

Emisiones de metano por la disposición de residuos sólidos urbanos: el caso de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Methane emissions generated by urban solid waste disposal: the case of Tuxtla Gutiérrez,
Chiapas, México.

Emmanuel Díaz-Nigenda^{1*}, Andrea Venegas-Sandoval¹, Williams Vázquez-Morales¹, Hugo Alejandro Nájera-Aguilar², Horacio Morales-Iglesias¹, Cecilia Vázquez Ovando¹.

¹ Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Lib. Norte Pte. #1150. Col. Lajas Maciel. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. C.P. 29039. Tel. 961 617 0440 ext. 4284
Correo electrónico: emmanuel.diaz@unicach.mx

² Escuela de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
*Autor de correspondencia

Resumen

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son un problema ambiental que afecta a las ciudades en el mundo, su manejo es necesario para minimizar sus impactos, como la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Al considerar como caso de estudio la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, se cuantificó el metano (CH₄) generado por la disposición de los RSU durante el periodo 2000-2020 mediante el método por defecto de las directrices del IPCC 1996. Para ello se calcularon los residuos generados anualmente en función del tamaño de la población y la generación per cápita (GPC). Las emisiones pasaron de 5857.03 t CH₄ en el 2000 a 14 734.24 t CH₄ en el 2020, con tasas de crecimiento que varían entre 1.19% y 29.3% y una media anual del 4.89%. La magnitud de estas supera algunas que se generan en ciudades con mayor desarrollo socioeconómico y evidencia la problemática de varias ciudades de México.

Palabras clave: Gases de efecto invernadero; sitios de disposición final; Tuxtla Gutiérrez; carbono orgánico degradable.

Abstract

Municipal solid waste (MSW) is an environmental problem affecting cities around the world, its management is vital to minimize impacts such as the emission of greenhouse gases (GHG). Taking Tuxtla Gutiérrez as a case study, the methane (CH₄) emissions generated by the disposal of MSW were quantified for the period 2000-2020 by applying the default method of 1996 IPCC guidelines. It was necessary to calculate the amount of waste generated annually from the size of the population and per capita daily MSW generation (PCG). The emissions increased from 5857.03 t CH₄ in 2000 to 14 734.24 t CH₄ in 2020, with growth rates ranging between 1.19% and 29.3% and an annual average of 4.89%. The magnitude of emissions exceeds those generated in cities with a greater socio-economic development and evinces the problems shared by several cities in Mexico.

Keywords: Greenhouse gases; final disposal site; Tuxtla Gutiérrez; degradable organic carbon.

Recibido: 25 de febrero de 2022

Aceptado: 29 de junio de 2022

Publicado: 07 de septiembre de 2022

Cómo citar: Díaz-Nigenda, E., Venegas-Sandoval, A., Vázquez-Morales, W., Nájera-Aguilar, H. A., Morales-Iglesias, H., & Vázquez Ovando, C. (2022). Emisiones de metano por la disposición de residuos sólidos urbanos: el caso de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Acta Universitaria* 32, e3506. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2022.3506>

Introducción

Hoy en día, cualquier actividad que la sociedad desarrolla genera residuos sólidos, mismos que deben ser manejados y dispuestos de manera correcta para reducir su impacto y afectación en el territorio. La generación de residuos muestra una tendencia ascendente que puede relacionarse con factores como el crecimiento poblacional, la adopción de nuevas costumbres o cambios en los hábitos de consumo, además de fenómenos de migración de zonas rurales a urbanas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2016). Sumado a lo anterior, y de acuerdo con Castrejón-Godínez *et al.* (2015), se debe considerar el incremento que se da año con año en la generación per cápita (GPC).

Para el caso del estado de Chiapas, de acuerdo con cifras de la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural (Semahn, 2019a), en la entidad se produjeron cerca de 4000 t d⁻¹ de residuos sólidos urbanos (RSU), de los cuales aproximadamente el 50% fue aportada por solo 10 de los 125 municipios del estado (Semahn, 2019b); entre ellos destaca la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (TGZ) por ser la capital y concentrar la mayor población del estado, la cual ha experimentado un crecimiento acelerado en los últimos años.

Respecto al manejo de los RSU en TGZ, el proceso comprende las etapas de generación, almacenamiento, recolección, transporte y transferencia, separación y aprovechamiento de subproductos, además de la disposición final. Es importante mencionar que las fases involucradas en el servicio de recolección y de disposición final se encuentran concesionadas a una empresa privada y que, a diferencia del resto de los municipios del estado, se visualiza un manejo que incluye (al menos en su esquema) etapas como la de separación y aprovechamiento de subproductos, además de contar con un relleno sanitario para su disposición final (Figura 1).

