



Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015

México, 2018

Capítulo: Residuos

Contenido

6. Residuos [4]	3
☐ Tabla 1. Emisiones en la categoría de residuos	3
✳ Figura 1. Emisiones de GEI en la categoría de residuos de 1990-2015	4
6.1 [4A] Disposición final de residuos sólidos urbanos	4
☐ Tabla 2. Emisiones de metano en México 1990-2015	5
6.1.1 Aspectos metodológicos	5
6.2 [4B] Tratamiento biológico de residuos sólidos	6
☐ Tabla 3. Emisiones de GEI por el tratamiento biológico de residuos de 1990-2015	7
✳ Figura 2. Emisiones de GEI por el tratamiento biológico de residuos, 1990-2015	7
6.3 [4C] Incineración de residuos peligrosos y quema de residuos a cielo abierto	8
6.3.1 [4C1] Incineración de residuos peligrosos	9
☐ Tabla 4. Emisiones por la incineración de residuos sólidos	9
✳ Figura 3. Emisiones de GEI por fuente de emisión por incineración de residuos peligrosos industriales y biológico-infecciosos, 1994-2015	9
6.3.2 [4C2] Quema de residuos a cielo abierto	10
☐ Tabla 5. Emisiones de GEI por la quema de residuos en viviendas	10
✳ Figura 4. Emisiones de GEI, viviendas habitadas y viviendas que queman residuos	11
✳ Figura 5. Participación de la composición de la quema de residuos en viviendas, 1990 y 2015	11
6.4 [4D] Tratamiento y descarga de aguas residuales	11
☐ Tabla 6. Emisiones por el tratamiento y descarga de aguas residuales, 1990-2015	12
✳ Figura 6. Participación por fuente en las emisiones por tratamiento y descarga de aguas residuales	13
6.4.1 [4D1] Tratamiento y descarga de aguas residuales municipales	13
☐ Tabla 7. Emisiones por proceso de tratamiento en aguas residuales municipales en 2015	14
☐ Tabla 8. Emisiones de GEI por el tratamiento y descarga de aguas residuales municipales	15
✳ Figura 7. Emisiones de GEI por el tratamiento y descarga de aguas residuales municipales, 1990-2015	15
6.4.2 [4D2] Tratamiento y descarga de aguas residuales industriales	16
☐ Tabla 9. Emisiones, número y caudales de PTAR industriales en operación, 2013-2015	17
☐ Tabla 10. Emisiones de aguas tratadas y no tratadas	18
✳ Figura 8. Evolución de emisiones por tratamiento y eliminación de aguas residuales industriales	18
Referencias	19

Residuos [4]

Esta categoría contempla las emisiones del tratamiento y eliminación de residuos. De acuerdo con las directrices del IPCC 2006, las fuentes incluyen la disposición final de residuos sólidos urbanos [4A], el tratamiento biológico de residuos sólidos [4B], la incineración de residuos peligrosos industriales y biológico-infecciosos, la quema a cielo abierto de residuos [4C] y el tratamiento y descargas de aguas residuales [4D].

En los sitios de disposición final y en el tratamiento de aguas residuales se generan principalmente: metano (CH_4), debido a la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas; dióxido de carbono (CO_2), en la incineración de residuos y en la quema a cielo abierto de residuos que contienen carbono fósil, como los plásticos, y óxido nitroso (N_2O), que varía según las condiciones del tipo de tratamiento de aguas residuales.

La categoría de residuos contribuyó con 6.7% al total de emisiones del inventario en 2015. Las emisiones de GEI (**Tabla 1**) derivadas de los residuos se incrementaron 265.8%, pasando de 12,550.11 Gg de CO_{2e} en 1990 a 45,909.01 Gg de CO_{2e} en 2015 (**Figura 1**) con una tasa de crecimiento media anual (TCMA) de 5.3% para este periodo.

