edad; comparables con los datos reportados por el IPCC de  $66.62 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{Mg}$  de RSU para el 2006. En el caso de  $k$ , las dos fuentes presentan un valor de  $0.21 \text{ año}^{-1}$ . Mediante la comparación de los resultados reportados y los obtenidos por el ingreso de los datos medidos a los modelos, concluyen que los valores de  $L_0$  reportados por el IPCC para ciudades tropicales, son relativamente más bajos, lo cual explica que se debe a humedades relativas más altas en estos sitios, además de aseverar que la  $k$  resultante es compatible con las condiciones tropicales del sitio pues se aceleran los procesos de degradación y de disminución de la fracción orgánica de la materia orgánica de los residuos.

## 2.2 Estimaciones de producción de biogás en México

En México, a partir del año de 1990 ha tomado importancia la contribución de los sitios de disposición de residuos como una fuente clave de emisiones de GEI. De acuerdo con el Inventario Nacional de GEI, en el año 2006, el  $\text{CH}_4$  contribuyó con el 27.6 % de las emisiones totales por disposición de RSU. Las emisiones por disposición de RSU tuvo un incremento significativos entre 1990 y 2006, con 198.4 %, originados por el impulso al mejor manejo de los éstos, en particular la disposición en RESA,



donde los procesos anaeróbicos son más eficientes que en tiraderos a cielo abierto (INE, SEMARNAT, 2006). Sin embargo, en la actualidad solo algunos municipios como el RESA de Salinas Victoria en Nuevo León (Arvizu et al., 2006) llevan a cabo estudios de producción de biogás en RESA o aprovechamiento del  $\text{CH}_4$  para generar electricidad y actuar como fuente de energía alternativa.

En el 2005 el RESA de Salinas Victoria en el estado de Nuevo León, México, generó 219.51 Mg de  $\text{CH}_4$  y 597,135.37 Mg eq de  $\text{CO}_2$ . El  $\text{CH}_4$  se utilizó para generar energía eléctrica, de la cual el 8 % fue para uso propio y el funcionamiento de una planta clasificadora y el resto de la energía se vendió a siete municipios del área metropolitana de Monterrey, al sistema de transporte colectivo Metrorrey y algunas otras dependencias gubernamentales. Este relleno tendrá un periodo útil de 20 años y obtiene el biogás con una concentración estimada de 50 % de  $\text{CH}_4$  a partir de la degradación de 7,698 000 Mg de RSU depositados en el RESA. La cantidad de  $\text{CH}_4$  que se estima que producirá el RESA durante su vida útil es de 313 millones de  $\text{m}^3$ , de los cuáles se podrá recuperar el 70 %; la eficiencia de la planta medida en función de la conversión de energía térmica en eléctrica es de 30.6 %, con una eficiencia de aprovechamiento de la Energía Térmica es de 21.42 % considerando todo el gas  $\text{CH}_4$  emitido (Arvizu et al., 2006).

En el 2005, la Dirección de Seguridad y Medio Ambiente dependiente del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), trabajó sobre escenarios de emisiones y medidas de mitigación de GEI que comprendían aquellas provenientes de los RSU. El estudio reportó una generación potencial de 44 Megawatts (MW) de energía a partir del biogás generado de la descomposición de aguas residuales y de los RSU en los RESA. En un escenario tendencial, plantearon un crecimiento en las emisiones de  $\text{CH}_4$  de 3,128 Gg/año reportadas en el 2005 a 5382 Gg/año en el 2020 lo que implica una producción de 110 MW de energía eléctrica. Este incremento en las emisiones de  $\text{CH}_4$  se debe a que



se prevé un crecimiento en la generación per cápita de RSU de 0.8653 a 1.0480 kg/habitante/día, cuya cantidad de RSU depositada en los RESA, aumentará de 64.22 % en el 2003 a 73.35 % en el 2020. Proponen como medida de mitigación la instalación de plantas de generación de energía eléctrica en los RESA cuya capacidad sea rentable, así como la instalación de quemadores en campo que disminuyan el potencial de generación del CH<sub>4</sub> hasta un 2.55 % y convertirlo en CO<sub>2</sub>; sin embargo, mencionan que deberá realizarse un estudio de los precios de mercado de los bonos de carbono para que esta infraestructura sea factible económicamente. Mencionan que estos valores representan un potencial de generación de energía eléctrica de 11.95 a 12.5 veces mayor que el establecido en las prospectivas del sector eléctrico; con la capacidad de obtener un potencial de generación de 1793 MW en un escenario tendencial (IMP, 2005).

Hernández et al. (2006), monitorearon con un analizador de gas (GEM-500 Landtec®) quincenalmente las emisiones de biogás, en 112 pozos de venteo durante dos años en el RESA clausurado de Prados de la Montaña, en el Distrito Federal. Los resultados mostraron una producción volumétrica promedio de biogás de 30 m<sup>3</sup>/h/pozo que representan 14.7 millones m<sup>3</sup>/año, con un contenido de CH<sub>4</sub> de 50% y 1,680 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/h con una capacidad calorífica de alrededor de 150 kWh. Observaron una mayor producción de CH<sub>4</sub> en la temporada de lluvias, atribuyéndolo al incremento en el contenido de humedad que mejoraba la actividad metanogénica de los consorcios microbianos presentes; disminuyendo la emisión hasta un 25% en la temporada de secas. Resaltan la importancia de la implementación permanente del monitoreo de biogás en los RESA, a fin de mejorar la recuperación del CH<sub>4</sub> generado para su adecuada reutilización.

Durante el año 2007, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) monitoreó la producción de biogás en los RESA de Mérida, Puebla y Nuevo Laredo con el objetivo



de determinar factores de emisión *in situ* del CH<sub>4</sub>, a nivel nacional, a fin de mejorar las estimaciones de acuerdo a la metodología propuesta por el IPCC y reducir la incertidumbre en la elaboración del Inventario Nacional de GEI. La metodología consistió en la perforación de tres pozos en cada RESA para muestrear las emisiones de biogás. La toma de lecturas se llevó a cabo con un analizador de gas GEM 500 con detector de rayos infrarrojos que midió el contenido de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>. Además se tomó una muestra de RSU por sitio para caracterizarlos. Los resultados mostraron promedios de 52% de CH<sub>4</sub> y 46 % de CO<sub>2</sub> para el RESA de Nuevo Laredo; 50.61% de CH<sub>4</sub> y 34.84% de CO<sub>2</sub> para el RESA de Mérida y el sitio del Estado de Puebla emitió 52.2% de CH<sub>4</sub> con 41.8% de CO<sub>2</sub>. Concluyeron que estas diferencias en las emisiones de biogás obedecen a la composición de los residuos y a las labores de manejo imperantes en los RESA, por lo que entre sus principales recomendaciones están el ampliar este tipo de estudios a otros RESA del país (IIE, 2007).





### 3 Planteamiento del problema

Desde 1990, en México se han elaborado inventarios de emisiones de biogás en diversos RESA utilizando modelos matemáticos predictivos, los cuales se basan en datos climáticos y de composición de RSU extrapolados de otras regiones y pocos tomados directamente en campo. De esta forma, se identificó que los resultados obtenidos por algunos modelos como el FOD no eran adecuados para el país, pues los insumos utilizados para obtener  $k$  y  $L_0$ , se basan en datos recabados de países desarrollados como los Estados Unidos. El propósito de los inventarios es identificar, reducir y controlar las emisiones de GEI, así como de estimar e informar en forma periódica de estas emisiones ante el IPCC; por ello, el motivo de utilizar datos de actividad y factores de emisión regionales y/o locales, con el fin de reducir la incertidumbre en las estimaciones de GEI (IIE, 2007).

## 4 Justificación

A pesar de que la legislación mexicana presenta regulaciones ambientales bien definidas con una clara reglamentación sobre un manejo adecuado, un 11.6% de los RSU que se generan en el país, continúan depositándose en el suelo, en sitios que no cumplen con las especificaciones de la normatividad mexicana (SEMARNAT. SNIARN, 2011), lo que trae impactos ambientales negativos al suelo, agua y atmósfera. En esta última, el desconocimiento de la cantidad y composición del biogás hace difícil estimar la contribución al efecto invernadero, así como a riesgos de incendios incontrolados por la emisión de humos, producto de la combustión ineficiente de los residuos. Generalmente, estos sitios no cuentan con sistemas de captación de biogás que también pudiera ser utilizado como fuente de energía alternativa.

Los modelos propuestos para estimar la cantidad de biogás y en particular de  $\text{CH}_4$ , consideran parámetros como  $L_0$  y  $k$ , cuyos valores se establecen en función de las características fisicoquímicas y biológicas de los RSU, así como las labores de manejo en los sitios de disposición. Por todo esto, es conveniente realizar estudios para conocer la composición y características de los RSU del sitio de estudio en particular y medir la producción de biogás, con la finalidad de establecer posibles inferencias con los datos estimados. Este trabajo contribuye con valores de  $k$  y  $L_0$ , de acuerdo a las condiciones climáticas, de composición de RSU y de operación del sitio; así como con datos sobre producción de  $\text{CH}_4$  del RTC de Morelia, Michoacán que muestran las condiciones imperantes. Además, se utilizarán datos recabados del sitio de estudio, lo que representa un buen parámetro para medir su contribución de acuerdo a sus características propias. La investigación en esta área, presenta una gran importancia para asegurar la gestión adecuada de los RSU en aspectos de planeación y de optimización de sitios.



## 5 Objetivos

### 5.1 General

Establecer el potencial de generación ( $L_0$ ) y el índice de generación de  $CH_4$  (k), de acuerdo a las condiciones del RTC de Morelia, Michoacán.

### 5.2 Específicos

1. Determinar los parámetros físicoquímicos de humedad, temperatura, pH, composición orgánica e inorgánica, sólidos totales, sólidos volátiles y cenizas, en muestras de RSU del RTC de Morelia.
2. Conocer el volumen y composición del biogás del RTC de Morelia.
3. Determinar el potencial de generación ( $L_0$ ) y el índice de generación de  $CH_4$  (k).



## 6 Hipótesis

Las estimaciones de emisión de  $\text{CH}_4$  para los sitios de disposición de RSU de México no son confiables, ya que las constantes  $L_0$  y  $k$  no son precisas pues provienen de datos de composición de RSU y de sitios con características climáticas, tecnológicas y de consumo distintas. Las emisiones difieren de un sitio con respecto a otro e incluso dentro de un mismo sitio; por ello, si se calibran estas constantes de acuerdo con datos de sitios particulares es factible mejorar las estimaciones de emisión de  $\text{CH}_4$ .

## 7 Materiales y Métodos

### 7.1. Descripción del área de estudio

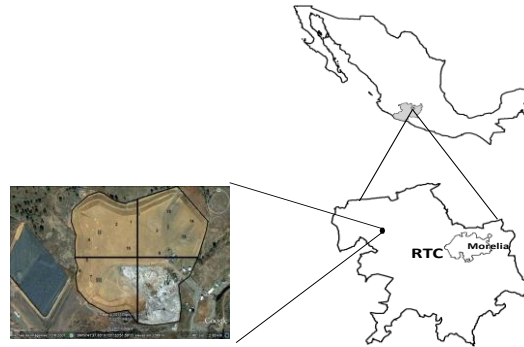
El estudio se realizó en el RTC de Morelia Michoacán clausurado a finales del 2007, después de 24 años de actividad. Se localiza a 15 kilómetros al oeste de la ciudad, en la región centro occidente de México. Se encuentra dentro de las coordenadas 19° 41' 40'' Latitud Norte y 101° 20'54'' Longitud Oeste, a una altura de 2075 metros sobre el nivel del mar y con una profundidad máxima de 10.1 m (figura 7.1). En el área predomina el clima de subtipo templado (Cwa) con temperatura media anual de 18.7°C, de humedad media, con régimen de lluvias en verano de 700 a 1000 mm al año y en invierno un promedio de cinco mm anuales (Israde et al., 2005). Tiene una extensión de 17 hectáreas con una topografía irregular, pendiente de 15°, una profundidad máxima de 10.1 metros de las celdas de vertido y una cantidad estimada de 3,859,642 Mg de residuos depositados (INEGI, 2009). Durante la clausura, se instalaron 49 tubos de venteo a una profundidad de tres metros con una abertura del tubo de salida de 4 pulgadas, de los cuales no se lleva a cabo ninguna actividad de medición y control para la prevención de emisiones a la atmósfera o aprovechamiento de gases para producción de energía (González et al., 2011).

La presente investigación incluyó ocho fases en función de la obtención de los parámetros fisicoquímicos y de emisión de CH<sub>4</sub> que inciden en el establecimiento de los valores de k y L<sub>0</sub> en el sitio de estudio.

### 7.2 Muestreo y caracterización de RSU

El área de estudio se dividió en cuatro cuadrantes de acuerdo con el tiempo aproximado de confinamiento de los RSU. Los cuadrantes fueron numerados en orden

progresivo de acuerdo a su antigüedad en el sitio (como I el más antiguo y numero IV el más reciente).



**Figura 7.1.** RTC del municipio de Morelia, Michoacán

Fuente: Elaborado a partir de Google Earth, 2007.

Se perforaron 16 pozos a tres metros de profundidad distribuidos entre los cuadrantes. Siguiendo un tipo de muestreo aleatorio simple, se colectaron muestras de RSU por sitio hasta obtener aproximadamente 4 kg. En la tabla 7.8 se muestra el número de pozos perforados y tubos de venteo, de acuerdo con la división del RTC en 4 cuadrantes.

**Tabla 7.8.** Número de pozos perforados y tubos de venteo en cada cuadrante del RTC

| Cuadrante | Pozos | Tubos de Venteo |
|-----------|-------|-----------------|
| I         | 5     | 15              |
| II        | 4     | 11              |
| III       | 3     | 11              |
| IV        | 4     | 12              |

Por otro lado, se obtuvo una muestra de 50 kg de RSU frescos, provenientes de las actividades de recolección y tratamiento previo de separación de material reciclable de 50 unidades de recolección que operan en distintas áreas de la ciudad de Morelia.

Se recogieron las muestras en bolsas negras de polietileno de tamaño de 1.10 m x 0.90 m por cada sitio. Se catalogaron con una clave y número de identificación y por



último estas muestras se trasladaron en una hielera al laboratorio para su posterior análisis.

Para la caracterización de RSU en muestras del sitio de disposición y de las obtenidas de las unidades de recolección, a una muestra de 1 kg de RSU se le efectuó una selección manual y una cuantificación de subproductos con base en una variante de la Norma de Clasificación NTRS-5, propuesta por la SEDUE e incluida en la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-22-1985 Residuos Sólidos Municipales-selección y cuantificación de subproductos (SECOFI, 1984<sup>a</sup>). El proceso consistió en vaciar la bolsa en una charola grande de peso conocido para separar manualmente cada residuo. En el caso de las muestras del sitio de disposición, se obtuvieron aquellos residuos que se pudieron retirar de la mezcla homogénea pues se conoce su consistencia producto del proceso de degradación. Estos se pesaron en balanzas de precisión Trans-Cell Modelo TI-500 con capacidad de 30 kg y una sensibilidad de 2 g y los pesos de cada subproducto se anotaron en el formato de clasificación de subproductos antes expuesto.

Para cuantificar los residuos de composición orgánica (peso fresco) en cada muestra se seleccionaron los subproductos de residuos alimenticios, de jardín, finos, lodos residuales, cenizas, papel higiénico, servilletas, papel, periódico, cartón, textiles, madera, caucho, cuero, huesos, paja y el 20 % del material con que se fabrican los pañales y como residuos de composición inorgánica todos los demás subproductos encontrados en las muestras (SCS Engineers, 2009). Con la determinación de los componentes orgánico e inorgánico de las muestras de RSU, se catalogaron los diversos subproductos con base a su capacidad de degradación en cierto tiempo como se indica en los trabajos de Gregory et al., (2003), USEPA (2002), Machado et al., (2008), SCS Engineers (2009). De esta forma se presentaron las siguientes categorías de RSU:



- RSU de degradación muy rápida (residuos alimenticios, residuos finos, lodos residuales, otros orgánicos y el 20% del material de pañales),
- RSU de degradación moderadamente rápida (residuos de jardín, papel higiénico o servilletas),
- RSU de degradación moderadamente lenta (papel, periódico, cartón y textiles), residuos de degradación lenta (que incluye a la madera, caucho, cuero, huesos y paja) y;
- RSU no biodegradables (que consideraron al plástico, vidrio, metal, concreto, escombros y otros materiales inertes).

Para calcular  $k$  y  $L_0$ , las muestras de composición orgánica de los RSU del sitio de disposición y de las unidades de recolección, se agruparon de acuerdo con la caracterización propuesta en SCS Engineers, 2009.

### **7.3 Análisis fisicoquímico en las muestras de RSU**

Posteriormente, se tomó una muestra de 1 kg por cada pozo y se efectuó un análisis fisicoquímico por triplicado para los parámetros de pH, contenido de humedad, ST, Cenizas y SV (ANEXO 1). Se homogenizó la muestra, triturando sus componentes a una fracción promedio de 1 cm, de acuerdo con la norma NOM-AA-52-1985 (SECOFI, 1984<sup>b</sup>). La temperatura se midió con un termómetro digital (Taylor Precision Products modelo 9878) a tres metros de profundidad durante 20 segundos para lograr su estabilidad.