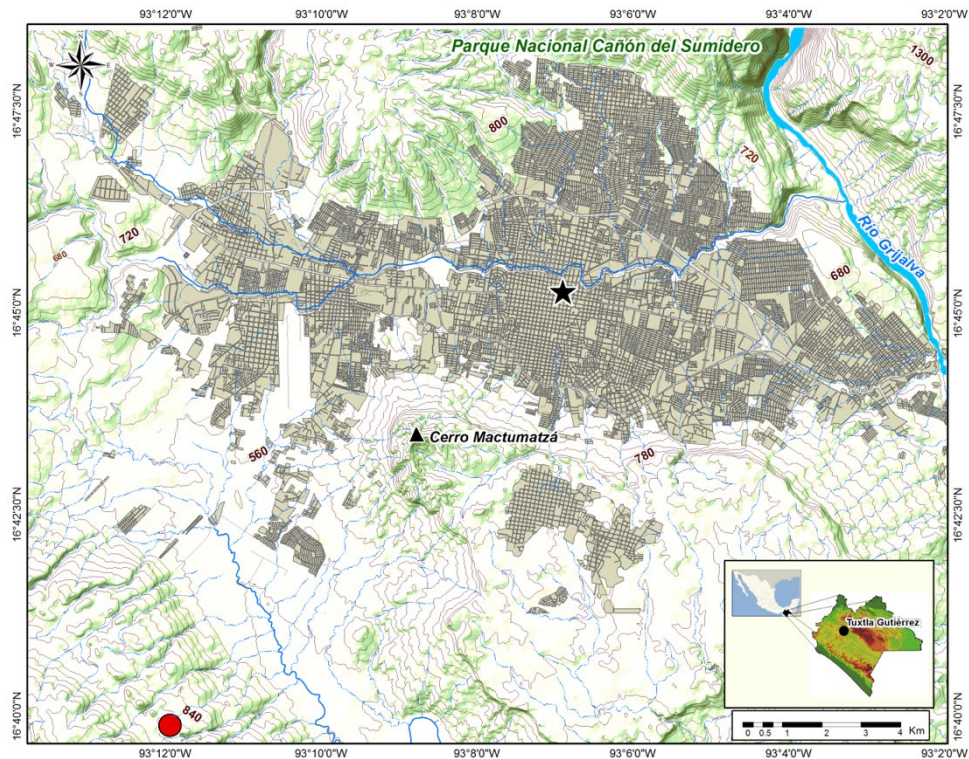


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Se observa el centro de la ciudad (★) y la ubicación del relleno sanitario (●).
Fuente: Elaboración propia.

A nivel estatal no se identifica alguna estrategia de manejo y aprovechamiento de la fracción orgánica de los RSU, la cual, de acuerdo con Semahn (2019a), representa el 51% de los residuos. Algo similar ocurre en el ámbito municipal, cuyo componente orgánico puede ser mayor al 50% (Esquinca *et al.*, 1996; Vera *et al.*, 2013; Villalobos, 1996). A su vez, no existe una cultura de reciclaje y de aprovechamiento de otros subproductos que sea impulsada por las dependencias gubernamentales, todo se reduce a empresas privadas dedicadas a la colecta, transporte, almacenamiento y venta de algunos subproductos de materiales ferrosos, plásticos, papel y cartón.

El manejo inadecuado de los RSU genera impactos negativos al suelo, agua, flora y fauna y a la salud de la población (Castrejón-Godínez *et al.*, 2015; Urdaneta & Sáez, 2014), además de la atmósfera (Herrera *et al.*, 2018; Semarnat, 2016). Las emisiones que se generan por los RSU pueden ser analizadas desde diferentes enfoques, como la calidad del aire (Cárdenas-Moreno *et al.*, 2021), emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Kumar *et al.*, 2004; Salmerón-Gallardo *et al.*, 2017), generación de biogás (Ghosh *et al.*, 2018; Srivastava & Chakma, 2020), entre otros. Para ello se aplican distintas metodologías como la de ISO 14 061, la huella de carbono-ISO 14 067 (Ihobe, 2013) y las directrices del IPCC versión revisada de 1996 (Aguilar-Virgen *et al.*, 2011; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 1997). Esta última ha facilitado el desarrollo de diferentes instrumentos que rigen la política ambiental nacional, estatal y municipal en torno a la problemática del cambio climático, lo cual permite identificar las principales fuentes de emisión de GEI, así como orientar los esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático (Programa de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas [PACCCH], 2011; Programa Municipal ante el Cambio Climático [Promacc], 2015).

A pesar de su relevancia, los estudios sobre RSU en Chiapas son escasos y desactualizados, sobresalen los trabajos realizados para TGZ (Esquinca *et al.*, 1996; Vera *et al.*, 2013; Villalobos, 1996), Las Margaritas (Araiza *et al.*, 2015) y Berriozábal (Araiza *et al.*, 2017), entre otros. En relación con la cuantificación de emisiones del sector desperdicios en la entidad, esta se considera una línea de investigación incipiente. Los dos referentes más importantes para la presente investigación corresponden a los datos del inventario estatal de GEI publicado en el PACCCH (2011) y a nivel municipal corresponde el inventario de emisiones para TGZ publicado en el Promacc (2015). Por otro lado, acorde al IPCC (1997), se han estudiado más las emisiones generadas en otros sectores, principalmente en el sector cambio de uso de suelo y silvicultura (Ruíz-Valdiviezo *et al.*, 2010), así como en el sector energía (Díaz-Nigenda *et al.*, 2021). En este sentido, al considerar que las emisiones de GEI por la disposición de RSU son dinámicas y cambian en función de las condiciones sociales, económicas y ambientales, resulta necesario conocer su comportamiento para dimensionar y entender la problemática ambiental asociada.

El objetivo de la presente investigación es cuantificar las emisiones de CH₄ generadas por la disposición de RSU en TGZ en el periodo 2000-2020 mediante las directrices del IPCC versión revisada de 1996, para lo cual, al no contar con información específica, no se contempla aprovechamiento alguno de los residuos.

Materiales y métodos

Zona de estudio

TGZ se ubica a una altitud de 522 metros sobre nivel medio del mar en la parte centro-occidente del estado de Chiapas, ocupa una superficie de 334.61 km² en la cuenca baja del río Sabinal. Al norte colinda con el Parque Nacional Cañón del Sumidero, al sur con el Cerro Mactumatzá y la Mesa de Copoya, al Oeste con el municipio de Berriozábal, y al este con el río Grijalva y Chiapa de Corzo. Sus coordenadas extremas son: 16° 40' 30" y 16° 48' 00" latitud norte y 93° 01' 35" y 93° 13' 10" longitud oeste (Figura 1) (Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas [CEIEG], 2021).