Tabla 1. Emisiones en la categoría de residuos
Gg de CO_{2e}

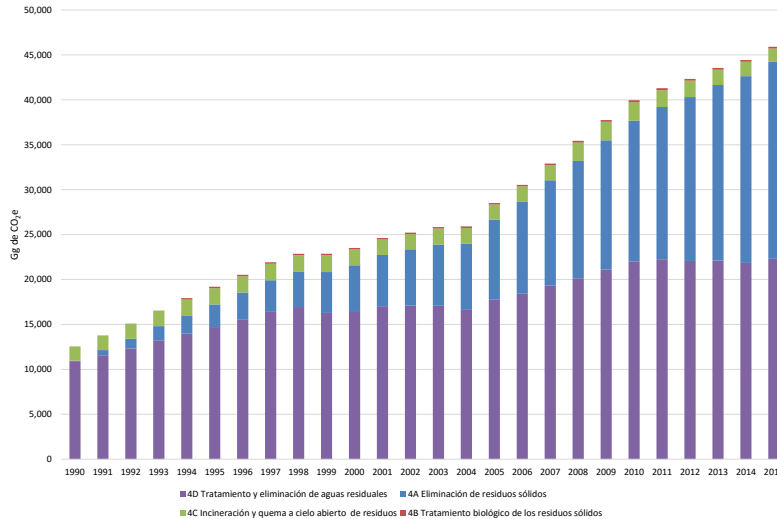
Subcategoría	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
4A Disposición final de residuos sólidos urbanos	129.67	2,518.36	5,091.46	8,899.39	15,640.21	16,945.89	18,241.54	19,540.02	20,779.81	21,920.61
4B Tratamiento biológico de residuos sólidos	-	163.28	163.29	167.50	208.40	213.44	199.46	199.51	199.46	199.51
4C Incineración y quema de residuos a cielo abierto	1,588.60	1,803.62	1,778.68	1,689.50	2,070.14	1,877.10	1,817.96	1,706.16	1,604.99	1,487.15
4D Tratamiento y descargas de aguas residuales	10,831.83	14,706.15	16,482.94	17,757.61	22,029.59	22,253.37	22,067.99	22,107.23	21,850.96	22,301.74
Total	12,550.11	19,191.40	23,516.37	28,514.00	39,948.34	41,289.80	42,326.95	43,552.92	44,435.22	45,909.01

Las principales emisiones en esta categoría de residuos provienen del tratamiento y descargas de aguas residuales, con una participación de 48.6 por ciento. Les siguen las emisiones provenientes de la disposición final de residuos, con una participación de 47.7%, las emisiones de incineración y quema de residuos a cielo abierto, con 3.2%, y finalmente el tratamiento biológico con 0.4 por ciento.

Por tipo de gas, las principales emisiones en 2015 en la categoría de residuos fueron por CH_4 , con una aportación de 43,093.23 Gg de CO_{2e} ($\pm 2.91\%$), que representa 93.9% de las emisiones totales de la categoría, proveniente principalmente de la disposición final y las aguas residuales. La segunda aportación corresponde a las emisiones de N_2O , con 2,085.57 Gg de CO_{2e} ($\pm 2,232.83\%$), que representa 4.5% de las emisiones de la categoría,

provenientes principalmente de aguas residuales. Finalmente, las emisiones de CO₂ en 2015 fueron de 730.23 Gg ($\pm 95.48\%$), que representaron el 4.5% restante, provenientes de la incineración y quema de residuos a cielo abierto.

Figura 1. Emisiones de GEI en la categoría de residuos de 1990-2015



6.1 [4A] Disposición final de residuos sólidos urbanos

La disposición final de residuos sólidos urbanos se refiere a su depósito o confinamiento permanente en sitios de disposición final (SDF). Para fines de la contabilidad de GEI, en México se consideran tres tipos de SDF:

1. Rellenos sanitarios que constituyen una infraestructura en la que se involucran métodos y obras de ingeniería que básicamente controlan la fuga de lixiviados y la generación de biogás (SEMARNAT, 2012) y que están regidos por la norma NOM-183-SEMARNAT-2003;
2. sitios controlados que tienen cierto nivel de ingeniería sin llegar a contar con los estipulado por la NOM-183, y
3. sitios no controlados o tiraderos a cielo abierto, que son lugares carentes de ingeniería y que habitualmente representan focos de infección y generan problemas ambientales como contaminación de mantos freáticos y suelos.

Cuando los residuos sólidos municipales se depositan por primera vez en un SDF, se desarrolla un proceso de descomposición aeróbica (en presencia de oxígeno); en esta etapa se genera poco metano. Posteriormente, en condiciones anaeróbicas, las bacterias productoras de metano comienzan a establecerse y ese gas se produce a un ritmo estable, por lo general durante 20 años (EPA, 2017).