### **7.4 Análisis de biogás en el sitio de estudio**

Se midió la composición de biogás en los 49 tubos de venteo del RTC, utilizando un analizador portátil GEM-2000 Plus (Landtec®), todo esto semanalmente





durante un año en el 2011. Se midió el %v/v de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y algunos gases traza representados como el balance (constituido principalmente por N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y CO). Cuando se dispuso del cabezal Accu Flo®, se midió el flujo (m<sup>3</sup>/hr) durante cuatro meses, el cual está equipado con un sistema que reguló la salida de biogás. La medición se realizó de 9:00 am a 13:00 pm, para disminuir la interferencia de factores externos como los cambios de humedad y temperatura. El proceso consistió en adaptar el cabezal a cada tubo de venteo con el propósito de no permitir la salida natural de biogás y extraerlo de manera forzada, para medir la presión estática y diferencial con el analizador de biogás y tener un flujo resultante por diferencia de presión. La unión entre los dos instrumentos utilizados se llevó a cabo por medio de 2 conectores plásticos. Antes de cada medición se calibró el equipo para detectar concentraciones de CH<sub>4</sub> de 0.1 a 100% v/v de aire, cerciorándose que no hubiese quedado trazas de gas dentro del sistema diferente al que se quería medir.

Esta actividad tuvo como finalidad obtener las emisiones de CH<sub>4</sub> durante el muestreo (m<sup>3</sup>/Mg RSU), corroborar el porcentaje de emisión del 50 % v/v de CH<sub>4</sub> bajo el cual sustentan los modelos su forma de operar y realizar una comparación con la estimación de la emisión de biogás del Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0. Para efectuar esta comparación, se calculó la emisión de biogás a 10 m de profundidad del RTC ya que se desconocía la cantidad de RSU confinados en el área de tres m de profundidad en la que están colocados los tubos de venteo de biogás.

## **7.5 Determinación matemática de L<sub>0</sub>**

Para calcular el valor de L<sub>0</sub>, se utilizaron las ecuaciones 1.14 (IPCC, 2006) y 1.19 (Lobo, 2003). A su vez para calcular los valores de DDOCm se utilizó la ecuación

1.15, el DOC con la ecuación 1.16, DOCf con las ecuaciones 1.17 y 1.18, BFw con la ecuación 1.20 y Cm con la ecuación 1.21.

## 7.6. Determinación matemática de k

Para calcular el valor de k se utilizaron las ecuaciones matemáticas 1.22, 1.23 y 1.25. En el caso de la ecuación 1.25 se utilizaron los datos del tiempo de operación del RTC de Morelia de 22 años, una MAP de 773 mm y una MAT de 14 a 18°C, el sitio de estudio se ubica dentro de la zona climática boreal y templada, húmeda, de acuerdo con la clasificación propuesta en IPCC (2006). Los tiempos de vida media ( $t_{1/2}$ ) muestran en la tabla 7.9.

**Tabla 7.9.** Valores de  $t_{1/2}$  para la zona de estudio

| <b>Categorías de residuos</b> | <b><math>t_{1/2}</math></b> |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Degradación lenta             | Entre 12 y 23               |
| Degradación moderada          | 7                           |
| Degradación rápida            | 4                           |
| Degradación en conjunto       | 7                           |

Fuente: (IPCC, 2006)

### 7.6.1 Despeje de k en la ecuación 1.24

Se despejó la ecuación 1.24 ( Machado et al., 2008) como sigue:

$$k = \left( \frac{-1}{t} \right) \text{Ln} \left( c - \frac{q}{L_0} t \right) \quad \text{Ec. 1.26}$$

En la ecuación 1.26 se asigna un valor a la constante “c” que represente las condiciones en las cuales se encuentra el sitio de estudio con respecto a las emisiones reales de CH<sub>4</sub> y el número de años de disposición. Se asignan los valores a la constante “c” con la ecuación 1.27:

$$\frac{q}{L_0} < c < \frac{q}{L_0} + 1 \quad \text{Ec. 1.27}$$

Los valores de  $q$  se obtuvieron de datos reales de producción de  $\text{CH}_4$  en campo y los valores de  $L_0$  se tomaron de los resultados obtenidos por la ecuación 1.14 y 1.19.

### **7.6.2 Método a prueba y error asignando valores a $k$ en la ecuación 1.24**

La asignación de los valores a  $k$  se realizó usando los datos anuales de emisión de  $\text{CH}_4$  ( $\text{m}^3/\text{Mg}$  de RSU) que se obtuvieron de multiplicar el volumen por el flujo de  $\text{CH}_4$  determinado en el muestreo. Se utilizó el Modelo Mexicano de Biogás (SCS Engineers, 2009), ingresando como insumo el dato de total de RSU depositados durante 22 años y el dato del incremento anual de disposición de 2.3%. El modelo da como resultado el incremento anual de emisión de biogás a partir de la apertura del sitio en 1986. Estos datos se utilizaron para calcular el índice de generación de  $\text{CH}_4$  ( $q$ ) asignando valores a  $k$  por prueba y error hasta hacer coincidir  $q$  obtenida en campo y  $q$  estimada.

### **7.7 Valores de $L_0$ y $k$ establecidos en el Modelo Mexicano de Biogás (Versión 2.0)**

De acuerdo con el Modelo Mexicano de Biogás, la zona de estudio se ubica dentro de la región climática Oeste (W). Ingresando los datos de la composición de los RSU de la zona de estudio, el modelo asignó automáticamente los valores para  $k$  y  $L_0$ .

### **7.8 Estimación de la emisión de $\text{CH}_4$ utilizando el Modelo Mexicano de Biogás (Versión 2.0)**



Para llevar a cabo la estimación de la emisión de CH<sub>4</sub>; en primera instancia el Modelo Mexicano de Biogás (versión 2.0) calculó la eficiencia de captura de biogás a partir de la clausura del sitio de disposición. Para ello, se ingresaron al modelo datos del sitio referentes a prácticas de operación, riesgos de incendios, profundidad, tipo, grado, año de inicio de recepción, compactación, eficacia de la recolección e índices de disposición de RSU (Mg/año). Aunque el Modelo Mexicano estima los índices de disposición anual de RSU; para años anteriores al 2000, se utilizaron datos provenientes de un estudio realizado por Buenrostro (2001) y para los últimos siete años anteriores a la clausura del sitio, se registraron datos de generación per cápita reportados por INEGI en el 2010. Con los datos de ubicación se categorizó el sitio de disposición en una de las seis regiones climáticas en que se divide el país. La tabla 7.10 muestra los datos de ingreso al Modelo Mexicano.

**Tabla 7.10.** Factores de operación en el RTC de Morelia.

| <b>DATOS DE ENTRADA</b>                            | <b>PARAMETROS</b> | <b>UNIDADES</b> |
|--|-------------------|-----------------|
| Nombre del RESA                                    | RTC               |                 |
| Ciudad:  | Morelia           |                 |
| Estado:  | Michoacán         |                 |
| Región:  | Oeste             | 2               |
| Se tienen datos específicos de composición         | Si                |                 |
| Inicio de Operaciones                              | 1986              |                 |
| Disposición anual más reciente:                    | 219000.584        | Mg              |
| Año de disposición estimado:                       | 2007              |                 |
| Año de clausura proyectado o actual:               | 2007              |                 |
| Crecimiento en la disposición anual estimada:      | 2.3               | %               |
| Profundidad promedio del sitio:                    | 10                | m               |
| Tipo de diseño y prácticas de manejo:              | 3                 | Semiaeróbico    |
| Ha sido impactado por incendios?                   | Si. 25            | %               |
| Severidad:   | Bajo Impacto      |                 |
| % del área de residuos cubiertos con tubos/venteo: | 30                | %               |
| % del área de residuos con una cobertura final:    | 100               | %               |
| % del área de residuos con cobertura intermedia:   | 0                 | %               |
| % del área de residuos con cobertura diaria:       | 0                 | %               |
| % del área de residuos sin cobertura por arcilla:  | 0                 | %               |
| % del área de residuos con línea de base:          | 0                 | %               |
| Están compactados los residuos con una base?       | Si                |                 |



Se ingresaron a dicho Modelo, los datos de composición de RSU de la caracterización efectuada en el RTC, agrupados con base en la metodología propuesta por SCS Engineers, 2009.

El porcentaje del área de RSU cubiertos con tubos de venteo en el sitio de estudio es de solamente el 30%, pero con la finalidad de realizar comparaciones con las mediciones en campo, se consideró el 100% que corresponde a los 10 m de profundidad del RTC. Se estimó una generación y recuperación de biogás, la cual se proporciona en tres unidades de medida:  $m^3/hr$ , cfm y en mmBtu/hr.

## **7.9 Análisis estadístico de los datos**

### **7.9.1 Análisis de Varianza**

Los datos de campo y de laboratorio se ordenaron por pozo y cuadrante para formar una base de datos en el programa Excel. Con base en los estudios de composición y análisis de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de RSU obtenidas en campo, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el programa estadístico JMP Versión 6.0 (SAS Institute Inc, 2006) por cuadrante, para corroborar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro cuadrantes del sitio de disposición con respecto al comportamiento de estas variables. Una vez obtenidos los resultados se procedió a interpretarlos y discutirlos. Se consideraron 16 sitios para el muestreo ya que la prueba para la determinación del tamaño de muestra arrojó que con esta cantidad se alcanzaba un nivel de confianza del 95 %.

### **7.9.2 Prueba de Tukey**

La prueba de Tukey se realizó para conocer cuáles eran los cuadrantes que presentaban una diferencia estadística representativa. Para que pudiera establecerse una



diferencia, los niveles de los cuadrantes deberían de tener dos o más letras dependiendo de la magnitud; por lo tanto, si se presenta en el estadístico una sola letra (A) ordenada en una sola columna, los cuadrantes no presentan ninguna diferencia estadística; en cambio, si se tiene dos letras (A, B) o más en diferente orden, ésto significa que los estratos son significativamente distintos.

## 8 Resultados y Discusión

A continuación se presentan los resultados de la investigación obtenidos:

### 8.1 Muestreo y caracterización de RSU

La tabla 8.11 presenta el % de RSU por subproductos caracterizados para cada pozo en el RTC que incluye 38 componentes (11 más de lo reportado en la NOM-022).

**Tabla 8.11.** Composición de las muestras de RSU en 16 pozos del RTC de Morelia (% peso fresco)

| Pozo/<br>Subproducto | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         | 11         | 12         | 13         | 14         | 15         | 16         |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Algodón              | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Cartón               | 0          | 5.8        | 0.5        | 16.9       | 2.4        | 5.3        | 10.4       | 4.4        | 6.8        | 9.4        | 0.02       | 0          | 3.9        | 5.8        | 12.6       | 17.2       |
| Cuero                | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Mat. No Ident.       | 55         | 35.5       | 31.5       | 11.2       | 70.1       | 71.4       | 43.9       | 32.7       | 44.3       | 36.3       | 74.8       | 50.8       | 67.3       | 19.4       | 21.0       | 37.6       |
| Tetrapak             | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 1.0        | 1.2        | 0          | 0          | 0          | 0.7        |
| Papel encerado       | 0          | 0.4        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 1.4        | 0          |
| Fibra vegetal        | 0          | 0.3        | 0          | 3.8        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 2.4        | 0          | 2.0        | 0          | 0.3        |
| Fibra sintética      | 0          | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.1        | 0.4        | 0          | 0          | 2.7        |
| Hueso                | 0          | 3.0        | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Hule                 | 0          | 0.2        | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 1.3        | 0          | 0.2        | 0          | 0          | 0.1        | 0.1        |
| Loza y cerámica      | 0          | 0.5        | 0.7        | 1.2        | 0          | 1.2        | 5.5        | 0          | 0          | 0          | 0          | 1.3        | 0          | 1.4        | 0.4        | 0.2        |
| Madera               | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.2        | 6.4        | 2.8        | 0          | 1.0        | 7.4        | 0          | 4.7        |
| Material Const.      | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Aluminio             | 0          | 1.2        | 0          | 7.7        | 0.03       | 0          | 0.2        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.1        | 0.2        | 0          | 0          | 0.1        |
| Hojalata             | 0          | 0.2        | 0.6        | 7.2        | 0.1        | 0          | 0.3        | 0          | 0.2        | 0          | 0.05       | 0          | 3.6        | 0.1        | 0          | 0          |
| Material Ferroso     | 0.7        | 0          | 0.5        | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 18.4       | 0.1        | 0          | 0          | 0.3        | 0          | 0          | 0          | 0.3        |
| Papel                | 1.3        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.1        | 7.6        | 0.8        | 1.9        | 0.5        | 0          |
| Pañal desechable     | 17.1       | 2.2        | 7.9        | 10.6       | 3.05       | 0          | 0          | 7.6        | 0          | 0          | 4.7        | 5.0        | 0          | 12.7       | 0          | 0          |
| Toalla femenina      | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Heces fecales        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Bolsa de botana      | 0.4        | 1.4        | 1.1        | 3.0        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.7        | 0.3        | 1.1        | 0.7        | 0.7        |
| Bolsa de película    | 7.9        | 8.3        | 1.9        | 20.7       | 4.8        | 0          | 16.4       | 20.9       | 4.9        | 9.3        | 4.2        | 8.5        | 3.8        | 23.1       | 3.5        | 6.2        |
| Plástico rígido      | 2.9        | 3.8        | 2.4        | 8.4        | 0.9        | 9.9        | 5.9        | 11.8       | 1.4        | 6.6        | 1.0        | 3.3        | 0.4        | 3.0        | 5.1        | 18.7       |
| PET                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 3.0        | 0          | 1.4        | 5.3        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Hule espuma          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 1.1        | 0.1        |
| Hielo seco           | 0.7        | 1.6        | 0.4        | 0.1        | 0.1        | 0.3        | 0          | 1.25       | 3.4        | 0          | 0.2        | 0.4        | 0.6        | 0          | 0.2        | 0.1        |
| Polipropileno        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.2        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.4        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| R. alimenticios      | 0          | 0.1        | 0          | 2.5        | 0          | 0          | 0          | 0          | 1.3        | 0          | 0          | 1.2        | 0.9        | 0.6        | 0.1        | 0          |
| R. jardinería        | 1.0        | 3.0        | 3.9        | 1.0        | 7.3        | 0.7        | 1.3        | 0          | 0          | 0          | 0.3        | 5.8        | 1.9        | 3.9        | 2.7        | 0.5        |
| Textiles             | 1.2        | 0          | 6.6        | 0          | 6.3        | 1.2        | 0.2        | 0.3        | 10.7       | 0          | 1.3        | 0          | 0          | 0          | 0.1        | 1.1        |
| Vidrio               | 2.5        | 2.7        | 5.8        | 3.4        | 0.02       | 1.3        | 4.6        | 2.5        | 9.2        | 5.6        | 0.9        | 2.6        | 1.5        | 8.9        | 1.3        | 0.1        |
| Pilas eléctricas     | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Papel celofán        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 2.2        | 0          | 0          | 0.1        | 0          | 0          | 0          |
| Colillas             | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Piedras              | 9.3        | 28.6       | 10.7       | 2.1        | 4.8        | 8.8        | 11.2       | 0          | 14.4       | 9.4        | 6.8        | 3.3        | 13.4       | 8.6        | 49         | 8.6        |
| R. peligrosos        | 0          | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Zapatos              | 0          | 0.7        | 25.4       | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 13.5       | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Cabello              | 0          | 0.4        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.1        | 0          |
| <b>TOTAL</b>         | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> |

La tabla 8.12 presenta los resultados de composición de los residuos entre los cuadrantes.