La ciudad cuenta con un relleno sanitario que comenzó a recibir residuos en el año 2008, y que en la actualidad cuenta con siete celdas que cubren una superficie cercana a las 11 ha y donde se han alojado alrededor de 2 800 000 t de residuos. El relleno sanitario cumple con la mayoría de los aspectos que contempla la NOM-083-SEMARNAT-2003 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2004), como son: cobertura diaria de los residuos, impermeabilización de las celdas de confinamiento, maquinaria pesada y sistemas para el control de lixiviados y biogás; este último es conducido y disipado a través de un sistema de pozos de venteo pasivo, sin que se tenga registro de su aprovechamiento como tal. Para el caso de los lixiviados, únicamente son contenidos en lagunas de evaporación y recirculados periódicamente al cuerpo de las celdas con el fin de controlar su producción y acelerar los procesos de descomposición de los residuos, sin embargo, esta forma de manejarlos no puede considerarse un tratamiento adecuado, dado que, durante el proceso de evaporación, no solo agua es emitida a la atmósfera, sino también algunos contaminantes (Gray *et al.*, 2005).

Datos de población

Los datos del tamaño de población fueron tomados de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2000, 2005) y CEIEG (2021). Para complementar la serie de tiempo 2000-2020 (Tabla 1), se calcularon tasas de crecimiento acorde a la información disponible mediante el modelo geométrico de crecimiento poblacional propuesto por Torres-Degró (2017), de acuerdo con la ecuación:

$$r = \left(\frac{P^{t+n}}{P^t} \right)^{1/a} - 1 \quad (1)$$

donde r es la tasa de crecimiento anual geométrico, a es la amplitud entre las dos poblaciones de referencia, P^{t+n} es la población al momento actual y P^t es la población inicial.

Datos de generación de residuos sólidos

Los datos de GPC (kg hab⁻¹ d⁻¹) fueron tomados de Semahn (2019a) e INECC (2021). Similar a los datos de población, se aplicó el modelo geométrico de crecimiento (Torres-Degró, 2017) para complementar la serie de GPC para el periodo 2000-2020 (Tabla 1). Así, la generación anual de RSU fue obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$RSU_i = (P_i)(GPC_i) \left(\frac{365}{1000} \right) \quad (2)$$

donde i es el año de interés, RSU_i son los RSU generados en el año i (t año⁻¹), P_i es la población en el año i y GPC_i es la generación per cápita en el año i (kg hab⁻¹ d⁻¹).

Cuantificación de emisiones

Para cuantificar las emisiones anuales de GEI generadas por la disposición de los RSU, se aplicó el método por defecto (nivel 1) de las directrices del IPCC en su versión revisada de 1996, el cual supone que la totalidad de CH₄ se libera durante el año en el que se produce la disposición de los residuos, de acuerdo con la siguiente ecuación (IPCC, 1997, 2000):

$$E_{CH_4} = [(RSU_T \times RSU_F \times FCM \times COD \times COD_F \times F \times \frac{16}{12} - R) \times (1 - OX)] \times 1000 \quad (3)$$

donde E_{CH_4} es la emisión de CH₄ (t año⁻¹), RSU_T es el total de RSU generados (Gg año⁻¹), RSU_F es la fracción de RSU eliminados en los vertederos de residuos sólidos, FCM es el factor de corrección para el CH₄, COD es la fracción de carbono orgánico degradable, COD_F es la fracción del carbono orgánico degradable asimilado, F es la fracción de CH₄ en el gas de vertedero, R es el CH₄ recuperado y OX es el factor de oxidación.

Por otro lado, se consideró que el 86.95% de los RSU llegan al sitio de disposición final (SDF) con base en la cobertura de recolección promedio que se tiene en México para localidades con población mayor a 100 mil habitantes (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [INECC-Semarnat], 2012). Al no contar con estudios relacionados, se utilizaron valores por defecto recomendados por las directrices del IPCC (1997) para la fracción del COD_F (0.77), F (0.5) y OX (0). Similar al Promacc (2015), se establecieron dos escenarios: el primero abarca del año 2000 al 2007, que contempla la disposición de los residuos en tiradero a cielo abierto con profundidad ≥ 5 m; mientras que el segundo representa un periodo que inicia en el año 2008 al 2020, ya con el funcionamiento del relleno sanitario. En este sentido, los valores de FCM fueron de 0.8 y 1, respectivamente. Para este trabajo no se consideró recuperación alguna de CH₄ (R = 0).

Por otro lado, se consideraron estudios previos sobre caracterización de RSU realizados en TGZ (Esquinca et al., 1996; Vera et al., 2013; Villalobos, 1996), así como del municipio de Berriozábal por su cercanía (Araiza et al., 2017). A partir de ellos, y acorde a lo establecido en las directrices del IPCC (1997), se calculó el %COD mediante la ecuación:

$$\%COD \text{ (por peso)} = (0.4 \times A) + (0.17 \times B) + (0.15 \times C) + (0.3 \times D) \quad (4)$$

donde %COD es el porcentaje de COD en los RSU, A es el contenido de papel y los textiles en los RSU (%), B es el contenido de residuos de jardín y de los parques o de otros restos orgánicos putrescibles en los RSU (%), C es el contenido de restos de alimentos en los RSU (%) y D es el contenido de madera y paja en los RSU (%). Los valores COD obtenidos y los periodos en los que fueron aplicados se muestran en la Tabla 2.