El metano ocupa el segundo lugar como el GEI más abundante y representa 14% de las emisiones mundiales (“Emisiones mundiales de metano y oportunidades de atenuación,” 2010). Aunque emitido a la atmósfera en cantidades menores que las del dióxido de carbono, su potencial para el calentamiento global es 28 veces mayor.

En México se ha observado un incremento considerable de las emisiones de metano para esta categoría. En 1990 se estimó una emisión de 129.6 Gg de CO_{2e}, mientras que para 2015 se estimaron 21,920.6 Gg de CO_{2e}, siendo esta última cifra aproximadamente 169 veces mayor con respecto a la de 1990; lo anterior representa que las emisiones tuvieron una TCMA del 22.8% (ver **Tabla 2**).

Esta tendencia puede deberse principalmente al incremento de rellenos sanitarios y del incremento en las cantidades de residuos que se disponen en los SDF, atribuible principalmente a cambios en los hábitos de consumo de la población, que provocan una mayor generación de residuos.

Tabla 2. Emisiones de metano en México 1990-2015
Emisiones de metano por la eliminación de residuos sólidos (Gg CO_{2e})

Año	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
CH ₄	129.6	2,518.3	5,091.4	8,899.3	15,640.2	16,945.8	18,241.5	19,540.0	20,779.8	21,920.6

6.1.1 Aspectos metodológicos

Para estimar el metano generado en los SDF se utilizó la metodología de las Directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) 2006, volumen 5. En este método se formula la hipótesis de que el componente orgánico degradable de los desechos se descompone lentamente a lo largo de unas décadas formando metano (IPCC *et al.*, 2006). Esta metodología requiere de las velocidades de biodegradación de los residuos depositados en los SDF, así como datos sobre la composición de los residuos para los 31 estados de la República y la Ciudad de México, propuestos en el Modelo Mexicano de Biogás (MMB) versión 2.0, ya que el modelo considera las condiciones climáticas específicas del país y brinda mayor precisión a las estimaciones (Ludwing, 2009). La generación de metano en los SDF depende de la cantidad de carbono degradable presente en cada tipo de residuo y decae a medida que ese carbono es consumido por las bacterias responsables de la descomposición. Dado que es necesario conocer la masa de residuos dispuestos en los SDF, se consultó a los gobiernos estatales y los Programas Estatales para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos para estimar la masa de residuos dispuestos durante 2015 en los diferentes tipos de SDF. En la presente estimación, los residuos se clasificaron en seis categorías: residuos de comida, jardinería, papel, madera y paja, textiles y pañales. Cada SDF se clasificó

según su tipo de gestión (relleno sanitario, sitio controlado o no controlado), lo que permitió asignar un valor al factor de corrección de metano (FCM) para cada tipo de SDF.

En este contexto la información inicial para el cálculo de GEI en los SDF consistió en la masa total dispuesta en cada uno de los 2,637 SDF del país durante 2015, el tipo de gestión y el año de inicio de operaciones de cada SDF y la composición estatal de residuos.

Se realizó una estimación de la serie histórica de la masa de residuos dispuestos en años anteriores a 2015 (1990 a 2014). Una vez que la serie histórica de la masa de residuos dispuestos fue completada, se determinó el carbono orgánico degradable disuelto (CODD_{m_j}) contenido en cada categoría de residuo (j), es decir el carbono que se degrada en condiciones anaeróbicas. Posteriormente se determinó el CODD_{ma_i}, el cual contempla el acumulado del CODD_{m_j} en el año i, esto quiere decir que a la cifra obtenida en el año i se le suma lo correspondiente al año anterior. Para ello se tomaron las tasas de biodegradación determinadas por el Modelo Mexicano de Biogás, mismas que consideran cinco regiones climáticas en México y cuatro constantes de degradación clasificadas de la siguiente manera: degradación de residuos muy rápida (alimentos y 20% de los pañales); degradación de residuos moderadamente rápida (residuos de jardinería y papel higiénico); degradación de residuos moderadamente lenta (papel, cartón y textiles), y degradación de residuos muy lenta (madera, caucho, piel, huesos y paja). Finalmente, para determinar la cantidad de metano generado se multiplicó el material en descomposición por el cociente de pesos moleculares de metano y carbono.