**Tabla 8.12.** Composición promedio por cuadrante en muestras de RSU en el RTC de Morelia (% Peso fresco)

| Subproductos          | Cuadrante  |            |            |            | Promedio   |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                       | I          | II         | III        | IV         |            |
| Algodón               | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Cartón                | 6.31       | 9.94       | 4.38       | 2.60       | 5.35       |
| Cuero                 | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Mat. No Identificable | 31.23      | 35.75      | 66.38      | 59.82      | 48.97      |
| Tetrapak              | 0          | 0.21       | 0          | 0.68       | 0.24       |
| Papel encerado        | 0.38       | 0.12       | 0          | 0          | 0.13       |
| Fibra vegetal         | 0.55       | 0.91       | 0          | 0.38       | 0.43       |
| Fibra sintética       | 0.06       | 0.82       | 0          | 0.02       | 0.16       |
| Hueso                 | 0.02       | 0.86       | 0          | 0.02       | 0.15       |
| Hule                  | 0.03       | 0.06       | 0          | 0.21       | 0.08       |
| Loza y cerámica       | 0.59       | 0.43       | 1.14       | 0.22       | 0.58       |
| Madera                | 2.17       | 1.35       | 0          | 2.36       | 1.57       |
| Material Const.       | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Aluminio              | 0.03       | 1.92       | 0.05       | 0.01       | 0.34       |
| Hojalata              | 0.69       | 1.47       | 0.09       | 0.06       | 0.49       |
| Material Ferroso      | 2.44       | 0.27       | 0          | 0.07       | 0.78       |
| Papel                 | 0.77       | 0.30       | 0          | 1.32       | 0.67       |
| Pañal desechable      | 5.74       | 6.64       | 1.82       | 3.19       | 4.19       |
| Toalla femenina       | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Heces fecales         | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Bolsa de botana       | 0.73       | 1.29       | 0          | 0.11       | 0.46       |
| Bolsa de película     | 10.82      | 10.05      | 5.42       | 5.73       | 7.87       |
| Plástico rígido       | 4.19       | 8.78       | 3.88       | 2.20       | 4.29       |
| PET                   | 0          | 0          | 0          | 2.15       | 0.64       |
| Hule espuma           | 0.29       | 0.03       | 0          | 0          | 0.09       |
| Hielo seco            | 0.38       | 0.67       | 0.11       | 0.80       | 0.49       |
| Polipropileno         | 0          | 0          | 0.10       | 0.23       | 0.09       |
| R. alimenticios       | 0.34       | 0.52       | 0          | 0.45       | 0.32       |
| R. jardinería         | 2.76       | 1.44       | 4.72       | 1.10       | 2.52       |
| Textiles              | 1.18       | 0.59       | 4.08       | 2.70       | 2.23       |
| Vidrio                | 4.31       | 2.06       | 1.05       | 3.40       | 2.88       |
| Pilas eléctricas      | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Papel celofán         | 0.02       | 0          | 0          | 0.30       | 0.09       |
| Colillas              | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| Piedras               | 19.70      | 13.20      | 6.77       | 8.03       | 12.03      |
| R. peligrosos         | 0          | 0.01       | 0          | 0          | 0.002      |
| Zapatos               | 4.25       | 0.19       | 0          | 1.86       | 1.84       |
| Cabello               | 0.03       | 0.12       | 0          | 0          | 0.03       |
| <b>Total</b>          | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> |

En la caracterización realizada se encontraron una mayor cantidad de componentes de residuos que los previstos en la NOM 022, de los cuales el material no identificable fue predominante con un 48.9 % en promedio para todo el RTC de Morelia





(se entiende como material no identificable a aquellos residuos que por su degradación es difícil caracterizarse en una muestra de RSU). Este resultado es lógico si se considera que se trabajó con muestras obtenidas del sitio de disposición donde prevalecen las condiciones de degradación anaerobia sobre la masa de residuos. Por otro lado, a pesar que se han implementado programas de separación de RSU en Morelia, continúa siendo elevado el depósito de algunos componentes reciclables tales como el cartón, plástico rígido, de película y el vidrio. Solo en algunos materiales se han disminuido su disposición en el sitio y tienen que ver con aquellos con un alto valor económico y de demanda, tales como el aluminio, tereftalato de polietileno y material ferroso.

Por otro lado, la tabla 8.13 presenta la composición de los residuos de la caracterización de 50 kg obtenidos en 50 unidades de recolección de la ciudad de Morelia.

**Tabla 8.13.** Composición promedio en muestras de RSU de la ciudad de Morelia (% Peso fresco)

| <b>Subproductos</b>       | <b>Promedio</b> |
|---------------------------|-----------------|
| Algodón                   | 0.06            |
| Cartón                    | 3.1             |
| Cuero                     | 0.01            |
| Residuo fino              | 7.8             |
| Tetrapak                  | 1.16            |
| Fibra dura vegetal        | 2.43            |
| Fibra sintética           | 0.27            |
| Hueso                     | 0.64            |
| Hule                      | 0.12            |
| Loza y Cerámica           | 1.21            |
| Madera                    | 0.62            |
| Material de Construcción  | 0.99            |
| Aluminio                  | 0.32            |
| Hojalata                  | 0.31            |
| Material Ferroso          | 0.39            |
| Papel                     | 3.75            |
| Papel higiénico           | 7.92            |
| Pañal desechable          | 5.4             |
| Toalla femenina           | 0.33            |
| Heces fecales             | 0.27            |
| Bolsa de botana           | 1.05            |
| Bolsa de película         | 7.55            |
| Plástico rígido           | 2.94            |
| PET                       | 0.64            |
| Polietileno alta densidad | 0.31            |
| Hielo seco                | 0.97            |
| Polipropileno             | 0               |
| Residuos alimenticios     | 30.49           |
| Residuos de jardinería    | 9.79            |
| Trapo                     | 3.7             |
| Vidrio                    | 2.25            |
| Pilas eléctricas          | 0.03            |
| Papel celofán             | 0               |
| Colillas                  | 0.01            |
| Piedras                   | 0.39            |
| Residuos peligrosos       | 0               |
| Zapatos                   | 0.76            |
| Cabello                   | 0.16            |
| Tierra                    | 0.1             |
| PVC                       | 0.04            |
| Material eléctrico        | 0.66            |
| Carbón                    | 0.06            |
| Caucho                    | 0.13            |
| Polietileno baja densidad | 0.06            |
| Pintura                   | 0.29            |
| Concha                    | 0.33            |
| Animal muerto             | 0.04            |

Existen diferencias entre la composición de los RSU del sitio y la de las unidades de recolección; particularmente en los subproductos de residuos alimenticios, de jardinería y papel higiénico (48.2 % en las unidades de recolección), pues apenas comienzan el proceso de degradación de la composición orgánica que se acelera con su disposición en los RESA por acción de las bacterias bajo condiciones anaerobias (Gendebien et al., 1992, Oonk, 1996).

El estudio de caracterización efectuado en el 2011 en la ciudad de Morelia dio como resultado un 77.57% de componentes orgánicos; similar al 77.07% encontrado en un estudio realizado en el 2004 (Claudio, 2006), lo cual refleja que aunque la ciudad de Morelia ha experimentado cambios económicos, estos no se han extendido a toda la población prevaleciendo los patrones de consumo de acuerdo con el estilo de vida rural.

La tabla 8.14 presenta el porcentaje de composición orgánica e inorgánica por cuadrante en las muestras analizadas en el sitio de disposición.

**Tabla 8.14.** Componente orgánico e inorgánico promedio en las muestras del RTC de Morelia (%) por pozo

| <b>Cuadrante</b>            | <b>Composición Orgánica</b> | <b>DesvEst.</b> | <b>Composición Inorgánica</b> | <b>DesvEst.</b> |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
| <b>I</b>                    | 53                          | 18.2            | 47                            | 18.2            |
| <b>II</b>                   | 52.5                        | 11.6            | 47.5                          | 11.6            |
| <b>III</b>                  | 73.7                        | 16              | 26.3                          | 16              |
| <b>IV</b>                   | 69.6                        | 7.6             | 30.4                          | 7.6             |
| <b>Promedio en el sitio</b> | 63.2                        | 4.71            | 36.8                          | 4.71            |

Del total de la composición de RSU en el sitio de estudio, el componente orgánico ocupa en promedio el 63.2%; sin embargo, en términos generales son resultados proporcionales al periodo de confinamiento de los RSU. Con respecto a la composición de los RSU entre los cuadrantes se muestra una gran heterogeneidad en los resultados pues los residuos más antiguos o con mayor tiempo de disposición (cuadrante I) tienen un índice de degradación más alto que los residuos más recientes (cuadrante



IV); esto puede deberse a diversos factores tales como las variaciones estacionales y la modificación en los patrones de consumo debido a los cambios económicos y demográficos experimentados en la ciudad (Buenrostro et al., 2001, Buenrostro et al., 2003). Es importante considerar que los resultados obtenidos también pueden depender de otros factores como la cantidad y composición de los residuos que se depositaron en los cuadrantes, así como a las labores de manejo (SCS Engineers, 2009). Se observa una influencia del tiempo de disposición en el componente orgánico de los RSU en el sitio con respecto a su degradación posterior al ser depositados. La composición orgánica biodegradable es uno de los factores más importantes que se deben conocer, ya que de ello dependerá la cantidad de biogás que pueda generarse (Robles, 2008).

La tabla 8.15 muestra los resultados de los RSU con base a su capacidad de degradación en cierto tiempo en el sitio de disposición.

**Tabla 8.15.** Capacidad de degradación de los RSU en el RTC de Morelia (%)

| Cuadrantes                  | Moderadamente |        | Moderadamente |       | No biodegradables |
|-----------------------------|---------------|--------|---------------|-------|-------------------|
|                             | Muy Rápida    | rápida | Lenta         | Lenta |                   |
| I                           | 32.7          | 4.1    | 7.5           | 2.2   | 53.4              |
| II                          | 37.6          | 2.6    | 11.3          | 2.3   | 46.1              |
| III                         | 66.7          | 4.7    | 8.5           | 0.0   | 20.1              |
| IV                          | 60.9          | 2.8    | 5.3           | 2.4   | 28.6              |
| <b>Promedio en el sitio</b> | 49.5          | 3.6    | 8.2           | 1.7   | 37.0              |

De las categorías de degradación de los RSU, más del 60 % es de degradación muy rápida en la última porción donde se depositaron los residuos (cuadrante III y IV). Respecto a los otros tres parámetros de biodegradabilidad, relativamente existe poca variación que se acentúa para los residuos de degradación lenta.

La tabla 8.16 muestra los resultados de composición orgánica de RSU por cuadrante conforme a las categorías de degradación orgánica de RSU propuestas en SCS Engineers, 2009.



**Tabla 8.16.** Componente orgánico por categoría de degradación de RSU, por cuadrante y promedio en el sitio (%)

| <b>Parámetros/Cuadrante</b>               | <b>I</b> | <b>DE</b> | <b>II</b> | <b>DE</b> | <b>III</b> | <b>DE</b> | <b>IV</b> | <b>DE</b> | <b>Promedio en el Sitio</b> |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|
| Componente orgánico (63.2 %)              |          |           |           |           |            |           |           |           |                             |
| R alimenticios/ fracción no identificable | 31.6     | 10.6      | 36.3      | 12.9      | 66.4       | 26.6      | 60.3      | 24.3      | 48.7                        |
| Papel y cartón                            | 7.1      | 2.7       | 10.2      | 4         | 4.4        | 1.5       | 3.9       | 1.8       | 6.4                         |
| Textiles                                  | 1.3      | 0.6       | 1.5       | 0.7       | 4.1        | 2.2       | 2.7       | 1.2       | 2.4                         |
| Madera y paja                             | 2.2      | 1.1       | 1.4       | 0.7       | 0          | 0         | 2.4       | 1         | 1.5                         |
| Residuos de jardín                        | 3.3      | 1.3       | 2.3       | 1         | 4.7        | 2.5       | 1.5       | 0.8       | 2.9                         |
| Cabello, Heces, Huesos                    | 1.2      | 0.5       | 1.5       | 0.4       | 0.4        | 0.2       | 0.6       | 0.3       | 0.9                         |

DE: Desviación Estándar

Los resultados de la tabla 8.15 presentan cierta diferencia con los presentados por las categorías de degradación en la tabla 8.16; esta diferencia se encuentra en que las categorías incluyen algunos subproductos no contemplados en la agrupación propuesta por SCS Engineers (2009). La mayor cantidad de residuos alimenticios y fracción no identificable se encuentra en los cuadrantes III y IV, cuyos residuos son los de más fácil degradación en el sitio.

## 8.2 Análisis fisicoquímico en las muestras de RSU

La tabla 8.17 presenta el análisis de temperatura, pH y humedad en las muestras de los 16 pozos.

**Tabla 8.17.** Parámetros fisicoquímicos promedio de temperatura, pH y humedad en las muestras del RTC de Morelia por pozo

| Pozo                        | Temperatura (°C) | pH   | DesvEst | Humedad (%) | DesvEst |
|-----------------------------|------------------|------|---------|-------------|---------|
| 1                           | 29.8             | 8.4  | 0.05    | 31.4        | 7.5     |
| 2                           | 28.1             | 9.1  | 0.06    | 38.7        | 1.7     |
| 3                           | 26.5             | 9.1  | 0.07    | 35.9        | 2.7     |
| 4                           | 28.5             | 9.0  | 0.04    | 48.0        | 5.0     |
| 5                           | 27.2             | 8.3  | 0.07    | 42.1        | 7.9     |
| 6                           | 24.4             | 8.3  | 0.26    | 37.6        | 2.5     |
| 7                           | 33.4             | 8.2  | 0.15    | 31.7        | 6.9     |
| 8                           | 41.8             | 8.7  | 0.05    | 27.0        | 6.3     |
| 9                           | 41.9             | 8.5  | 0.21    | 32.3        | 4.5     |
| 10                          | 35.3             | 7.8  | 0.28    | 33.3        | 5.0     |
| 11                          | 26.2             | 8.7  | 0.02    | 30.1        | 5.5     |
| 12                          | 44.0             | 7.0  | 0.18    | 31.2        | 1.8     |
| 13                          | 40.4             | 9.1  | 0.03    | 35.5        | 0.4     |
| 14                          | 35.5             | 8.8  | 0.21    | 41.5        | 3.9     |
| 15                          | 34.3             | 6.1  | 0.18    | 31.2        | 1.4     |
| 16                          | 27.5             | 7.1  | 0.08    | 21.8        | 1.7     |
| <b>Promedio en el Sitio</b> | 32.80            | 8.26 | 0.12    | 34.33       | 4.06    |

Es de hacer notar en la tabla 8.17, que 8 de los 16 pozos muestreados presentan temperaturas inferiores a 30°C; aunque durante el periodo de muestreo de la producción de CH<sub>4</sub> en los tubos de venteo se registraron temperaturas del biogás entre 35 a 40°C. La temperatura óptima para el desarrollo de las bacterias anaerobias mesófilas y de degradación de los RSU se da en un rango que va entre 15 y 45°C (Barlaz et al., 1989). De acuerdo a lo reportado por Yilmaz et al., (2003), el rango de temperatura mesofílico es un factor crítico para la óptima degradación de la fracción orgánica de los residuos. Cabe destacar que solamente se tomó la temperatura durante la obtención de la muestra en campo, por lo que no se presenta una desviación estándar. Con las muestras



resultantes del proceso de determinación de humedad, se efectuaron los análisis químicos de ST, cenizas y SV (tabla 8.18).

**Tabla 8.18.** Parámetros fisicoquímicos promedio de ST, Cenizas y SV en las muestras del RTC de Morelia (%) por pozo

| Pozo                        | ST   | DesvEst | Cenizas | DesvEst | SV   | DesvEst |
|-----------------------------|------|---------|---------|---------|------|---------|
| 1                           | 68.6 | 7.5     | 21.4    | 5.2     | 78.6 | 5.2     |
| 2                           | 61.3 | 1.7     | 65.7    | 1.9     | 34.3 | 1.9     |
| 3                           | 64.1 | 2.7     | 50.7    | 4.7     | 49.3 | 4.7     |
| 4                           | 52   | 5.0     | 60.8    | 7.1     | 39.2 | 7.1     |
| 5                           | 57.9 | 7.9     | 30.1    | 8.7     | 69.9 | 8.7     |
| 6                           | 62.4 | 2.5     | 41.5    | 10.1    | 58.5 | 10.1    |
| 7                           | 68.3 | 6.9     | 67.8    | 5.1     | 32.2 | 5.1     |
| 8                           | 73   | 6.3     | 71.6    | 25.2    | 28.4 | 25.2    |
| 9                           | 67.7 | 4.5     | 20.2    | 5.6     | 79.8 | 5.6     |
| 10                          | 66.7 | 5.0     | 61.7    | 10.7    | 38.3 | 10.7    |
| 11                          | 69.9 | 5.5     | 22.3    | 7.5     | 77.7 | 7.5     |
| 12                          | 68.5 | 0.3     | 72.8    | 2.3     | 27.2 | 2.3     |
| 13                          | 64.5 | 0.4     | 82.7    | 1.0     | 17.3 | 1.0     |
| 14                          | 58.5 | 3.9     | 64.1    | 8.8     | 35.9 | 8.8     |
| 15                          | 68.8 | 1.4     | 63.6    | 3.4     | 36.4 | 3.4     |
| 16                          | 78.2 | 1.7     | 62.8    | 5.3     | 37.2 | 5.3     |
| <b>Promedio en el Sitio</b> | 65.7 | 4.0     | 53.7    | 7.0     | 46.3 | 7.0     |

La tabla 8.19 muestra los resultados de los parámetros fisicoquímicos por cuadrante.

**Tabla 8.19.** Parámetros fisicoquímicos en las muestras de RSU del RTC de Morelia por cuadrante

| Cuadrante   | I    | II   | III  | IV   |
|-------------|------|------|------|------|
| T(°C)       | 35.7 | 28.5 | 28.3 | 36.9 |
| DesvEst.    | 6    | 1    | 4.6  | 8    |
| pH          | 8.4  | 8.4  | 8.3  | 8    |
| DesvEst.    | 1.3  | 0.9  | 0.1  | 0.8  |
| Humedad (%) | 34.2 | 35   | 37.1 | 31.7 |
| DesvEst.    | 5.4  | 11.1 | 5.3  | 1.4  |
| ST          | 65.8 | 65   | 62.9 | 68.2 |
| DesvEst.    | 5.4  | 11.1 | 5.3  | 1.4  |
| Cenizas     | 66.5 | 52.7 | 46.5 | 44.3 |
| DesvEst.    | 11.7 | 20.9 | 19.4 | 27   |
| SV          | 33.5 | 47.3 | 53.5 | 55.7 |
| DesvEst.    | 11.7 | 20.9 | 19.4 | 27   |



Las bacterias metanogénicas son extremadamente sensibles a los niveles de pH, cuya biodegradación puede ser inhibida a altos valores y con un valor óptimo entre 6.5 y 7.2 (Chen et al., 2010). Los valores de pH presentados por los residuos dispuestos en el RTC y entre los cuadrantes fueron predominantemente básicos entre 8.0-8.4 (tabla 7.19), debido al estado de degradación de los residuos orgánicos donde se involucra la presencia de las bacterias estrictamente anaerobias formadoras de CH<sub>4</sub> (Lethlean et al., 1998). El pH es un parámetro importante en la descomposición de los RSU porque las condiciones ácido/base influyen la fase metanogénica (Francois et al., 2007).