Finalmente, de acuerdo con Walpole et al. (2012), se calculó el error estándar de la media ($S_{\bar{x}}$) con la finalidad de evaluar la variabilidad de las emisiones mediante la ecuación:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

donde S es la desviación estándar y n el tamaño de la muestra.

Resultados

La ciudad de TGZ pasó de 434 143 habitantes en el año 2000 a 604 147 en el 2020, lo que representa un incremento aproximado del 39% de la población con tasas de crecimiento del 3% (2000-2005), 1.9% (2005-2010) y 1.6% (2010-2015). A pesar de observarse una tendencia positiva en el aumento de la población, este ha disminuido hacia el final del periodo a una tasa del 0.2% (2015-2020). Por otro lado, la GPC (kg hab⁻¹ d⁻¹) ha experimentado un incremento del 28% con tasas de crecimiento del 1.5% (2000-2005), 1.49% (2005-2010) y 1% (2010-2018). Lo anterior puede observarse en la Tabla 1.

Tabla 1. Generación anual de residuos sólidos durante el periodo 2000–2020 en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Año	Población	GPC (kg hab ⁻¹ día ⁻¹)	RSU generados (t año ⁻¹)	RSU a SDF (t año ⁻¹)
2000	434 143 ^a	0.8750 ^d	138 654.42	120 560.02
2001	447 172	0.8881	144 960.30	126 042.98
2002	460 593	0.9015	151 552.97	131 775.31
2003	474 416	0.9150	158 445.47	137 768.34
2004	488 655	0.9288	165 651.43	144 033.92
2005	503 320 ^b	0.9427 ^d	173 185.11	150 584.46
2006	512 955	0.9568	179 145.85	155 767.32
2007	522 774	0.9712	185 311.75	161 128.56
2008	532 781	0.9857	191 689.86	166 674.34
2009	542 980	1.0005	198 287.50	172 410.98
2010	553 374 ^c	1.0155 ^d	205 112.22	178 345.08
2011	562 158	1.0257	210 460.30	182 995.23
2012	571 081	1.0360	215 947.83	187 766.63
2013	580 146	1.0464	221 578.43	192 662.45
2014	589 355	1.0569	227 355.85	197 685.91
2015	598 710 ^c	1.0675	233 283.91	202 840.36
2016	599 793	1.0782	236 052.77	205 247.88
2017	600 879	1.0891	238 854.49	207 683.98
2018	601 966	1.1000 ^e	241 689.47	210 148.99
2019	603 056	1.1147	245 355.22	213 336.37
2020	604 147 ^c	1.1273	248 576.76	216 137.49

Nota. Los datos en negritas fueron tomados de ^aINEGI (2000), ^bINEGI (2005), ^cCEIEG (2021), ^dINECC (2021) y ^eSEMAHN (2019a).

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos de población y GPC se calculó la generación anual de residuos mediante la ecuación 2; los resultados se muestran en la Tabla 1 y en la Figura 2. Los datos muestran un incremento del 79.3% en la cantidad de RSU generados en el periodo 2000-2020, lo que equivale a un aumento de 95 577.47 t de residuos.

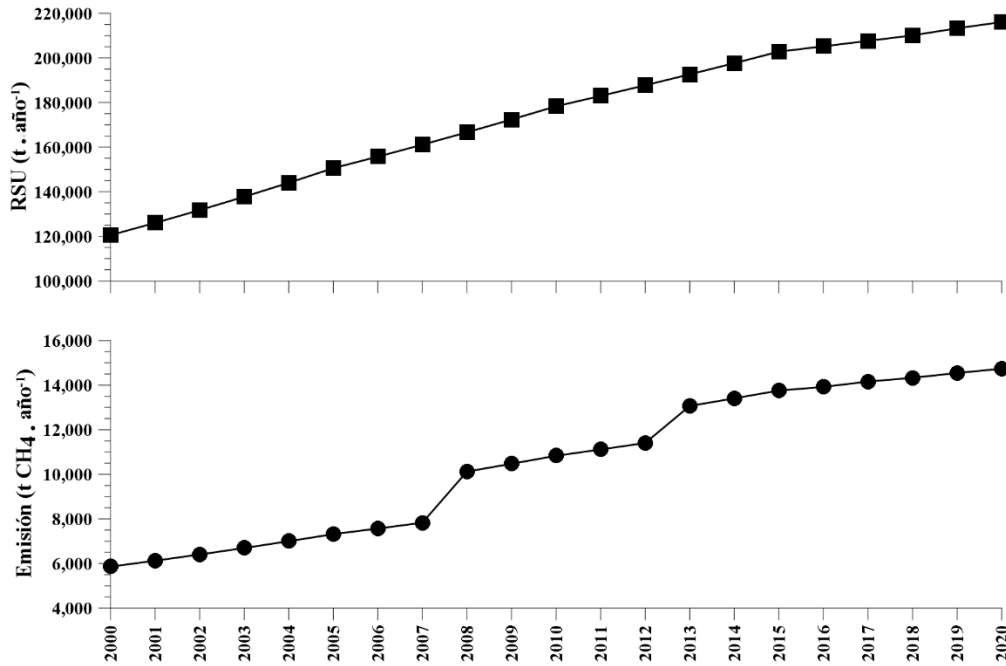


Figura 2. Serie temporal de generación de residuos sólidos municipales y emisiones de CH₄ durante el periodo 2000–2020 en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 muestra un comportamiento escalonado en las emisiones anuales, lo cual obedece a dos eventos. El primero (2007-2008) considera un incremento debido al cambio de tiradero a cielo abierto (FCM=0.8) a relleno sanitario (FCM=1), situación que favorece la descomposición del componente orgánico bajo condiciones anaeróbicas, lo que genera mayores emisiones de CH₄. El segundo evento (2012-2013) se debe al cambio en los valores de la fracción COD empleada (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de carbono orgánico degradable (COD) utilizados en la cuantificación de emisiones anuales de CH₄ para el periodo 2000–2020.

COD (%)	Periodo de Aplicación	Referencia
11.83*	2000-2012	Villalobos (1996) Esquinca et al. (1996)
13.21	2013-2016	Vera et al. (2013)
13.28	2017-2020	Araiza et al. (2017)

*en promedio
Fuente: Elaboración propia.

En el año 2000, se emitieron 5857.03 t CH₄ (122 997.65 t CO₂e) por la disposición de 120 560.02 t RSU, mientras que 14 734.24 t CH₄ (309 418.97 t CO₂e) fueron emitidos en el 2020 a partir de 216 137.49 t RSU. Lo anterior equivale a un incremento de 8 877.21 t CH₄ (186 421.33 t CO₂e) durante el periodo, observándose tasas de crecimiento que oscilan entre 1.19% y 29.3% y una media anual del 4.89% (Tabla 3).

Tabla 3. Emisiones anuales de CH₄ durante el periodo 2000–2020 por la disposición de residuos sólidos en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Año	Emisión		Estadísticos (t CH ₄)
	t CH ₄	t CO _{2e}	
2000	5857.03	122 997.65	
2001	6123.40	128 591.47	
2002	6401.89	134 439.70	
2003	6693.04	140 553.91	$\bar{X} = 6847.98$
2004	6997.44	146 946.17	$S = 701.94$
2005	7315.67	153 629.16	$S_{\bar{x}} = 248.17$
2006	7567.47	158 916.81	
2007	7827.93	164 386.45	
2008	10 121.69	212 555.45	
2009	10 470.06	219 871.24	$\bar{X} = 10 787.51$
2010	10 830.42	227 438.84	$S = 507.46$
2011	11 112.81	233 369.06	$S_{\bar{x}} = 226.94$
2012	11 402.57	239 453.90	
2013	13 064.70	274 358.65	
2014	13 405.35	281 512.25	
2015	13 754.88	288 852.38	
2016	13 918.13	292 280.78	$\bar{X} = 13 988.07$
2017	14 157.96	297 317.06	$S = 568.15$
2018	14 326.00	300 845.93	$S_{\bar{x}} = 200.87$
2019	14 543.28	305 408.93	
2020	14 734.24	309 418.97	

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

De acuerdo con Semarnat (2016), los escenarios de crecimiento poblacional y de GPC (Tabla 1) que se experimentaron en TGZ durante el periodo 2000-2020 están directamente relacionados a una excesiva generación de residuos sólidos por una mayor demanda de bienes y servicios para satisfacer las necesidades de la población, lo cual, de acuerdo con Urdaneta & Sáez (2014), tiene un comportamiento similar a varios países en Latinoamérica, por lo que el manejo y disposición resultan de gran interés para evitar impactos como la emisión de GEI.

Por otro lado, a partir de los resultados de generación anual de RSU, se obtuvo un incremento de 79.3% en la cantidad de residuos durante el periodo 2000-2020 (Tabla 1), el cual es mayor al valor observado en México (61.2%) del 2003 al 2015, lo que evidencia la necesidad de establecer medidas para el manejo de RSU en la entidad (Semarnat, 2016).

A partir de los datos de generación de RSU anuales, para el cálculo de las emisiones de GEI se utilizaron los valores COD que se muestran en la Tabla 2, los cuales se tomaron de estudios locales sobre la caracterización de RSU (Araiza et al., 2017; Esquinca et al., 1996; Vera et al., 2013; Villalobos, 1996), mismos que se aproximan al valor recomendado por el IPCC (1997) para el caso de Centro América (13%).

En relación con las emisiones anuales obtenidas, los cambios en la dinámica observada (Figura 2) coinciden con lo establecido por Arvizu et al. (2007), quienes argumentan que las modificaciones en la tecnificación del sitio de disposición final (cambio de tiradero a cielo abierto a relleno sanitario), así como los cambios en la composición de los residuos (cambio en la fracción COD empleada), influyen de manera considerable en las emisiones de CH₄. Ante esta situación, se calculó $S_{\bar{x}}$ para los tres periodos identificados; los resultados se muestran en la Tabla 3. Se observa que el error más alto fue obtenido para el periodo 2000-2007 ($S_{\bar{x}} = 248.17 \text{ t CH}_4$), mientras que el más bajo se observa del 2013-2020 ($S_{\bar{x}} = 200.87 \text{ t CH}_4$). Con base en el método utilizado para el cálculo de la cantidad de residuos generados, los errores obtenidos estarían relacionados al aumento poblacional, la cual presentó una tasa de crecimiento menor hacia el final del periodo, provocando que los datos se distribuyan cerca del valor de la media.

En la Tabla 3 se observa que las emisiones de CH₄ tuvieron un incremento medio anual del 4.89%, mismo que es inferior a aquel reportado en el Promacc (2015) equivalente a 19%. Esta diferencia puede atribuirse a que en el presente estudio los datos de generación de RSU han sido calculados a partir de datos de población y de GPC, mientras que los del Promacc fueron realizados con datos proporcionados por dependencias gubernamentales.