Los valores de humedad en el sitio se encuentran en un rango entre 31-37% para los cuadrantes. Yilmaz et al., (2003) mencionan que los valores de humedad se encuentran entre el 25-60 % (base húmeda) y al igual que El-Fadel et al., (1996), argumentan que la humedad es uno de los factores más importantes para la producción de biogás en un RESA, pues es esencial para las reacciones químicas y biológicas que tienen lugar en la matriz de los residuos, además de que estimula la actividad microbiana porque provee un mejor contacto entre el sustrato y los microorganismos. Por su parte, Reinhart et al., (2002) señalan que se requiere un contenido de humedad entre 65-70% en la matriz de residuos para acelerar la degradación anaeróbica. A 3 metros de profundidad los resultados no muestran una clara diferencia en el contenido de humedad entre los cuadrantes; sin embargo, las cantidades de biogás emitido en el sitio son significativas (45.6 % de CH<sub>4</sub> en volumen) lo que permite aseverar que está ocurriendo una degradación al igual que en otros sitios muestreados.

Los resultados sobre ST muestran valores entre 62-68% (+/- 3%), los más bajos se encuentran en el cuadrante II y III, aunque no es clara la diferencia, sin embargo, estos valores se relacionan con un menor contenido de humedad en estas porciones del sitio. El cuadrante IV es el de menor variación lo que significa que en dicho cuadrante, los



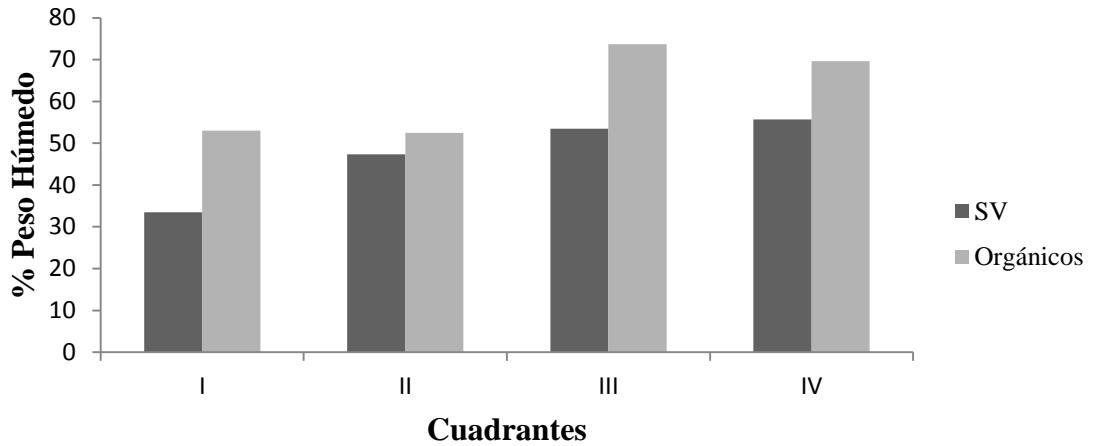


residuos presentan una humedad más homogénea con respecto a las demás porciones del sitio. En la determinación de ST en una muestra, se conocen el porcentaje de residuos peso seco y la humedad presente en la muestra por lo que son complementarias y guardan una relación.

El contenido de cenizas indica aquella porción de los RSU que no puede degradarse ni producir biogás, presentando un promedio que va del 45 y 55 %, Casi la mitad de los residuos depositados en el sitio ya se han degradado o por sus características fisicoquímicas no pueden degradarse en el sitio de disposición ni producir biogás.

Los resultados del contenido de SV se presentaron en un rango de 33-56%; una gran variación que reflejó los niveles de degradación de los RSU entre cuadrantes. Los cuadrantes III y IV presentan los valores más altos de SV, lo que se relaciona con el tiempo de confinamiento en el RTC de Morelia. De acuerdo con Metha et al., (2002) los SV son un buen parámetro para indicar la degradación de la materia orgánica de los RSU en un RESA a través del tiempo; y consecuentemente, un indicador del potencial del producción de  $CH_4$ . Los valores de SV están en un rango de 33-56%, con la menor cantidad en el cuadrante I y la mayor cantidad en promedio en el cuadrante IV. El contenido de SV ha sido usado para expresar el contenido de materia orgánica presente en los residuos sólidos y es muy importante en la formación de biogás en un RESA.

La figura 8.2 muestra una comparación de los promedios del componente orgánico con respecto a los SV. El sitio de estudio presenta un promedio de 62.4 % de contenido orgánico frente al 47.5 % en promedio de los SV.



**Figura 8.2.** Comparación entre el % de SV y el contenido orgánico en muestras de RSU del RTC de Morelia, por cuadrante

Los resultados de la figura anterior permiten observar una relación entre la degradación anaerobia del contenido orgánico de los RSU a lo largo del tiempo, pues se presenta una menor cantidad de las variables en cuestión en los primeros dos cuadrantes y con mayor tiempo depositados a diferencia de los dos últimos.

### 8.3. Análisis de biogás en el sitio de estudio

La tabla 8.20 muestra los resultados promedio de emisión de biogás por mes en el sitio de disposición.

**Tabla 8.20.** Resultados promedio de las emisiones de biogás en el RTC de Morelia (% v/v)

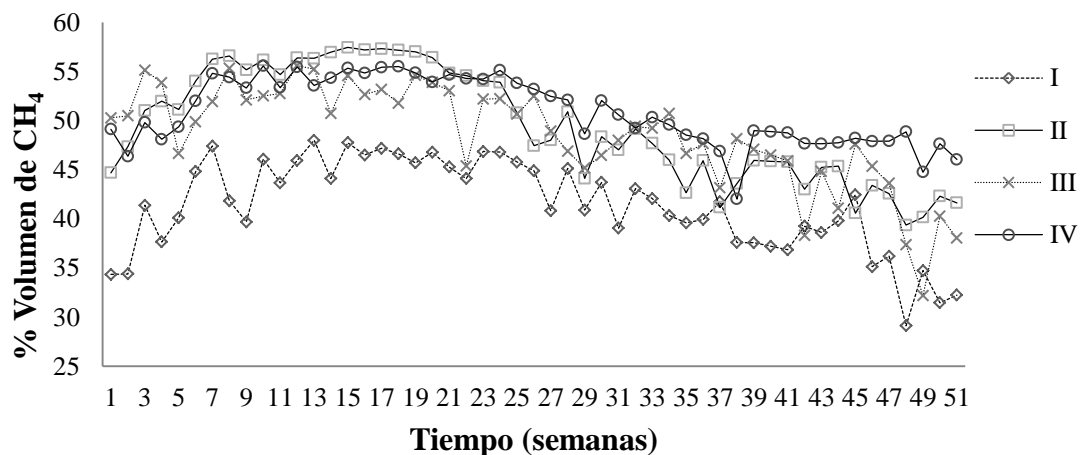
| Meses           | CH <sub>4</sub> | DesvEst | CO <sub>2</sub> | DesvEst | O <sub>2</sub> | DesvEst | Balance | DesvEst |
|-----------------|-----------------|---------|-----------------|---------|----------------|---------|---------|---------|
| Enero           | 43.8            | 2.5     | 30.9            | 1.8     | 3.6            | 1.0     | 21.7    | 3.5     |
| Febrero         | 42.6            | 3.7     | 30.3            | 2.4     | 3.6            | 1.6     | 23.6    | 4.6     |
| Marzo           | 42.3            | 3.8     | 30.1            | 2.7     | 3.6            | 1.7     | 24      | 5.0     |
| Abril           | 39.2            | 4.4     | 28.6            | 3.2     | 4.4            | 2.0     | 27.8    | 5.5     |
| Mayo            | 39.3            | 6.1     | 28.8            | 5.1     | 4.6            | 2.5     | 24.2    | 11.8    |
| Junio           | 45.7            | 5.8     | 33.9            | 2.6     | 2.8            | 1.1     | 18.2    | 5.6     |
| Julio           | 50.1            | 5.3     | 35.8            | 2.9     | 2              | 1.1     | 12.1    | 6.0     |
| Agosto          | 50.7            | 3.1     | 35.6            | 2.0     | 1.9            | 0.8     | 12.1    | 4.5     |
| Septiembre      | 51.1            | 1.7     | 35.3            | 1.2     | 1.9            | 0.7     | 11.7    | 2.2     |
| Octubre         | 49.4            | 2.9     | 34.1            | 1.8     | 2.3            | 1.0     | 14.2    | 3.8     |
| Noviembre       | 47.7            | 2.8     | 33.4            | 1.7     | 2.6            | 0.9     | 16.3    | 3.6     |
| Diciembre       | 44.9            | 3.2     | 31.7            | 2.1     | 3.7            | 1.2     | 19.7    | 4.2     |
| <b>Promedio</b> | 45.6            | 3.8     | 32.4            | 2.4     | 3.1            | 1.3     | 18.8    | 5.0     |

La generación promedio de emisión fue de 45.6 % de CH<sub>4</sub>, 32.4 % de CO<sub>2</sub>, 3.1 % de O<sub>2</sub> y 18.9 % en Balance (N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S) para el periodo de muestreo; sin embargo, ésta no es homogénea a todo el sitio. En la medición de biogás efectuada se detectó una circulación de aire en la capa superficial de los tubos de venteo pues no se colocó el material adecuado como la bentonita para compactarlos; por ello, se encontró cierto porcentaje de O<sub>2</sub> en la medición. No existe entrada de aire al interior pues la presión al interior del sitio de disposición es mayor que en la superficie. La tabla 8.21 muestra las mediciones promedio de biogás por cuadrante.

**Tabla 8.21.** Resultados promedio de las mediciones de biogás en el RTC de Morelia, por cuadrante (% v/v)

| Cuadrante | Composición de Biogás (%) |         |                 |         |                |         |         |         |
|-----------|---------------------------|---------|-----------------|---------|----------------|---------|---------|---------|
|           | CH <sub>4</sub>           | DesvEst | CO <sub>2</sub> | DesvEst | O <sub>2</sub> | DesvEst | Balance | DesvEst |
| I         | 41.3                      | 15.1    | 27.7            | 10.3    | 4.4            | 4.9     | 26.5    | 21.0    |
| II        | 49.4                      | 8.4     | 35.4            | 5.3     | 2.2            | 2.9     | 12.7    | 10.6    |
| III       | 48.5                      | 5.9     | 35.4            | 4,5     | 2.7            | 2.0     | 13.4    | 8.4     |
| IV        | 44.5                      | 16.6    | 32.8            | 9,2     | 2.5            | 3.3     | 20.2    | 22.9    |

Los resultados de la tabla 8.21 con respecto al CH<sub>4</sub>, muestran una mayor producción en el cuadrante III, lo que coincide con los resultados sobre la presencia de los RSU de muy rápida degradación en este cuadrante; por lo tanto, se observa que existe una influencia de la edad y el tiempo de confinamiento en la degradación de los RSU lo que incide en la producción diferencial de las tasas de emisión de biogás en el RTC de Morelia a lo largo del tiempo, a pesar de las deficiencias en su cobertura. En el cuadrante I se especula que un gran porcentaje del componente orgánico fue degradado y en contraste, los resultados sugieren que en el cuadrante IV, la fase metanogénica no ha alcanzado su máximo nivel. La figura 8.3 muestra el porcentaje promedio de emisiones de CH<sub>4</sub> por cuadrante durante el periodo de muestreo.

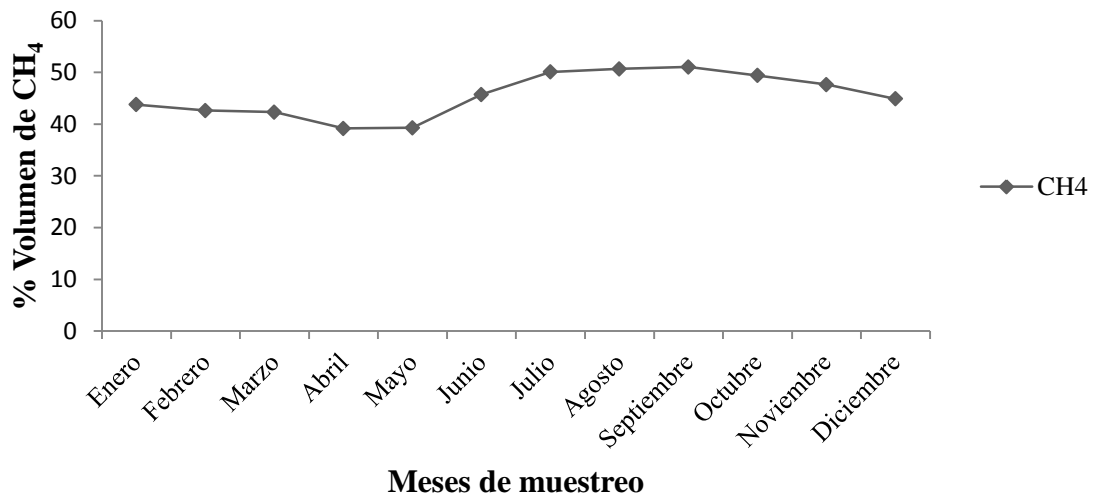


**Figura 8.3.** Emisión de CH<sub>4</sub> durante el periodo de muestreo por cuadrante

En la figura 8.3 se muestra una variación estacional en la generación de CH<sub>4</sub>, influenciada por los efectos en los cambios de temperatura y composición. Se observó

un incremento en las emisiones de  $\text{CH}_4$  durante la temporada de lluvias (julio-octubre de la semana 5 a 21) y se registró un decremento durante la temporada de sequía (noviembre-junio de la semana 23 a 52), debido a una menor disponibilidad de humedad (IPCC, 2006).

La figura 8.4 muestra el comportamiento de la emisión de  $\text{CH}_4$  para el RTC durante el año de muestreo.



**Figura 8.4.** Emisión de  $\text{CH}_4$  (% v/v) por mes en el RTC de Morelia.

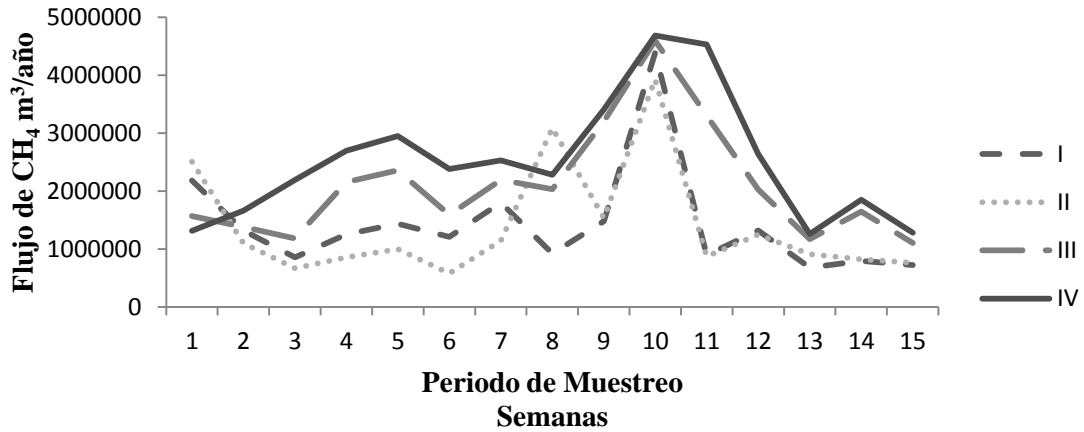
A tres metros de profundidad, se midió en campo un flujo de  $\text{CH}_4$  de 285.76  $\text{m}^3/\text{hr}$ ; resultado que se multiplicó con el promedio en v/v de  $\text{CH}_4$  y las 8760 horas que tiene un año para calcular el flujo a la profundidad del RTC de Morelia (10 m). Para poder efectuar una comparación con los resultados obtenidos con el Modelo Mexicano de Biogás, versión 2.0; se calculó el flujo total de  $\text{CH}_4$  en el RTC de Morelia, pues solo se disponía de datos de la cantidad total de RSU dispuestos a la profundidad del sitio. La tabla 8.22 presenta el flujo promedio por tubo de venteo en el RTC de Morelia.



**Tabla 8.22.** Resultados promedio por tubo de venteo del flujo emitido a 10 metros en el RTC de Morelia ( $m^3/año$ ) durante el muestreo en 2011

| <b>Tubo de Venteo</b> | <b>Flujo <math>CH_4</math> (<math>m^3/año</math>)</b> |
|-----------------------|---|
| 1                     | 213516.38   |
| 2                     | 276656.23   |
| 3                     | 359276.06   |
| 4                     | 484277.53   |
| 5                     | 193688.50   |
| 6                     | 327221.48   |
| 7                     | 312418.01   |
| 8                     | 187522.67   |
| 9                     | 82834.72  |
| 10                    | 247838.94   |
| 11                    | 307706.21   |
| 12                    | 204756.81   |
| 13                    | 196541.73   |
| 14                    | 234956.93   |
| 15                    | 264599.85   |
| 17                    | 226045.89   |
| 18                    | 165087.95   |
| 19                    | 229516.63   |
| 20                    | 126402.91   |
| 21                    | 143511.95   |
| 22                    | 122076.22   |
| 23                    | 39815.94  |
| 24                    | 145011.85   |
| 25                    | 179009.87   |
| 26                    | 129092.65   |
| 27                    | 138456.42   |
| 28                    | 157647.29   |
| 29                    | 43304.80  |
| 30                    | 100873.46   |
| 31                    | 35165.62  |
| 32                    | 90425.21  |
| 33                    | 211993.63   |
| 34                    | 194156.49   |
| 35                    | 185675.60   |
| 36                    | 157527.77   |
| 37                    | 152314.87   |
| 38                    | 93736.29  |
| 39                    | 95576.93  |
| 40                    | 134828.24   |
| 41                    | 93894.98  |
| 42                    | 141171.53   |
| 43                    | 155411.27   |
| 44                    | 103050.43   |
| 45                    | 125108.72   |
| 46                    | 137406.48   |
| 47                    | 158659.46   |
| 48                    | 130327.68   |
| 49                    | 108137.30   |
| <b>Suma</b>           | <b>8,344,234.37</b>                                   |

La figura 8.5 muestra el flujo de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>/año) por cuadrante en el sitio de estudio.