En el año 2005, las emisiones de CH₄ generadas por la disposición de los RSU en TGZ representarían cerca del 18% de aquellas generadas en Chiapas (41 080 t CH₄) en el mismo rubro (PACCCH, 2011); lo anterior resulta de interés al considerar que poco más del 10% de la población del estado habita en la ciudad capital. Debido a la forma en la que se obtuvieron los datos de generación, las emisiones de CO_{2e} presentan diferencias a aquellas reportadas por el Promacc (2015) en el periodo 2005-2012, sin embargo, son aproximadas. Tan solo para el año 2010, el Promacc (2015) reporta una emisión de 248 587 t CO_{2e}, en contraste con 227 438.84 t CO_{2e} que se reportan en el presente estudio para el mismo año.

Las emisiones de CH₄ obtenidas para el periodo 2013–2020 (Tabla 3) son similares a las reportadas por Kumar et al. (2004) en el relleno sanitario de Okhla en Delhi, India, de 1995 a 2001, lo cual resulta de interés al considerar que la cantidad de RSU considerados para TGZ representan aproximadamente el 50% de aquellos para esa región asiática. Por otro lado, esas mismas emisiones son equivalentes e incluso superiores a las estimadas por Cárdenas-Moreno et al. (2021) en algunos sitios de disposición final de RSU en el centro de México. Además, para el año 2017 y 2020, la cantidad de CH₄ generado en TGZ representaría el 7.2% y 7.7%, respectivamente, de aquellas que fueron proyectadas para los 30 sitios considerados en esa región del país.

A partir de la aplicación de tres metodologías diferentes para la cuantificación de emisiones de CH₄ por la disposición de RSU en tres sitios de disposición en Delhi, India, los resultados obtenidos por Srivastava & Chakma (2020) son comparables con los que se reportan en el presente estudio (Tabla 3). Análogo a Kumar et al. (2004), las emisiones generadas en Okhla son similares a las que se muestran para TGZ.

Respecto a algunos instrumentos que rigen la política municipal en México, las emisiones generadas en TGZ en el año 2010 son menores a aquellas obtenidas para Toluca, Estado de México (Plan de Acción Climática Municipal [Pacmun] Toluca, 2013); Puebla, Puebla (Pacmun Puebla, 2013); Acapulco, Guerrero (Salmerón-Gallardo et al., 2017); y Cancún, Quintana Roo (Pacmun Benito Juárez, 2018), quienes reportan 333 442.2 t CO₂e, 719 294 t CO₂e, 378 930 y 549 563.06 t CO₂e, respectivamente. Esta diferencia es resultado de la mayor cantidad de residuos generados en dichas ciudades, así como de la composición de los RSU. Caso contrario se observa al compararlo con Xalapa, Veracruz (Pacmun Xalapa, 2013), y Cuernavaca, Morelos (Pacmun Cuernavaca, 2018), en donde la generación de residuos y, en consecuencia, las emisiones de GEI (171 881 t CO₂e y 173 004.802 t CO₂e, respectivamente) son menores que en TGZ (227 438.84 t CO₂e).

En el 2013, a partir de la disposición de 206 852 t de RSU se cuantificaron 25 165.61 t CH₄ (528 477 t CO₂e) en la ciudad de Villahermosa, Tabasco (Pacmun Villahermosa, 2016), lo cual representa casi dos veces el valor de las emisiones que se generaron en TGZ en el mismo año (Tabla 3) a partir del manejo de 192 662.45 t RSU. Se observa una pequeña diferencia entre la cantidad de residuos (14 189.55 t), sin embargo, aquella que se presenta entre las emisiones es considerable, lo cual es el resultado de cambios en la composición de los RSU entre ambas ciudades que genera que la fracción COD para Villahermosa (≈23%) sea mayor a aquella para TGZ (13.21%).

Para el año 2016, las emisiones generadas son mayores a las presentadas por la ciudad de Mérida, Yucatán (Pacmun Mérida, 2021), donde a partir de la implementación de las directrices del IPCC 2006, se reportan 280 000 t CO₂e a partir de la disposición de 292 000 t RSU al año. En este caso se observa que la cantidad de RSU considerados para la cuantificación de GEI es mayor a la de TGZ en el mismo año (Tabla 1); por tanto, al ser utilizados valores por defecto en ambos casos, el comportamiento de las emisiones podría ser atribuible a las diferencias entre las fracciones orgánicas presentes en los residuos de ambas entidades.

Romero et al. (2009), mediante la aplicación de las metodologías del IPCC 1996, obtuvo para el año 2005 una emisión de 43 268 t CH₄ en la ciudad de Buenos Aires, Argentina, la cual supera a la reportada en este trabajo en ese mismo año (7 315.67 t CH₄). Esta diferencia se atribuye a la mayor cantidad de residuos generados en esa localidad, así como a la fracción COD empleada. Por otro lado, las emisiones aquí reportadas son mayores a aquellas obtenidas por Armenta-Rivas et al. (2017) para un relleno sanitario en Magdalena, Colombia, quienes mediante el uso del modelo de primer orden del IPCC 1996 reportan emisiones que oscilan entre 200 t CH₄ y 2949 t CH₄ al año para el periodo 2004–2020. De manera similar, los resultados superan a los obtenidos por Herrera et al. (2018) en el año 2015, quienes a partir del uso de factores de emisión contabilizaron cerca de 173 115.85 t CO₂e que fueron emitidos por la disposición de 158 045 t RSU en la ciudad de San José, Costa Rica. Estas diferencias son atribuibles a las técnicas utilizadas para la cuantificación de emisiones de CH₄, además de la cantidad de RSU considerados para ello.