**Figura 8.5.** Flujo promedio de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>/año) en el RTC de Morelia durante el muestreo de 2011, por cuadrante.

La finalidad de dividir el RTC de Morelia por cuadrantes fue para mostrar como las condiciones de composición y degradabilidad de la masa de RSU cambian inclusive en un mismo sitio. El cuadrante IV registró el mayor flujo promedio de emisión de CH<sub>4</sub> (2, 688,680 m<sup>3</sup>/año) y en contraparte el cuadrante I fue el de menor registro (1,631,6951 m<sup>3</sup>/año), lo que sugiere un efecto del tiempo de confinamiento de los RSU y por lo tanto, su estado de degradación.

#### 8.4 Determinación matemática de L<sub>0</sub>

Para calcular L<sub>0</sub> con la ecuación 1.14 (IPCC, 2006), primeramente se calcularon las variables involucradas en la misma. El valor de DOC se calculó con los datos de caracterización de la composición orgánica de los RSU (peso húmedo) de la tabla 8.16. La tabla 8.23 muestra los resultados:

**Tabla 8.23.** Contenido de DOC por cuadrante (fracción peso húmedo)

| Residuos de composición Orgánica             | Cuadrante      |               |               |               | Promedio en el RTC | Promedio en Morelia |
|--|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|---------------------|
|  | I              | II            | III           | IV            |                    |                     |
| R alimenticios/<br>Fracción no identificable | 0.0284         | 0.0408        | 0.0176        | 0.0156        | 0.0256             | 0.06543             |
| Papel y Cartón                               | 0.0052         | 0.006         | 0.0164        | 0.0108        | 0.0096             | 0.05764             |
| Textiles                                     | 0.00561        | 0.00391       | 0.0079        | 0.00255       | 0.0051             | 0.022215            |
| Madera y Paja                                | 0.00204        | 0.00255       | 0.0007        | 0.00102       | 0.00153            | 0.002458            |
| Residuos de jardín                           | 0.0474         | 0.05445       | 0.0996        | 0.09045       | 0.0729             | 0.020767            |
| Caucho, Cuero y Huesos                       | 0.0066         | 0.0042        | 0             | 0.0072        | 0.0045             | 0.002274            |
| <b>Σ (fracción peso húmedo)</b>              | <b>0.09525</b> | <b>0.1119</b> | <b>0.1423</b> | <b>0.1276</b> | <b>0.1192</b>      | <b>0.7078</b>       |

La tabla 8.24 muestra los resultados de  $DOC_f$ , utilizando la ecuación 1.17 del IPCC, 2006:

**Tabla 8.24.** Contenido de  $DOC_f$  por cuadrante, sitio y ciudad (fracción)

| Parámetros                           | Cuadrante   |             |             |             | RTC         | Morelia     |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                      | I           | II          | III         | IV          |             |             |
| Sólidos Volátiles Iniciales (% TS)   | 76.99       | 79.92       | 64.75       | 74.64       | 74.075      | 74.075      |
| Sólidos Volátiles Finales            | 10.93       | 9.65        | 1.41        | 0.21        | 5.55        | 7.88        |
| <b><math>DOC_f</math> (Fracción)</b> | <b>0.66</b> | <b>0.70</b> | <b>0.63</b> | <b>0.74</b> | <b>0.69</b> | <b>0.69</b> |

En los cálculos realizados no se incluyen los valores predeterminados de  $DOC_f$  de 0.5 y 0.77 (IPCC, 2006; Machado et al., 2008; Thompson and Tanapat., 2004), debido a que no se realizó la determinación del contenido de celulosa y no se conoce su porcentaje en el sitio.

Se utilizó un valor de MCF de 0.8 catalogado en SCS Engineers (2009) como de condición desconocida, por ser un sitio con una profundidad de 10 m pero no se tiene un registro exacto de la disposición de RSU a lo largo de los años. Con la integración de los valores anteriores se calculó el  $DDOC_m$  (tabla 8.25).



**Tabla 8.25.** Contenido de DDOCm (Mg)

| Parámetro                        | DDOCm (Mg) |
|----------------------------------|------------|
| I                                | 50.28      |
| II                               | 62.98      |
| III                              | 72.06      |
| IV                               | 76.03      |
| RTC                              | 64.51      |
| Promedio en la ciudad de Morelia | 94.46      |

Con la obtención de DDOCm se calculó  $L_0$  (tabla 8.26).

**Tabla 8.26.** Potencial de generación de  $CH_4$  por cuadrante y sitio en  $m^3/Mg$  RSU (peso húmedo)

| Cuadrante y sitio                | $L_0$ ( $m^3/Mg$ ) |
|----------------------------------|--------------------|
| I                                | 27.49              |
| II                               | 41.15              |
| III                              | 47.08              |
| IV                               | 45.62              |
| RTC                              | 39.57              |
| Promedio en la ciudad de Morelia | 57.94              |

Los resultados de la ecuación 1.14 muestran valores distintos sobre el potencial de generación que reflejan la diferencia existente en un mismo sitio y en la ciudad.

Se utilizaron constantes ya establecidas para calcular  $L_0$  en la ecuación 1.14, como DOCf, F y DDOCm. En el caso de DOCf se utilizaron dos ecuaciones que muestran una diferencia de 0.0578 lo que repercutió en los resultados sobre DDOCm con una diferencia de 3.12 y por consiguiente en la estimación de la emisión de  $CH_4$  en el sitio.

Para calcular  $L_0$  con la ecuación 1.19 (Lobo, 2003) se obtuvo primeramente la fracción biodegradable de los residuos (BFw) y  $C_m$ . Los valores de BFw se calcularon de acuerdo con la ecuación 1.20. La tabla 8.27 muestra los resultados por cuadrante y sitio.

**Tabla 8.27.** Contenido de BFW por cuadrante y sitio (fracción peso seco)

| Residuos de composición orgánica                | Cuadrante   |             |             |             | Promedio en el RTC | Promedio en Morelia |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|---------------------|
|   | I           | II          | III         | IV          |                    |                     |
| Residuos alimenticios/fracción no identificable | 0.0204      | 0.0276      | 0.0598      | 0.0494      | 0.0374             | 0.0504              |
| Papel   | 0.0128      | 0.0237      | 0.0124      | 0.0067      | 0.0129             | 0.0409              |
| Cartón  | 0.0016      | 0.0007      | 0           | 0.0034      | 0.0016             | 0.0113              |
| Textiles  | 0.0025      | 0.0034      | 0.0111      | 0.0066      | 0.0055             | 0.0192              |
| Caucho  | 0.0025      | 0.0016      | 0.0012      | 0.0016      | 0.0019             | 0.0005              |
| Cuero   | 0           | 0           | 0           | 0           | 0                  | 0.0022              |
| Huesos  | 0.0000      | 0.0021      | 0           | 0.00004     | 0.0004             | 0.0024              |
| Residuos de Jardín                              | 0.0028      | 0.0023      | 0.0056      | 0.0016      | 0.0031             | 0.0188              |
| Madera  | 0.0038      | 0.0028      | 0           | 0.0052      | 0.0031             | 0.0025              |
| <b>BFW (peso seco)</b>                          | <b>0.05</b> | <b>0.06</b> | <b>0.09</b> | <b>0.07</b> | <b>0.07</b>        | <b>0.15</b>         |

Para calcular  $C_m$ , se utilizó la ecuación 1.21 que consideró los datos promedio de emisión de  $CH_4$  por cuadrante y sitio y la fracción degradable peso seco (tabla 8.28).

**Tabla 8.28.** Contenido de  $C_m$  por cuadrante y sitio en  $m^3/Mg$  de RSU (peso seco)

| Residuos de composición orgánica          | Cuadrante   |             |             |             | Promedio en el RTC | Promedio en Morelia |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|---------------------|
|   | I           | II          | III         | IV          |                    |                     |
| R. alimenticios/fracción no identificable | 0.180       | 0.210       | 0.325       | 0.298       | 0.261              | 0.156               |
| Papel                                     | 0.113       | 0.180       | 0.067       | 0.040       | 0.090              | 0.127               |
| Cartón                                    | 0.014       | 0.005       | 0           | 0.021       | 0.011              | 0.035               |
| Textiles                                  | 0.022       | 0.026       | 0.060       | 0.040       | 0.039              | 0.060               |
| Caucho                                    | 0.022       | 0.012       | 0.006       | 0.009       | 0.013              | 0.002               |
| Cuero                                     | 0           | 0           | 0           | 0           | 0                  | 0.007               |
| Huesos                                    | 0.000       | 0.016       | 0           | 0.0003      | 0.003              | 0.007               |
| Residuos de Jardín                        | 0.025       | 0.018       | 0.031       | 0.010       | 0.021              | 0.058               |
| Madera                                    | 0.033       | 0.022       | 0           | 0.032       | 0.021              | 0.008               |
| <b><math>C_m</math> (fracción)</b>        | <b>0.41</b> | <b>0.49</b> | <b>0.49</b> | <b>0.45</b> | <b>0.46</b>        | <b>0.46</b>         |

Así mismo, se utilizaron los valores de humedad ( $W$ ) obtenidos en la determinación de las variables fisicoquímicas. La tabla 8.29 muestra los resultados de  $L_0$  con la ecuación 1.19:

**Tabla 8.29.** Potencial de generación de CH<sub>4</sub> por cuadrante y sitio en m<sup>3</sup>/Mg RSU (peso seco)

| Cuadrante y sitio                | L <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /Mg RSU) |
|----------------------------------|---|
| I                                | 44.04                                   |
| II                               | 72.87                                   |
| III                              | 101.88                                  |
| IV                               | 77.60                                   |
| Sitio de disposición             | <b>69.02</b>                            |
| Promedio en la ciudad de Morelia | 157.62                                  |

Según lo reportado en la tabla 8.29, los valores más altos de L<sub>0</sub> se presentan en los RSU más recientes; específicamente en el cuadrante III. El cuadrante I tiene el menor potencial (44.04 m<sup>3</sup>/Mg RSU) lo que sugiere una influencia del tiempo de confinamiento y degradación de los RSU.

Para calcular L<sub>0</sub> se utilizaron dos ecuaciones distintas: la ecuación 1.14 citada por el IPCC (2006) la cual se basó en el uso de constantes como DOC y DOCf provenientes de estudios de composición de RSU de otros sitios de disposición y la ecuación 1.19 propuesta por Lobo (2003), donde se emplearon datos específicos de los RSU del sitio estudiado. Los resultados entre las dos ecuaciones presentan una diferencia de aproximadamente 30 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg RSU por lo que es de considerar el utilizar una metodología que reduzca los riesgos de incertidumbre al momento de utilizar L<sub>0</sub> para efectuar los cálculos sobre emisión de biogás, como es el caso del uso de los valores dados por default por los modelos. Es de resaltar el hecho de haber utilizado datos de residuos ya depositados que han pasado por un proceso de degradación anaerobia y por utilizar resultados de RSU sobre una base húmeda (IPCC, 2006) y una base seca (Lobo, 2003).

Algunos trabajos como el de Machado et al., (2008) utilizaron la ecuación de Lobo (2003) y obtuvieron un L<sub>0</sub> de 66.62 m<sup>3</sup>/Mg en muestras de RSU recientes generadas en un clima tropical húmedo ubicado en la Bahía del Salvador, Brasil; un L<sub>0</sub> mayor al obtenido en muestras recientes caracterizadas en este estudio (57.93 m<sup>3</sup>/Mg).



Este resultado puede deberse a diversos factores entre los que destaca la humedad, fracción biodegradable o la composición de RSU. La Precipitación Media Anual (MAP) en el RTC de Morelia es de 773 mm, menor al de Bahía, Brasil que se encuentra en una región de precipitación pluvial mayor a los 1000 mm y que influye en la disponibilidad de los nutrientes para la metanogénesis. No se realizó la comparación para muestras depositadas en el sitio pues en el caso del RTC de Morelia, no se conoce la edad exacta de disposición, aunque se observa en los dos sitios que las muestras más antiguas presentan valores de  $L_0$  más bajos.

## 8. 5. Determinación matemática de k

Para calcular k con la ecuación 1.22 citada en USEPA, 2004; se utilizaron datos de MAP de 773 mm, resultado promedio de la ciudad de Morelia durante los últimos 30 años con 7 meses (wordweather, 2012). El RTC tuvo un periodo de vida de 22 años por lo que los datos obtenidos se encuentran dentro del rango utilizado de MAP. De acuerdo con la ecuación 1.22, el valor de k es de  $0.035 \text{ año}^{-1}$ . Esta ecuación solo considera la MAP y la composición de RSU, a pesar de que se ha señalado que k es influenciada por otros factores como la disponibilidad de nutrientes para la degradación, factores fisicoquímicos, la edad, cantidad vertida anual y las prácticas de disposición de los RSU.

En el caso del cálculo de k con la ecuación 1.23 y 1.24 se utilizaron los valores del índice de generación específico de  $\text{CH}_4$  (q) de  $13.62 \text{ m}^3/\text{Mg}$  base húmeda a 10 m de profundidad, los resultados de  $L_0$  del sitio de 39.56 (con la ecuación 1.14) y  $69.02 \text{ m}^3/\text{Mg}$  por año (con la ecuación 1.19) para el 2011 y se asignó un valor de “c” de 1.04969 que es el rango superior producto de la división del año de estudio entre la

mitad en años de operación del RTC (1/10.5+1) como se refiere en las leyes de los algoritmos. Lo anterior dio como resultado un valor de  $k$  de  $0.3 \text{ año}^{-1}$  con datos de  $L_0$  provenientes de la ecuación 1.14 y de  $0.134 \text{ año}^{-1}$  con el  $L_0$  de la ecuación 1.19.

Por otro lado, se calculó  $k$  con la ecuación 1.25, para lo que se consideraron los valores de  $t_{1/2}$  de la tabla 7.9. La tabla 8.30 muestra los resultados.

**Tabla 8.30.** Índice de generación de  $\text{CH}_4$ ,  $k$  por cuadrante y sitio de acuerdo con los valores de  $t_{1/2}$  ( $\text{año}^{-1}$ )

| Cuadrantes/Categorías          | $t_{1/2}$ | I            | II           | III          | IV           | Por Sitio    |
|--------------------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Degradación lenta              | 12        | 1.152        | 1.584        | 1.068        | 0.864        | 1.164        |
| Degradación lenta              | 23        | 0.506        | 0.322        | 0            | 0.552        | 0.345        |
| Degradación moderada           | 7         | 0.231        | 0.161        | 0.329        | 0.105        | 0.203        |
| Degradación rápida             | 4         | 1.264        | 1.452        | 2.656        | 2.412        | 1.948        |
| No biodegradables              |           | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            |
| $\sum$ Categorías              |           | 3.153        | 3.519        | 4.053        | 3.933        | 3.66         |
| <b>Valor de <math>k</math></b> |           | <b>0.220</b> | <b>0.197</b> | <b>0.171</b> | <b>0.176</b> | <b>0.189</b> |

Con respecto a la ecuación 1.25, se utilizaron los datos de  $t_{1/2}$  de la región climática correspondiente y se obtuvo un resultado de  $k$  de  $0.189 \text{ año}^{-1}$  que no corresponde a los valores sugeridos para el sitio de estudio, debido a que el IPCC, 2006 hace referencia a resultados de  $k$  es de hasta  $0.3 \text{ año}^{-1}$ , resultado que se asocia a una MAP y MAT alta, periodos de  $t_{1/2}$  de 3 años, así como la presencia de grandes cantidades de residuos alimenticios.

Los resultados anteriores se pueden comparar con los trabajos de Machado, et al., (2008) que obtuvieron en un clima tropical una  $k$  de  $0.21 \text{ año}^{-1}$ , o el trabajo de Aguilar et al., (2010) que obtuvo una  $k$  de  $0.0482 \text{ año}^{-1}$  para una región climática seca en la ciudad de Ensenada, Baja California, México; de tal manera, se esperaría encontrar una  $k$  intermedia entre estos dos valores de aproximadamente  $0.12 \text{ año}^{-1}$  por ser un sitio de estudio localizado en una región templada, con una precipitación media anual de 773 mm y promedios de  $t_{1/2}$  anual de los residuos mayor a 3 años.

### 8.5.1 Despeje de k en la ecuación 1.24

En este caso, se utilizaron los valores asignados por categoría de degradación de los RSU para el estado de Michoacán señalados en la tabla 1.6. La tabla 8.31 presenta los resultados.