En suma, los resultados obtenidos reflejan que en TGZ las emisiones de CH₄ incrementan año con año y la magnitud de estas puede superar a las generadas en algunas ciudades que presentan un mayor desarrollo socioeconómico, por lo que establecer medidas de mitigación que permitan la separación y el aprovechamiento de los residuos para la reducción de GEI toma mayor relevancia, tal como lo establece Abelino-Torres et al. (2019).

Conclusiones

En TGZ, las emisiones de CH₄ obtenidas a partir del manejo y la disposición de los RSU han incrementado debido al aumento de residuos generados anualmente, inducido por el crecimiento de la población, así como por el aumento de la GPC, esto último relacionado a los cambios en los hábitos de consumo. De acuerdo con los resultados, el comportamiento de las emisiones responde directamente al contenido de materia orgánica (referido a la fracción COD) en los RSU, así como a los cambios en la tecnificación del sitio de disposición final.

Ante esta problemática, los resultados muestran la relevancia de cuantificar las emisiones derivadas de la disposición de los RSU, así como la necesidad de evaluar e implementar acciones como la separación y aprovechamiento de subproductos u otras medidas de mitigación que permitan reducir las emisiones de CH₄, así como del desarrollo tecnológico para el aprovechamiento del biogás generado en el sitio de disposición.

En este trabajo se presentó el caso de estudio de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, sin embargo, la problemática ambiental aquí abordada es un común denominador de varias ciudades de México, por lo que replicar el estudio en diferentes localidades permitiría tener una visión estratégica del problema, lo cual facilitaría la toma de decisiones en el establecimiento de políticas públicas.

Agradecimientos

Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente de la Secretaría de Educación Pública por el apoyo brindado a través de la convocatoria de Fortalecimiento de Cuerpos Académicos en Formación.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés en el presente trabajo.

Referencias

- Abelino-Torres, G., Quispe-Limaylla, A. G., Pérez-Hernández, L. M., Leos-Rodríguez, J. A., Carranza-Díaz, O., & Flores-Sánchez, D. (2019). Factores asociados con la participación de las familias en la separación de residuos sólidos urbanos en Texcoco, Estado de México. *Acta Universitaria*, 29, e2087. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2019.2087>
- Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P.A., & Ojeda-Benítez, S. (2011). Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. *Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 15(1), 37-45. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen15/modelo.pdf>
- Araiza, J. A., López, C. S., & Ramírez, N. R. (2015). Manejo de residuos sólidos urbanos: caso de estudio en Las Margaritas, Chiapas. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*, 8(3), 299-311. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/40661>
- Araiza, J. A., Chávez, J. C., & Moreno, J. A. (2017). Cuantificación de residuos sólidos urbanos generados en la cabecera municipal de Berriozábal, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(4), 691-699. doi: <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.04.12>
- Armenta-Rivas, M. E., Sierra-Camargo, L. D., & Vélez-Pereira, A. M. (2017). Modelación de la producción de metano en el Relleno Sanitario Parque Ambiental Palangana (Santa Marta). *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(2), 183-192. <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v18n2/1405-7743-iit-18-02-00183.pdf>
- Arvizu, J. L., Romero, H., & Huacuz, J. M. (2007). *Estimación de los factores de emisión. Informe final*. Instituto de Investigaciones Eléctricas. <http://www2.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/e2007a.pdf>

- Cárdenas-Moreno, P., Piña-Guzmán, A. B., & Robles-Martínez, F. (2021). Estimación del biogás generado en sitios de disposición final del Estado de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37, 27-38. doi: <https://doi.org/10.20937/RICA.53632>
- Castrejón-Godínez, M. L., Sánchez-Salinas, E., Rodríguez, A., & Ortiz-Hernández, M. L. (2015). Analysis of solid waste management and greenhouse gas emissions in México: a study case in the central region. *Journal of Environmental Protection*, 6, 146-159. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2015.62017>
- Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (CEIEG). (2021). *Mapas temáticos. Perfiles municipales*. <http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/perfiles/Inicio>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/nom-083.pdf>
- Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Venegas-Sandoval, A., Morales-Iglesias, H., & Hernández-Jiménez, S. (2021). Emisiones generadas por el consumo de leña y carbón en la preparación de comida rápida. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2), e2962. doi: <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2962>
- Esquinca, F., Escobar, J. L., Hernández, A., & Villalobos J. J. (03-07 de noviembre de 1996). Caracterización y generación de los residuos sólidos de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas [Memorias]. *XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Ciudad de México*. <https://docplayer.es/20769887-Characterizacion-y-generacion-de-los-residuos-solidos-de-tuxtla-gutierrez-chiapas.html>
- Ghosh, P., Shah, G., Chandra, R., Sahota, S., Kumar, H., Vijay, V. K., & Thakur, I. S. (2018). Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India. *Bioresource Technology*, 272, 611-615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.069>
- Gray, D., Pollard, S. J. T., Spence, L., Smith, R., & Gronow, J. R. (2005). Spray irrigation of landfill leachate: Estimating potential exposures to workers and bystanders using a modified air box model and generalised source term. *Environmental Pollution*, 133, 587-599. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.06.010>
- Herrera, J., Rojas, J. F., & Anchía, D. (2018). Emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes criterio derivados de diferentes medidas de mitigación en la gestión de residuos sólidos urbanos del cantón de San José, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(1), 94-109. doi: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.52-1.5>
- Ihobe. (2013). *7 metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero*. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial Gobierno Vasco. https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/7metodologias_gei/es_def/adjuntos/7METODOLOGIAS.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2021). *Generación y composición de los residuos sólidos municipales*. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/128/cap3.html>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (INECC-Semarnat). (2012). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/#Tabulados>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). *II Conteo de Población y Vivienda 2005*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2005/#Tabulados>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1997). *Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Workbook volume 2*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2000). *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. <https://www.ipcc.ch/publication/good-practice-guidance-and-uncertainty-management-in-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Kumar, S., Mondal, A. N., Gaikwad, S. A., Devotta, S., & Singh, R. N. (2004). Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study. *Atmospheric Environment*, 38(29), 4921-4929. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.052>