**Tabla 8.31.** Índice de generación de CH<sub>4</sub>, k por cuadrante y sitio (año<sup>-1</sup>)

| Categoría de RSU        | K<br>(año <sup>-1</sup> ) | Cuadrante      |               |                |                | Promedio en<br>el<br>RTC | Promedio<br>en<br>Morelia |
|-------------------------|---------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------------------------|---------------------------|
|                         |                           | I              | II            | III            | IV             |                          |                           |
| Muy Rápida              | 0.22                      | 0.07194        | 0.08272       | 0.14674        | 0.13398        | 0.1089                   | 0.09596                   |
| Moderadamente<br>rápida | 0.1                       | 0.0041         | 0.0026        | 0.0047         | 0.0028         | 0.0036                   | 0.02352                   |
| Moderadamente<br>Lenta  | 0.04                      | 0.003          | 0.00452       | 0.0034         | 0.00212        | 0.00328                  | 0.00346                   |
| Lenta                   | 0.02                      | 0.00044        | 0.00046       | 0              | 0.00048        | 0.00034                  | 0.00043                   |
| No biodegradables       | 0                         | 0              | 0             | 0              | 0              | 0                        | 0                         |
| <b>Valor de k</b>       |                           | <b>0.07948</b> | <b>0.0903</b> | <b>0.15484</b> | <b>0.13938</b> | <b>0.11612</b>           | <b>0.12337</b>            |

Con base en esta metodología el valor de k en el sitio es de 0.116 año<sup>-1</sup> que resultó de la subutilización del valor de k de 0.095 propuesto por SCS Engineers en el 2009 para la región climática número 2, aunque se esperarían resultados similares entre estos dos valores por el hecho de partir de una misma ecuación, aunque se observa en la tabla 8.31 que los valores no son homogéneos en todo el sitio. La ecuación anterior utiliza valores dados por default como es el MCF, DOC y valores sobre composición de RSU que provienen de estudios previos en otros sitios, con condiciones climáticas y de consumo distintas.

### 8.5.2 Método a prueba y error asignando valores a k en la ecuación 1.24

El cálculo de k en este apartado se llevó a cabo considerando los resultados de L<sub>0</sub> de la ecuación 1.19 (tabla 8.32). No se empleó el resultado de L<sub>0</sub> obtenido con la ecuación 1.14 por que emplea datos de composición de RSU y de variables

físicoquímicas obtenidas de otros sitios con condiciones distintas a la del sitio de estudio.

**Tabla 8.32.** Índice de generación de CH<sub>4</sub>, k por prueba y error (año<sup>-1</sup>)

| <b>Año</b>      | <b>Q</b>      | <b>t años</b> | <b>k</b>      |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| 1986            | 0             | 1             | 0             |
| 1987            | 1.45          | 1             | 0.0215        |
| 1988            | 2.67          | 1             | 0.0403        |
| 1989            | 3.72          | 1             | 0.057         |
| 1990            | 4.63          | 1             | 0.0721        |
| 1991            | 5.43          | 1             | 0.0857        |
| 1992            | 6.14          | 1             | 0.0982        |
| 1993            | 6.78          | 1             | 0.1097        |
| 1994            | 7.35          | 1             | 0.12          |
| 1995            | 7.89          | 1             | 0.1302        |
| 1996            | 8.38          | 1             | 0.1397        |
| 1997            | 8.85          | 1             | 0.1488        |
| 1998            | 9.29          | 1             | 0.1576        |
| 1999            | 9.72          | 1             | 0.1664        |
| 2000            | 10.13         | 1             | 0.1749        |
| 2001            | 10.54         | 1             | 0.1835        |
| 2002            | 10.93         | 1             | 0.1919        |
| 2003            | 11.33         | 1             | 0.2007        |
| 2004            | 11.72         | 1             | 0.2094        |
| 2005            | 12.11         | 1             | 0.2182        |
| 2006            | 12.50         | 1             | 0.2273        |
| 2007            | 12.89         | 1             | 0.2365        |
| 2008            | 13.29         | 1             | 0.2463        |
| 2009            | 11.30         | 1             | 0.2000        |
| 2010            | 9.69          | 1             | 0.1656        |
| 2011            | 8.34          | 1             | <b>0.1388</b> |
| <b>Promedio</b> | <b>217.11</b> | <b>22</b>     | 0.1439        |

Los valores de k aumentaron con los años de disposición de RSU hasta llegar a un valor máximo en el 2008 (0.2463 año<sup>-1</sup>) posterior a la clausura del sitio, para después comenzar a declinar. Se obtuvo un valor de k de 0.1388 año<sup>-1</sup> para el 2011 que fue el periodo de muestreo de emisiones de biogás en campo.

La tabla 8.33 muestra los resultados finales de L<sub>0</sub> y k para el sitio de estudio sin considerar los cuadrantes.

**Tabla 8.33.** Valores de  $L_0$  y  $k$  calculados con datos del RTC de Morelia.

| <b>Fuente</b>                                   | <b><math>L_0</math></b>          | <b><math>k(\text{año}^{-1})</math></b> |
|---|----------------------------------|--|
| IPCC, 2006                                      | 39.57 (Mg)                       | 0.189                                  |
| Lobo, 2003                                      | 69.02 ( $\text{m}^3/\text{Mg}$ ) | –                                      |
| USEPA, 2004                                     |                                  | 0.035                                  |
| SCS Engineers, 2009                             |                                  | 0.11612                                |
| USEPA, 1996                                     |                                  |  |
| i) Despejando la ecuación 1.24                  |                                  | 0.3, 0.134                             |
| ii) Asignando valores a $k$ en la ecuación 1.24 |                                  | 0.1388                                 |

Se utilizaron tres ecuaciones y cinco metodologías distintas que demuestran que la  $k$  no es fija y no puede utilizarse como constante, ya que es dependiente de la composición de los RSU, parámetros fisicoquímicos y disponibilidad de los nutrientes para la metanogénesis. Es importante considerar otros factores como las prácticas de disposición, las labores de manejo como el acomodo de los RSU y la colocación de material de cobertura que contribuyó en la diferencia de  $k$  de un cuadrante con respecto a otro.

No se puede hablar que una ecuación es mejor que otra ya que originalmente cada una de ellas se estableció para un sitio o región particular; sin embargo, la ecuación 1.23 de la USEPA, 1996 junto con el método a prueba y error es la metodología más factible de utilizar pues permitió calcular  $k$  por cada año de operación del RTC de Morelia durante su vida útil. El índice  $k$  sirve para calcular el  $\text{CH}_4$  generado en un sitio y se corre el riesgo de hacer una sub o sobre estimación de las emisiones de biogás o del potencial productivo, para ser utilizado como energía alternativa si no se utiliza un valor adecuado. Por ello, un desconocimiento de la cantidad y composición del biogás y en particular de  $\text{CH}_4$ , hace difícil estimar la contribución al efecto invernadero.



## 8.6 Valores de $L_0$ y $k$ establecidos en el Modelo Mexicano de Biogás

Se ingresaron al Modelo Mexicano de Biogás, los resultados de la composición de los RSU por categoría de degradación en el sitio de la tabla 8.15, los resultados de los RSU durante el último año de disposición (peso seco) y el área porcentual que ocupan los tubos de venteo. La tabla 8.34 muestra los valores de  $L_0$  y  $k$  por categoría de degradación, resaltando valores distintos para cada categoría.

**Tabla 8.34.** Valores de  $L_0$  y  $k$  por categoría de degradación en el RTC de Morelia.

| <b>Categoría de degradación</b>      | <b><math>L_0</math> (<math>m^3/Mg</math>)</b> | <b><math>k</math> (<math>año^{-1}</math>)</b> |
|--------------------------------------|---|---|
| Rápida                               | 38  | 0.22  |
| Moderadamente Rápida                 | 58  | 0.10  |
| Moderadamente Lenta                  | 98  | 0.04  |
| Lenta                                | 93  | 0.02  |
| Promedio por cuadrante y en el sitio | <b>70.25</b>                                  | <b>0.095</b>                                  |

El modelo consideró los mismos valores de  $k$  en los cuatro cuadrantes para estimar el porcentaje de emisión de  $CH_4$  en el sitio, aunque los resultados hicieron notar que las condiciones en un mismo sitio son distintas.

La ecuación 1.23 presentó resultados mayores a los reportados para  $k$  en el Modelo Mexicano para climas templados, lo que sugiere que el hecho de haber utilizado una constante “ $c$ ” modificó los valores establecidos para esta región climática. Aunque existen diferentes condiciones para la degradación anaerobia de la composición orgánica entre cuadrantes, así como distintas tasas de generación de  $CH_4$  dentro del mismo sitio de disposición de RSU que pueden influir en la determinación de la constante  $k$ , el Modelo Mexicano utiliza el valor de  $k$  como una constante, independientemente de la cantidad de biogás generada en el sitio y por cuadrante. De tal manera, se sugiere ajustar los parámetros utilizados en los modelos, a las condiciones imperantes en el sitio por lo que es factible obtener  $k$  y  $L_0$  con datos de composición de



residuos y de  $\text{CH}_4$  del sitio de interés, sin el uso de los valores dados por default por los modelos.

La  $k$  resultante ( $0.1388 \text{ año}^{-1}$ ) obtenida con la ecuación 1.24 difiere de la utilizada en el modelo mexicano ( $0.095 \text{ año}^{-1}$ ), aunque se hace notar que  $k$  presenta fluctuaciones importantes, por lo que se debe de tener cuidado al momento de utilizar los parámetros para llegar a un resultado. A excepción de la ecuación 1.24; las demás ecuaciones utilizadas están subestimadas con respecto al valor de  $k$  ( $0.11$  a  $0.13 \text{ año}^{-1}$ ), utilizado en el modelo mexicano de biogás, versión 2 (SCS Engineers, 2009).

### **8.7 Estimación de la emisión de $\text{CH}_4$ utilizando el Modelo Mexicano de Biogás (Versión 2.0)**

Con los datos de la tabla 8.16 sobre categoría de RSU por componente orgánico, el Modelo Mexicano de Biogás asignó los valores de  $L_0$ ,  $k$  y MCF para estimar la cantidad de biogás y en particular de  $\text{CH}_4$ . Así mismo, el Modelo Mexicano categorizó el RTC de Morelia en la región Oeste, que es una de las seis regiones climáticas en que divide el país. En el RTC de Morelia no se llevaron a cabo ciertas labores dentro del sitio, como lo fue la colocación de tubos de venteo a los 10 m de profundidad, no se colocó una cubierta con geomembrana ni se llevo a cabo una cubierta diaria; solamente se colocaron los tubos de venteo a una profundidad de 3 m para poder efectuar las labores de clausura, lo que conlleva a mencionar que después de la clausura el RTC de Morelia estaría operando solo al 21% de eficiencia de captación de biogás asumiendo un 50% de producción de  $\text{CH}_4$ . Con la finalidad de poder llevar a cabo una comparación con los resultados de emisión de  $\text{CH}_4$  realizados en campo y con base en la cantidad de RSU dispuestos en el RTC así como de su composición, se considero teóricamente que el RTC tuviera un sistema de extracción con tubos de venteo abarcando toda su



extensión. Por medio de esta prueba y mediante la utilización del Modelo Mexicano de Biogás versión 2, la eficiencia de captación aumentó a un 71 %, sustentado en una producción del 50 % de CH<sub>4</sub>.

La tabla 8.35 muestra la proyección de la generación de biogás y recuperación en el sitio a un 71% de eficiencia de captación, así como la capacidad máxima de producción de energía eléctrica por parte del RTC de Morelia, partiendo de los RSU en una base húmeda. No aplica la utilización de los datos por cuadrantes pues a partir de la apertura del sitio solamente se depositaron los RSU en una porción del sitio, por lo que estos se recibieron en los cuatro cuadrantes a diferentes periodos de tiempo.

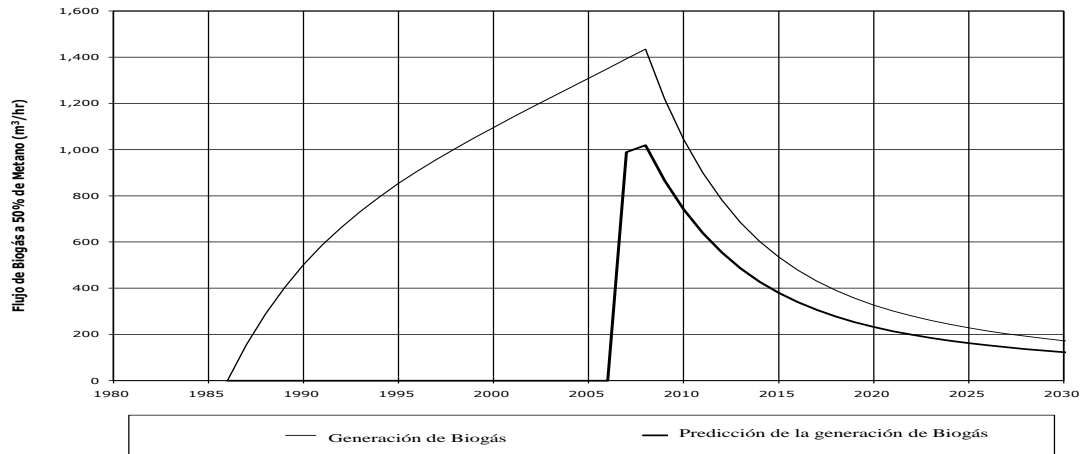
**Tabla 8.35.** Proyección de la generación de biogás y recuperación en el RTC de Morelia.

| Año  | Disposición (Mg/año peso húmedo)* | Generación de Biogás |        |            | Capacidad máxima de la central eléctrica (MW) | Emisión de CH <sub>4</sub> Estimación de su reducción |                             |
|------|-----------------------------------|----------------------|--------|------------|---|---|-----------------------------|
|      |                                   | (m <sup>3</sup> /hr) | (fcm)  | (mmBtu/hr) |   | (Mg CH <sub>4</sub> /año)                             | (Mg CO <sub>2</sub> eq/año) |
| 1986 | 135800                            | 0                    | 0      | 0          | 0   | 0   | 0                           |
| 1987 | 138900                            | 156.07               | 91.86  | 2.79       | 0   | 0   | 0                           |
| 1988 | 142100                            | 288.65               | 169.90 | 5.16       | 0   | 0   | 0                           |
| 1989 | 145400                            | 402.37               | 236.83 | 7.19       | 0   | 0   | 0                           |
| 1990 | 148700                            | 500.98               | 294.87 | 8.95       | 0   | 0   | 0                           |
| 1991 | 152100                            | 587.36               | 345.71 | 10.50      | 0   | 0   | 0                           |
| 1992 | 155600                            | 663.96               | 390.80 | 11.86      | 0   | 0   | 0                           |
| 1993 | 159200                            | 732.75               | 431.29 | 13.09      | 0   | 0   | 0                           |
| 1994 | 162900                            | 795.32               | 468.11 | 14.21      | 0   | 0   | 0                           |
| 1995 | 166600                            | 852.95               | 502.03 | 15.24      | 0   | 0   | 0                           |
| 1996 | 170400                            | 906.57               | 533.59 | 16.20      | 0   | 0   | 0                           |
| 1997 | 174300                            | 957.04               | 563.30 | 17.10      | 0   | 0   | 0                           |
| 1998 | 178300                            | 1005.04              | 591.55 | 17.96      | 0   | 0   | 0                           |
| 1999 | 182400                            | 1051.15              | 618.69 | 18.78      | 0   | 0   | 0                           |
| 2000 | 186600                            | 1095.83              | 644.99 | 19.58      | 0   | 0   | 0                           |
| 2001 | 190900                            | 1139.44              | 670.66 | 20.36      | 0   | 0   | 0                           |
| 2002 | 195300                            | 1182.29              | 695.88 | 21.13      | 0   | 0   | 0                           |
| 2003 | 199800                            | 1224.64              | 720.80 | 21.88      | 0   | 0   | 0                           |
| 2004 | 204400                            | 1266.67              | 745.54 | 22.63      | 0   | 0   | 0                           |
| 2005 | 209100                            | 1308.57              | 770.20 | 23.38      | 0   | 0   | 0                           |
| 2006 | 213900                            | 1350.46              | 794.86 | 24.13      | 0   | 0   | 0                           |
| 2007 | 219001                            | 1392.47              | 819.59 | 24.88      | 1.64  | 3100.50   | 65110.49                    |
| 2008 | 0                                 | 1434.92              | 844.57 | 25.64      | 1.69  | 3195.01   | 67095.25                    |
| 2009 | 0                                 | 1220.17              | 718.17 | 21.80      | 1.43  | 2716.85   | 57053.83                    |
| 2010 | 0                                 | 1044.51              | 614.78 | 18.66      | 1.23  | 2325.73   | 48840.28                    |
| 2011 | 0                                 | 900.42               | 529.97 | 16.09      | 1.06  | 2004.90   | 42102.92                    |
| 2012 | 0                                 | 781.86               | 460.19 | 13.97      | 0.92  | 1740.90   | 36558.81                    |
| 2013 | 0                                 | 683.94               | 402.56 | 12.22      | 0.80  | 1522.87   | 31980.30                    |
| 2014 | 0                                 | 602.75               | 354.77 | 10.77      | 0.71  | 1342.10   | 28184.12                    |
| 2015 | 0                                 | 535.14               | 314.98 | 9.56       | 0.63  | 1191.55   | 25022.65                    |
| 2016 | 0                                 | 478.56               | 281.67 | 8.55       | 0.56  | 1065.57   | 22376.97                    |
| 2017 | 0                                 | 430.96               | 253.66 | 7.70       | 0.51  | 959.58  | 20151.19                    |
| 2018 | 0                                 | 390.68               | 229.95 | 6.98       | 0.46  | 869.90  | 18267.96                    |
| 2019 | 0                                 | 356.40               | 209.77 | 6.37       | 0.42  | 793.56  | 16664.82                    |
| 2020 | 0                                 | 327.02               | 192.48 | 5.84       | 0.38  | 728.16  | 15291.32                    |
| 2021 | 0                                 | 301.69               | 177.57 | 5.39       | 0.35  | 671.74  | 14106.64                    |
| 2022 | 0                                 | 279.68               | 164.62 | 5.00       | 0.33  | 622.75  | 13077.75                    |
| 2023 | 0                                 | 260.44               | 153.29 | 4.65       | 0.31  | 579.90  | 12177.84                    |
| 2024 | 0                                 | 243.49               | 143.31 | 4.35       | 0.29  | 542.15  | 11385.18                    |
| 2025 | 0                                 | 228.45               | 134.46 | 4.08       | 0.27  | 508.67  | 10682.07                    |
| 2026 | 0                                 | 215.02               | 126.56 | 3.84       | 0.25  | 478.77  | 10054.13                    |
| 2027 | 0                                 | 202.95               | 119.45 | 3.63       | 0.24  | 451.89  | 9489.59                     |
| 2028 | 0                                 | 192.02               | 113.02 | 3.43       | 0.23  | 427.56  | 8978.84                     |
| 2029 | 0                                 | 182.08               | 107.17 | 3.25       | 0.21  | 405.43  | 8513.98                     |
| 2030 | 0                                 | 172.98               | 101.82 | 3.09       | 0.20  | 385.17  | 8088.54                     |
| 2031 | 0                                 | 164.61               | 96.89  | 2.94       | 0.19  | 366.53  | 7697.15                     |
| 2032 | 0                                 | 156.88               | 92.33  | 2.80       | 0.18  | 349.30  | 7335.38                     |
| 2033 | 0                                 | 149.69               | 88.11  | 2.67       | 0.18  | 333.31  | 6999.56                     |
| 2034 | 0                                 | 143.00               | 84.17  | 2.56       | 0.17  | 318.41  | 6686.60                     |
| 2035 | 0                                 | 136.74               | 80.48  | 2.44       | 0.16  | 304.47  | 6393.93                     |
| 2036 | 0                                 | 130.87               | 77.03  | 2.34       | 0.15  | 291.40  | 6119.37                     |

El Modelo Mexicano estimó una máxima emisión de CH<sub>4</sub> en el sitio en el 2008 con 1434.92 m<sup>3</sup>/hr, un año posterior a la clausura del sitio y una recuperación predictoria de 1019 m<sup>3</sup>/hr si los tubos de venteo estuvieran colocados verticalmente a los 10 m de profundidad del RTC; después disminuye exponencialmente con el tiempo, mientras que el componente orgánico de los RSU se consume (SCS Engineers, 2009); por ello la necesidad de acondicionar el sitio y perforar a una mayor profundidad para aprovechar el máximo de biogás generado. La capacidad máxima de producción de energía eléctrica se presentó también en el 2008 con 1.69 MW, energía importante y atractiva para su inserción en los mercados del carbono (PNPGR, 2009-2012) si se considera que la capacidad mínima de generación de electricidad en un RESA es de 0.5 MW en adelante (Arvizu et al., 2003).

El Modelo Mexicano estimó una emisión de biogás para el 2011 de 900.42 m<sup>3</sup>/hr, de los cuales el CH<sub>4</sub> generado sería de 450.21 m<sup>3</sup>/hr a un 50% v/v. A una concentración de 46.5% v/v medido en campo, la emisión de CH<sub>4</sub> es de 418.70 m<sup>3</sup>/hr a 10 m y a tres metros de profundidad es de solo de 125.60 m<sup>3</sup>/hr. De acuerdo a los resultados presentados por el Modelo Mexicano, el RTC de Morelia generó durante el 2011, 3, 667, 812 m<sup>3</sup>/año de CH<sub>4</sub>, un 56.04 % inferior a los resultados de emisión de CH<sub>4</sub> obtenidos en campo, lo que muestra que los resultados del modelo sobre las emisiones de CH<sub>4</sub> están subestimados y esto repercute en los valores de k y L<sub>0</sub>.

La figura 8.6 muestra la generación de biogás en el RTC de Morelia y su predicción de recuperación en el sitio.



**Figura 8.6.** Generación actual de CH<sub>4</sub> calculado en el RTC de Morelia.

En un estudio realizado en el RESA de Ensenada, Baja California en el 2009, la capacidad máxima de energía eléctrica es de 1.9 MW (Aguilar, 2011), superior a los resultados de esta investigación, bajo la salvedad de que en su trabajo de investigación encontraron un 68.57% de residuos de composición orgánica; un 5.37% mayor a lo encontrado en la presente, además se deben de considerar otros factores como las condiciones climáticas del sitio (precipitación y temperatura), contenido de humedad, temperatura pH, composición, edad y cantidad vertida anual de RSU así como las prácticas de disposición.

Resultó viable medir las emisiones de biogás en campo, pues permitió compararlas con las emisiones estimadas con el Modelo Mexicano versión 2. Aunque se han elaborado varias investigaciones sobre modelación de emisiones de biogás y sobre parámetros fisicoquímicos de los RSU, este trabajo contribuyó con datos sobre producción de CH<sub>4</sub> en México; además, reviste particular interés pues se utilizan datos recabados del sitio de estudio lo que representa un buen parámetro para asegurar la gestión adecuada de los RSU en aspectos de planeación y de optimización de sitios que cumplan con las normas establecidas.

## 8.8 Análisis estadístico de los datos

### 8.8.1 Análisis de Varianza

La tabla 8.36 muestra los resultados del ANOVA.

**Tabla 8.36.** Resultados del ANOVA sobre las variables físicas y químicas por cuadrante.

| Variables            | Nparm | DF<br>Num | Suma de Medias | Índice<br>F | Prob > F      |
|----------------------|-------|-----------|----------------|-------------|---------------|
| Temperatura          | 3     | 3         | 729.87         | 9.2969      | <.0001        |
| pH                   | 3     | 3         | 1.36           | 0.5933      | 0.6227        |
| Humedad              | 3     | 3         | 156.48         | 0.9815      | 0.4102        |
| Cenizas              | 3     | 3         | 4027.21        | 3.4907      | <b>0.0234</b> |
| ST                   | 3     | 3         | 151.13         | 0.9508      | 0.4244        |
| SV                   | 3     | 3         | 4027.21        | 3.4907      | <b>0.0234</b> |
| Contenido Orgánico   | 3     | 3         | 4146.86        | 8.3916      | <b>0.0002</b> |
| Contenido Inorgánico | 3     | 3         | 4146.86        | 8.3916      | <b>0.0002</b> |
| Metano               | 3     | 3         | 3210.035       | 9.3311      | <.0001        |

Los resultados obtenidos de los análisis estadísticos de las muestras de RSU, indican una diferencia estadística entre los cuadrantes para las variables de temperatura, cenizas, SV, contenido orgánico e inorgánico y CH<sub>4</sub>. Estadísticamente se observa que los cuadrantes presentan distintos porcentajes en la composición de residuos lo que hace suponer distintos grados de degradación anaerobia que inciden en una producción diferencial de biogás, inclusive en porciones de un mismo sitio. La diferencia estadística de los SV y de CH<sub>4</sub> entre los cuadrantes estudiados, confirma diferentes estados de degradación de la materia orgánica de los residuos sólidos, corroborando los efectos del tiempo de confinamiento de los RSU.

### 8.8.2 Prueba de Tukey.

En la tabla 8.37 se presentan los resultados de la prueba de Tukey para el parámetro de temperatura, mediante una comparación de sus promedios generados por cuadrante.

**Tabla 8.37.** Comparaciones de las medias de temperatura con respecto al cuadrante.

| Cuadrante | Nivel |   | Media (%) |
|-----------|-------|---|-----------|
| I         | A     |   | 35.70     |
| II        |       | B | 28.46     |
| III       |       | B | 28.31     |
| IV        | A     |   | 36.85     |

Los resultados de la prueba de Tukey para la variable temperatura muestran una diferencia estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ) entre los cuadrantes I y IV con respecto a los cuadrantes II y III, los dos pares de cuadrantes (I-IV y II-III) no son estadísticamente significativos entre ellos.

La mayor temperatura se encuentra en los cuadrantes I y IV los cuales son similares estadísticamente. Estos resultados pueden deberse a las labores de manejo de los residuos sobre el acomodo y cubrimiento con arcilla que pudo haber modificado las temperaturas reales en el sitio. La tabla 8.38 presenta los resultados de la prueba de Tukey para cenizas y SV.

**Tabla 8.38.** Comparaciones de las medias de Cenizas y SV con respecto al cuadrante.

| Cuadrante | Nivel |   | Media Cenizas (%) | Media SV (%) |
|-----------|-------|---|-------------------|--------------|
| I         | A     |   | 66.54             | 33.46        |
| II        | A     | B | 52.69             | 47.30        |
| III       | A     | B | 46.46             | 53.54        |
| IV        |       | B | 44.26             | 55.74        |

Las cenizas y los SV no muestran una diferencia significativa entre los cuadrantes II y III, pero si son significativamente distintos ( $P > 0.05$ ) los cuadrantes I y IV. Estos resultados se relacionan con el tiempo de confinamiento de los residuos, donde los más antiguos se concentran en el cuadrante I.

La tabla 8.39 muestra la diferencia estadística entre el contenido orgánico e inorgánico en las muestras de RSU.



**Tabla 8.39.** Comparaciones de las medias del contenido orgánico e inorgánico con respecto al cuadrante.

| Cuadrante | Nivel | Contenido Org. (%) | Contenido Inorg. (%) |
|-----------|-------|--------------------|----------------------|
| I         | A     | 53.04              | 46.96                |
| II        | A     | 52.53              | 47.48                |
| III       | B     | 73.71              | 26.29                |
| IV        | B     | 69.57              | 30.43                |

Con respecto al contenido orgánico e inorgánico, fueron similares en los cuadrantes I y II así como entre los cuadrantes III y IV. La diferencia estadística ( $P < 0.05$ ) existe entre el grupo I y II con respecto a II y IV, lo que concuerda con el tiempo de disposición, pues el cuadrante IV es el sitio donde se llevó la colocación de los residuos hasta antes de su clausura. Finalmente, la tabla 8.40 muestra la prueba de Tukey para el  $CH_4$ .

**Tabla 8.40.** Comparaciones de las medias de  $CH_4$  con respecto al cuadrante.

| Cuadrante | Nivel | Media (%) |
|-----------|-------|-----------|
| I         | A     | 41.33     |
| II        | B     | 49.30     |
| III       | B     | 48.57     |
| IV        | C     | 45.43     |

El análisis señala una diferencia estadística entre el cuadrante I y IV a diferencia del II y III que no la presentan. Esta diferencia señala indirectamente como la producción de  $CH_4$  está relacionada con los diferentes estados de degradación de los residuos, aunque también debe considerarse como factor la ineficiente cobertura de residuos y operación en el RTC. Por los resultados observados se puede atribuir que la edad y el tiempo de confinamiento de los residuos están incidiendo en la producción diferencial de biogás a lo largo del tiempo.

## 9 CONCLUSIONES

1. La composición de los RSU de los cuadrantes de más reciente confinamiento mostraron una mayor cantidad de composición orgánica, con respecto a los más antiguos. Lo anterior se corroboró con el ANOVA y la prueba de Tukey, los cuales mostraron una diferencia estadísticamente significativa entre los cuadrantes, lo cual confirmó la influencia del tiempo de confinamiento de los RSU en el grado de degradación de los RSU y por ende, del contenido orgánico en éstos.

2. Los resultados de los análisis fisicoquímicos, específicamente del contenido de SV en los RSU junto con los análisis estadísticos de los cuatro cuadrantes estudiados confirma la existencia de diferencias en la composición orgánica (degradabilidad) y en el grado de degradación de esta última.

3. No obstante de la inadecuada cobertura de los RSU en el RTC de estudio, el conocimiento de la composición y del grado de degradación de los RSU, además de la degradabilidad de los RSU es de relevancia importante, ya que permite establecer el tiempo de estabilización de los RSU y del potencial de producción de biogás, particularmente de  $\text{CH}_4$  en el RTC.

4. La emisión promedio de  $\text{CH}_4$  en el RTC de Morelia fue de 45.6 %; sin embargo, esta no es homogénea en todo el sitio pues se observaron diferencias en la producción entre cuadrantes. Los análisis estadísticos corroboraron diferencias en la producción de biogás, lo cual corrobora la importancia de los monitoreos del biogás en los RTC.

5. La utilización de las diferentes ecuaciones para calcular los valores de los parámetros  $k$  y de  $L_0$  que dieron resultados diferentes, ratifican la aseveración anterior de la importancia de determinar estos valores con base en estudios locales que involucren el monitoreo del biogás y la caracterización de los RSU confinados.

6. La aplicación de ecuaciones, algoritmos y modelos disponibles en la literatura para calcular la producción de  $\text{CH}_4$  son de gran utilidad; no obstante este estudio demuestra que el grado de incertidumbre de los cálculos de la producción con base en la aplicación de modelos es alto, pues utilizan como insumos a cada ecuación constantes dadas por default que muestran diferencias en los resultados con respecto a un mismo sitio y/o ciudad.

7. Se concluye que las estimaciones de emisión de  $\text{CH}_4$  para los sitios de disposición de RSU de México son imprecisas, ya que se emplea el uso de modelos predictorios, cuyas ecuaciones matemáticas con las cuales se sustentan, utilizan datos de constantes de  $L_0$  y  $k$  que provienen de datos de composición de residuos y de sitios con características climáticas, tecnológicas y de consumo distintas.

8. El Modelo Mexicano estimó una emisión de biogás  $1434.92 \text{ m}^3/\text{hr}$ , en el año 2008 y una recuperación predictoria de  $1019 \text{ m}^3/\text{hr}$ . Esta producción va disminuyendo conforme el paso del tiempo y la degradación de los RSU, ya que para el año 2011 se estima una producción de biogás de  $900.42 \text{ m}^3/\text{hr}$ , de los cuales el  $\text{CH}_4$  generado sería de  $450.21 \text{ m}^3/\text{hr}$  a un 50% v/v. A una concentración de 46.5% v/v medido en campo, la emisión de  $\text{CH}_4$  es de  $418.70 \text{ m}^3/\text{hr}$  a 10 m y a tres metros de profundidad es de  $125.60 \text{ m}^3/\text{hr}$ .

9. De acuerdo a los resultados presentados por el Modelo Mexicano, el RTC de Morelia generó durante el 2011, 3, 667, 812  $\text{m}^3/\text{año}$  de  $\text{CH}_4$ , un 56.04 % inferior a los resultados de emisión de  $\text{CH}_4$  obtenidos en campo, lo que muestra que las emisiones de  $\text{CH}_4$  dadas de la aplicación del modelo están subestimados.

10. Este estudio es relevante para incrementar la información sobre producción de biogás en sitios de disposición final que no tienen control sobre variables fisicoquímicas y de composición de RSU que tienen un efecto en la generación de  $\text{CH}_4$ .



11. Si se calibran las constantes para determinar los valores de  $k$  y de  $L_0$  de acuerdo con datos de RESA en nuestro país, es factible mejorar las estimaciones de emisión de  $CH_4$ .



## 10. RECOMENDACIONES

1. Resulta importante instalar tubos de captación con quemadores de biogás en los RESAS que carezcan para reducir el efecto invernadero de la degradación de los RSU en los RESA del país.

2. Los resultados de la ecuación 1.19 para  $L_0$  difieren solamente en  $1.3 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4/\text{Mg}$  con respecto a  $L_0$  utilizado en el Modelo Mexicano. Por lo tanto, Se sugiere ajustar los parámetros utilizados en los modelos, a las condiciones imperantes en el sitio; para ello, se considera efectuar estudios más profundos que tengan que ver con la obtención de  $L_0$  en función de los parámetros que inciden en la generación de  $\text{CH}_4$  del sitio de disposición.

## 11 BIBLIOGRAFIA

- [1] LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente). Diario Oficial de la Federación. Reforma Publicada el 07 de Diciembre. 2005
- [2] SEMARNAT. SNIARN. Base de Datos Estadísticos. Módulo de Consulta Temática. Dimensión ambiental, Residuos Sólidos Urbanos. [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx), 15/06/2011. 2011.
- [3] IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Intergovernmental Panel of Climate Change. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H; Buendia L; Miwa, K; Ngara T. and Tanabe K (Eds). Vol 5. Waste IGES Japon 2006
- [4] Wang-Yao K; Towprayoon S. and Jaroenpoj S. Estimation of Landfill Gas Production Using Pumping Test. In: *The Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE)*. Hua Hin, Thailand, 1-3 December. 2004.
- [5] SEMARNAT. Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL 1996. Especificaciones de Protección Ambiental para la Selección del Sitio, Construcción, Operación, Monitoreo, Clausura y Obras Complementarias de un Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos. Diario Oficial de la Federación. 20/10/2004. 1996.
- [6] Robles F. Generación de Biogás y Lixiviados en los Rellenos Sanitarios. Instituto Politécnico Nacional., Segunda edición. México, D. F. 115 pp. 2008.
- [7] Qian, X., Koerner, R.M. and Gray, D.H. Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction, Prentice Hall, New Jersey. 332-398 pp. 2001.
- [8] Ehrig H.J. Quality and Quantity of Sanitary Landfill Leachate. *Waste Management & Research*. 1.1:53-68. 1983.
- [9] Tchobanoglous G., Theisen H; and Vigil S. Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues, Volume II. McGraw-Hill. New York, USA. 1993.
- [10] Herrero, J. y Montero, O. MODUELO. Modelo Hidrológico, Biológico y de Producción para el Diseño de Vertederos. Manual de Usuario y Documentación Técnica. Grupo de Ingeniería Ambiental., Universidad de Cantabria. Documento de uso interno. 1999.
- [11] Alexander M. Introducción a la Microbiología del Suelo. AGT Editor, S.A. Segunda Edición. México, D.F. 491 pp. 1980.
- [12] Barlaz M. A. Microbial Studies of Landfills and Anaerobic Refuse Decomposition. *Manual of Environmental Microbiology*. Edited by Harvey, R. W. and suflita, J. M, ASM Press. Washington, D. C.1997.
- [13] Yilmaz A; Atalay F. Modeling of the Anaerobic Decomposition of Solid Waste. *Energy Sources*. 25:1063-1072. 2003.