- Plan de Acción Climática Municipal (Pacmun) Benito Juárez. (2018). *Plan de Acción Climática Municipal de Benito Juárez*. <http://implancancun.gob.mx/wp-content/uploads/2018/01/Plan-de-Acci%C3%B3n-Clim%C3%A1tica-Municipal.pdf>
- Plan de Acción Climática Municipal (Pacmun) Cuernavaca. (2018). *Plan de Acción Climática Municipal del H. Ayuntamiento de Cuernavaca*. <https://sustentable.morelos.gob.mx/cc/pacmun>
- Plan de Acción Climática Municipal (Pacmun) Mérida. (2021). *Actualización del Plan de Acción Climática Municipal, Ayuntamiento de Mérida 2018-2021*. <http://www.merida.gob.mx/ecomerida/pacmun.php>
- Plan de Acción Climática Municipal (Pacmun) Puebla. (2013). *Plan de Acción Climática del municipio de Puebla*. <https://www.pueblacapital.gob.mx/images/transparencia/obl/vi-planes/pacmun.pdf>
- Plan de Acción Climática Municipal (Pacmun) Toluca. (2013). *Plan de Acción Climática Municipal de Toluca*. http://uccrnnn.org/wp-content/uploads/2017/06/82_Toluca_2013_Plan-de-Accion-Climitica-Municipal-Toluca.pdf
- Plan de Acción Climática Municipal (Pacmun) Villahermosa. (2016). *Plan de Acción Climática Municipal, Centro, Tabasco*. <http://transparencia.villahermosa.gob.mx/doctos/concluido/2020/acuerdo0246-20-21-R.pdf>
- Plan de Acción Climática Municipal (Pacmun) Xalapa. (2013). *Plan de Acción Climática Municipal de Xalapa de Enríquez, Veracruz*. <http://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/pacmun/>
- Programa de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas (PACCCH). (2011). *Programa de Acción ante el Cambio Climático del estado de Chiapas*. PACCCH. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/316394/PACC_Chiapas-compressed.pdf
- Programa Municipal ante el Cambio Climático (Promacc). (2015). *Programa Municipal ante el Cambio Climático de Tuxtla Gutiérrez*. <http://www.cecropia.org/humana/tuxtla/data/proyectos/promacc/PROMACC.pdf>
- Romero, H. F., Ruetsch, L. G., & Gómez, J. C. (2009). Evaluación de la producción de hidrógeno y metano a partir de datos sobre residuos sólidos domiciliarios de la ciudad de Buenos Aires. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 7-12. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/98617>
- Ruíz-Valdiviezo, V. M., Luna-Guido, M., Galzy, A., Gutiérrez-Miceli, F. A., & Dendooven, L. (2010). Greenhouse gas emissions and C and N mineralization in soils of Chiapas (México) amended with leaves of *Jatropha curcas* L. *Applied Soil Ecology*, 46(1), 17-25. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.06.002>
- Salmerón-Gallardo, Y. A., Cabrera-Cruz, R. B. E., Juárez-López, A. L., Sampedro-Rosas, M. L., Rosas-Acevedo, J. L., & Rolón-Aguilar, J. C. (2017). Emisiones de gases de efecto invernadero en vertederos de residuos sólidos urbanos. Huella de carbono en Acapulco, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4(1), 69-79. <http://www.reibci.org/publicados/2017/feb/2100108.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente e Historia Natural (Semahn). (2019a). *Guía para el manejo adecuado de los RSU y RME*. https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/descargas/residuos_solidos/cuadernillo_rsu.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural (Semahn). (2019b). *Estimación de la generación de residuos sólidos urbanos por municipio en Chiapas*. https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/descargas/residuos_solidos/GeneracionRSUChiapasTabla graficos2019.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave de desempeño ambiental y de crecimiento verde* (Edición 2015). Semarnat. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- Srivastava, A. N., & Chakma, S. (2020). Quantification of landfill gas generation and energy recovery estimation from the municipal solid waste landfill sites of Delhi, India. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1754970>
- Torres-Degró, A. (2017). Tasas de crecimiento poblacional (r): Una mirada desde el modelo lineal, geométrico y exponencial. *CIDE digital*, 2(1), 143-162. <https://revistas.upr.edu/index.php/cidedigital/article/view/11774>
- Urdaneta, J. A., & Sáez, A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73737091009>

- Vera, P., Mendoza, A., & Villalobos, J. J. (2013). Manejo y disposición de los residuos sólidos no peligrosos en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. En P. Vera (ed.), *Estudios ambientales y riesgos naturales: Aportaciones al sureste de México, Volumen III* (pp. 61-90). Editorial UNICACH.
<https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/1375>
- Villalobos, J. J. (1996). *Manejo y disposición final de los residuos sólidos municipales en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).
<https://cd.dgb.uanl.mx/handle/201504211/1642>
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Pearson Educación.