- [14] Gendebien A; Constant M; Ledrut-Damanet E; Nyns H; Willumsen J; Butson R; Fabry G; Ferrero. *Lanfill Gas From Environment to Energy*. Commission of the European Communities. Luxembourg. 1992.
- [15] Chiemchaisri C; Chiemchaisri W; Kumar S; and Hettiaratchi J. *Solid Waste Characteristics and Their Relationship to Gas Production in Tropical Landfill*. *Environmental Monitoring Assessment*, 135:41-48. 2007.
- [16] IPCC. *Cambio Climático. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático*. Pachauri, R.K. y Reisinger, A (directores). IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p. 2007.
- [17] USEPA. *AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, 5th Edition, Volume 1: Stationary Point and Area Sources Chapter 2: Solid Waste Disposal, Section 2.4, US EPA Supplement E, USA*. 2008.
- [18] Hernández G; Duran C. *Productividad de Biogás en un Relleno Sanitario Clausurado*. *Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica*. 1. 1:1-15. 2006.
- [19] Attenborough, G. M., Hall, D. H., Gregory, R. G. and McGoochan, L. (2002). *GasSim: Landfill Gas Risk Assessment Model*. In: *Conference Proceedings SITA Environmental Trust- Sponsored by SITA Environmental Trust and Organics Limited*. ISBN 0-9539301.
- [20] Scharff H; and Jacobs J. *Applying Guidance for Methane Emission Estimation for Landfills*. *Waste Management*. 26.4: 417-429. 2006.
- [21] Thompson, Shirley, Sawyer, J., Bonam, R., Smith, S. *Modeling landfill gas generation to determine targets and strategies to reduce greenhouse gases*. *The Journal of Solid Waste Technology and Management* 34 (1). 2008.
- [22] USEPA. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, 5<sup>th</sup> ed. Chapter 2.4*. Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, NC. US. Environmental Protection Agency. 1998.
- [23] Paraskaki I; Lazaridis M. *Quantification of Landfill Emissions to Air: a Case Study of the Ano Liosia Landfill Site in the Grater Athens Area*. *Management & Research*. 23:199-208.2005.
- [24] USEPA. *EPA-600/R-05/072. First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills*. 2005.
- [25] Oonk, H., Weenk, A., Coops, O., Luning, L. *Validation of Landfill Gas Formation Models*. TNO Institute of Environmental and Energy Technology Report, Grontmij. 1994.



- [26] Borjesson, G. & Svensson, B.H. Seasonal and Diurnal Methane Emissions from a Landfill and Their Regulation by Methane Oxidation. *Waste Management and Research*. 15: 33–54. 1997a.
- [27] SCS Engineers. Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0. [http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/manual\\_del\\_usuario\\_modelo\\_mexicano\\_de\\_biogas\\_v2\\_2009.pdf](http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/manual_del_usuario_modelo_mexicano_de_biogas_v2_2009.pdf), 07/10/2009. 2009.
- [28] Barlaz M.; Ham R; & Schaefer D. Methane Production From Municipal Refuse: A Review of Enhancement Techniques and Microbial Dynamics. *Critical Reviews in Environmental Control*. 19:557-584. 1990.
- [29] EPA. Regulatory Package for New Source Performance Standards and III(d) Guidelines for Municipal Solid Waste Air Emissions. Public Docket No. A-88-09 (proposed May 1991). Research Triangle Park, NC. U.S. Environmental Protection Agency. 1991.
- [30] SCS ENGINEERS. Estudio de Pre-factibilidad Para la Recuperación de Biogás y Producción de Energía en el Relleno Sanitario de Querétaro, Querétaro, México. [http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish\\_Portuguese/Chihuahua\\_PreFeasibility\\_Study\\_Spanish.pdf](http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Chihuahua_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf) Acceso: 04/12/2008. 2005.
- [31] LFG Consult, Case studies of CDM - Landfill Gas Projects Monterrey., Mexico. [http://siteresources.worldbank.org/INTLACREGTOPURBDEV/Resources/840343-117812\\_0035287/ModelMonterrey.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTLACREGTOPURBDEV/Resources/840343-117812_0035287/ModelMonterrey.pdf) .18/05/2009. 2007.
- [32] Aguilar Q; Taboada P; y Ojeda S. Potencial de Producción Eléctrica del Biogás Generado en un Relleno Sanitario. *Ingeniería e Investigación*. 31:56-65. 2011.
- [33] Thompson S; Sawyer J; Bonam R; and Valdivia J.E. Building a Better Methane Generation Model: Validating Models With Methane Recovery Rates From 35 Canadian Landfills. *Waste Management* 29:2085–2091. 2009.
- [34] IIE. Estimación de los Factores de Emisión. Informe Final., IIE/01/14/13404/INE/03/2007. Arvizu J,L; Romero H; Huacuz J. (Investigadores). México. 2007.
- [35] Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil. *Gestión Integral de los Residuos Sólidos*. McGraw-Hill. Madrid, España. 1994.
- [36] USEPA. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2000. Report Number EPA430/R-02/003 [NTIS PB2003-102522], U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC. 2002.
- [37] Kelly R. J., Shearer B. D., Kim J., Goldsmith C. D., Hater G. R., Novak J. T. Relationships Between Analytical Methods Utilized As Tools in the E3valuation of Landfill Waste Stability. *Waste Management* 26. 1349-1356. 2006.
- [38] Lobo A.G.C. Moduelo 2: A Tool to be Used to Evaluate Municipal Solid Waste Landfills Contamination. PhD Thesis, University of Cantabria, Spain. pp. 688. 2003.



- [39] Machado S; Carvalho M; Gourc J.P; Vilar O; and Nascimento J.C.F. Methane Generation in Tropical Landfills Simplified Methods and Field Results. Waste Management. Doi:10.1016/j. wasman.02.017. 2008.
- [40] Levelton B; & Associates. Inventory of Methane Emissions from Landfills in Canada. Environment Canada, Richmond, B.C. File 490-974. 1991.
- [41] Gregory R.G; Attenborough M.G., Hall C.D; Deed C. The Validation and Development of an Integrated Landfill Gas Risk Assessment Model GasSim: In Sardinia Proceedings, 2003. Cagliari, Italy. 2003.
- [42] USEPA. United States Environmental Protection Agency (US EPA). Quantification of Exposure: Development of the Emissions Inventory for the Inhalation Risk Assessment. Chapter 7. [http://www.epa.gov/ttn/fera/data/risk/vol\\_1.pdf](http://www.epa.gov/ttn/fera/data/risk/vol_1.pdf). 08/07/2011.2004.
- [43] USEPA. A Guide for Methane Mitigation Projects Gas to-Energy at Landfills and Open Dumps. Draft Version 2. EPA 430-B-96-081. Orlic M; Kerr T (Editors). Washington D.C. 1996.
- [44] Kiss G; Flores S; Encarnación G; y Solorzano G. Caracterización del Biogás Generado En Trece Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos en México. Gaceta Ecológica SEMARNAT. . 82:25-35. 2007.
- [45] Buenrostro O; Bocco G; & Bernache G. Urban Solid Waste Generation and Disposal in Mexico. A Case Study. Waste Management & Research. 19:169-176. 2001.
- [46] Kumar, S; Mondal, A.N.; Gaikwad, S.A.; Devotta, S. y Singh, R.N. Qualitative Assessment of Methane Emission Inventory From Municipal Solid Waste Disposal Sites: A Case Study. Atmosphere Environmental., 38: 4921-4929. 2004.
- [47] Fourie A; and Morris J. Measured Gas Emissions from Four Landfills in South Africa and Some Implications for Landfill Design and Methane Recovery in Semi-Arid Climates. Waste Management and Research. 22:440-453. 2004.
- [48] McBain M; Warland J; McBride R yWagner-Riddle C. Micrometeorological Measurements of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> Emissions From a Municipal Solid Waste Landfill. Waste Management and Research. 23:409-419. 2005.
- [49] Anurag G; Gomal A; & Armes C. A. Model to Estimate The Methane Generation Rate Constant in Sanitary Landfills Using Fuzzy Synthetic Evaluation. Waste Management & Research. 24:363-375. 2006.
- [50] INE/SEMARNAT. México Tercera Comunicación Nacional Ante La Convención Marco De Las Naciones Unidas Frente Al Cambio Climático. México D.F. S y G editores, S.A. de C.V. 2006.



- [51] Arvizu J.L; Huacuz J.M. Evaluación del Potencial Eléctrico de los Rellenos Sanitarios. Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica. 1. 1:1-14. 2006.
- [52] IMP. Escenarios de Emisiones y Medidas de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero en Sectores Clave. Sector Desechos. Dirección de Seguridad y medio Ambiente. www.imp.mx, 06/07/2008. 2005.
- [53] Israde I; Buenrostro O. y Carrillo A. Geological Characterization and Environmental Implications of the Placement of the Morelia Landfill, Michoacán, Central Mexico. Journal Air Waste Management. 55:755-764.2005.
- [54] González C; Buenrostro O.; Marquez L; Hernández C; Moreno E; and Robles F. Effect of Solid Wastes Composition and Confinement Time on Methane Production in a Dump. Journal of Environmental Protection. 2: 1310-1316. 2011.
- [55] GOOGLE EARTH. <http://earth.google.es/thanks.html>. 2007. Accesado 12/09/2010.
- [56] SECOFI. Norma Mexicana NMX-AA-022-1985. Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales por- Selección y Cuantificación de Subproductos. México. pp. 1-5. 1985<sup>a</sup>.
- [57] SECOFI. Norma Mexicana NMX-AA-052-1985. Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Preparación de Muestras en Laboratorio Para Su Análisis. México. pp. 1-5. 1985<sup>b</sup>.
- [58] SECOFI. Norma Mexicana NMX-AA-025-1984. Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos- Determinación de pH –Método Potenciométrico. México. pp. 1-5. 1984<sup>c</sup>.
- [59] SECOFI. Mexican Norm NMX-AA-016-1984. Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales – Determinación de Humedad. México. pp. 1-5. 1984<sup>d</sup>.
- [60] SECOFI. Mexican Norm NMX-AA-018-1984. Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales – Determinación de Cenizas. México. pp. 1-5. 1984<sup>e</sup>.
- [61] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Twentieth ed. Washington D.C. 1998.
- [62] JMP 6.0. SAS Institute Inc. [www.jmp.com/software/jmp6](http://www.jmp.com/software/jmp6). 2006 Accesado 22/01/99.
- [63] Onk H. Dutch Abiogenic Emissions of Methane and Nitrous Oxide and Options for Emission Reduction. Energy Conversion Management. 37.985-989. 1996.
- [64] Claudio, G. Y. 2006. Análisis de Generación de los Residuos Sólidos Residenciales en Morelia, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Facultad de biología.



UMSNH. Morelia, Michoacán, México.

[65] Buenrostro O; and Bocco G. Solid Waste Management in Municipalities in México: Goals and Perspectives. *Resources Conservation and Recycling*. 39:251-263. 2003.

[66] Barlaz, M. A., Schaefer, D. M., and Ham, R. K. Bacterial Population Development and Chemical Characteristics of Refuse Decomposition in a Simulated Sanitary Landfill. *Applied and Environmental Microbiology*. 55: 55-65. 1989.

[67] Chen, Y., Ke, H., Fredlund, D., Zhan, L., and Xie, Y. Secondary Compression of Municipal Solid Wastes and a Compression Model for Predicting Settlement of Municipal Solid Waste Landfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 136.5:706-717. 2010.

[68] Lethlean, J; Swarbrick G y Pantelis G. 1998. Physicla and Biochemical Modelling of Landfill Degradation. *Fifth International Landfill Symposium*. Italy.

[69] Francois V; Feuillade G; Matejka G; Lagier T; and Skhiri N. Leachate Recirculation Effects on Waste Degradation: Study on Columns. *Waste Management and Research*. 27.9:1259-1272. 2007.

[70] El-Fadel M; Findikakis A; and Leckie J. Estimating and Enhancing Methane Yield from Municipal Solid Waste. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*. 13:309-331. 1996.

[71] Reinhart D.R; McCreanor P.T; and Townsend TG. The Bioreactor Landfill: Its Status and Future. *Waste Management and Research*. 20:172-186. 2002.

[72] Mehta R; Barlaz M.A; Asce M; Yazdani R; Augenstein D; Bryars M; and Sinderson L. Refuse Decomposition in the Presence and Absence of Leachate Recirculation. *Journal of Environmental Engineering*. 3:228-236. 2002.

[73] Thompson S; and Tanapat S. Waste Management Options for Greenhouse Gas Reduction Modeling Methane Generation for Different Waste Management Options. *Environmental Informatics Archives*. 2:242-251. 2004.

[74] [www.wordweather.org](http://www.wordweather.org). 2012. 05/01/2012.

[75] Arvizu J.L; Huacuz J.M. Biogás de Rellenos Sanitarios para Producción de Electricidad. *Boletín 118 IIE*. 2003.

## 12 ANEXO 1

### Determinación de potencial de hidrógeno (pH)

El procedimiento se llevó a cabo de acuerdo a la NMX-AA-25-1984 (SECOFI, 1984<sup>c</sup>) con un potenciómetro (Marca Felisa Modelo PC-18), previamente calibrado a un pH de 7.0 con una solución amortiguadora. El proceso consistió en pesar 10 g de muestra colocada en un vaso de precipitado de 250 cm<sup>3</sup>. A la muestra se añadió 90 cm<sup>3</sup> de agua destilada mezclándose con ayuda de un agitador eléctrico durante 10 min. Se dejó reposar la solución durante 30 min para después determinar la temperatura y la lectura de pH sumergiendo los electrodos en la solución.

### Determinación de humedad

El contenido de humedad se determinó de acuerdo con la NMX-AA-016-1984 (SECOFI, 1984<sup>d</sup>). Se utilizaron 90 g de muestra sin compactar distribuidas en 9 cápsulas de aluminio previamente tratadas por un proceso de lavado, enjuagado y desecado en una mufla a 550°C. Posteriormente fueron pesadas en una balanza analítica e introducidas a la estufa a 105°C por 24 hrs. Se dejaron enfriar y se pesaron para registrar la humedad resultante producto de su pérdida. Finalmente el peso inicial fue restado del peso final para obtener un peso neto de la muestra. Para efectuar los cálculos se utilizó la ecuación 1.28:

$$\%H = \frac{PH - PS}{PH} * 100 \quad \text{Ec. 1.28}$$

Donde:

$\%H$  = Porcentaje de humedad

$PH$  = Peso en g de la muestra húmeda



$PS$ = Peso en g de la muestra seca

### Determinación de sólidos totales

El análisis de ST se basó en la técnica descrita en el Standard Methods (APHA et al., 1998). Los cálculos se realizaron con la ecuación 1.29:

$$\%ST = \frac{PS}{PH} * 100 \quad \text{Ec. 1.29}$$

Donde:

$\%ST$ = Porcentaje de Sólidos Totales

$PH$ = Peso en g de la muestra húmeda

$PS$ = Peso en g de la muestra seca.

### Determinación de cenizas

El contenido de cenizas se determinaron de acuerdo con la NMX-AA-018-1984 (SECOFI, 1984<sup>o</sup>). Las muestras resultantes del proceso de humedad fueron colocadas en una mufla y se incineraron a 550 °C durante 5 horas. Posteriormente y hasta obtener peso constante, se pasaron a la estufa a 105°C durante 1 hora y consecutivamente, fueron colocadas en el desecador por 45 min, para finalmente pesar el producto final de la muestra. Para calcular el % de cenizas se utilizó la ecuación 1.30.

$$\%C = \frac{PC * 100}{PS} \quad \text{Ec. 1.30}$$

Donde:

$\%C$  = Porcentaje de cenizas



$PC$  = Peso en g de las cenizas

$PS$  = Peso en g de la muestra seca

### **Determinación de sólidos volátiles (SV)**

El análisis de SV se llevó a cabo de acuerdo con la técnica descrita en el Standard Methods (APHA et al., 1998). Con los pesos obtenidos de la determinación de cenizas, se realizaron los cálculos conforme a la ecuación 1.31.

$$\%SV = \frac{PS - PC}{PS} * 100 \quad \text{Ec. 1.31}$$

Donde:

$\%SV$  = Porcentaje de Sólidos Volátiles

$PS$  = Peso en g de la muestra seca

$PC$  = Peso en g de la muestra calcinada