Finalmente se sumó el metano generado por cada categoría de residuos y se obtuvo el metano total generado. El procedimiento detallado y las constantes utilizadas se desglosan en el **Anexo E, sección 4A**.

6.2 [4B] Tratamiento biológico de residuos sólidos

El tratamiento biológico de residuos sólidos considera el proceso para la producción de composta (abono orgánico) y la digestión anaeróbica de residuos orgánicos como los de alimentos, jardines y parques, y los de lodos de aguas residuales. Entre las ventajas del tratamiento biológico se incluye el volumen reducido de los materiales de residuos, la estabilización de éstos, la destrucción de los agentes patógenos en el material de desecho y la producción de biogás como energético. Los productos finales del tratamiento biológico pueden reciclarse, según su calidad, como mejoradores de suelos u abono orgánico, o bien disponerse en los SDF.

La fabricación de composta es un proceso aeróbico y, por ello, una fracción grande del carbono orgánico degradable (COD) de los materiales de desecho se convierte en CO₂. El CH₄ se forma en las secciones anaeróbicas de la composta, pero una gran proporción se

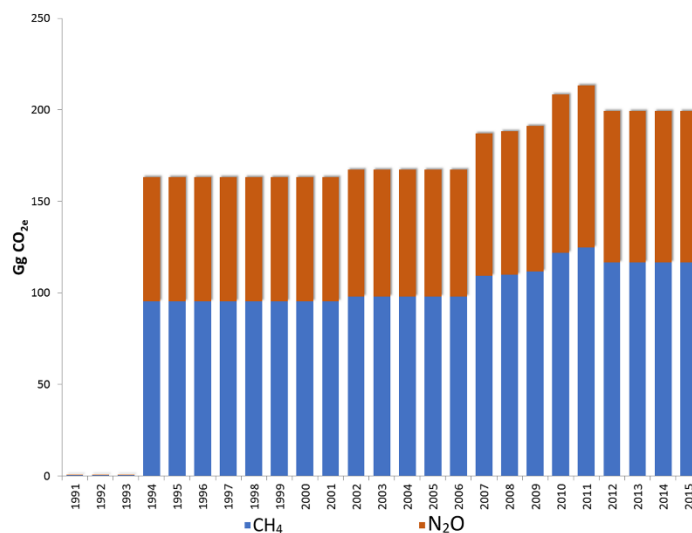
oxida en las secciones aeróbicas del abono. Se estima que el CH₄ liberado a la atmósfera varía entre menos del 1% del contenido de carbono inicial del material (IPCC *et al.*, 2006).

En 2015 las emisiones por el tratamiento biológico de residuos sólidos fueron de 199.5 Gg de CO_{2e} (± 72.48 %). De esta cifra, 58.5% corresponde a emisiones de CH₄ y 41.5% a emisiones de N₂O. Las emisiones de 1991 a 2015 presentaron un incremento 367 veces mayor, al pasar de 0.55 a 199.5 Gg de CO_{2e} con una TCMA de 28% para este periodo; esto fue debido a un incremento en el volumen de residuos sólidos llevados a compostaje.

Tabla 3. Emisiones de GEI por el tratamiento biológico de residuos de 1990-2015

Año	Gg de CO _{2e}		
	CH ₄	N ₂ O	Total
1990	-	-	-
1995	95.50	67.78	163.28
2000	95.50	67.79	163.29
2005	97.96	69.53	167.50
2006	97.96	69.53	167.50
2007	109.41	77.66	187.08
2008	110.10	78.15	188.25
2009	111.82	79.37	191.19
2010	121.88	86.51	208.40
2011	124.83	88.61	213.44
2012	116.65	82.80	199.46
2013	116.69	82.83	199.51
2014	116.66	82.81	199.46
2015	116.69	82.83	199.51

Figura 2. Emisiones de GEI por el tratamiento biológico de residuos, 1990-2015



La estimación de las emisiones de CH₄ y N₂O procedentes del tratamiento biológico de residuos sólidos se realizó con base en la metodología del IPCC 2006, volumen 5, capítulo 4; el enfoque de la estimación es bajo un nivel 1 empleando factores de emisión por defecto. Los datos de actividad fueron el volumen de la capacidad instalada en las diferentes plantas de compostaje para los años 1991 a 2015 y las fechas de inicio de operaciones de las mismas (ver **Tabla 1, Anexo D**).

6.3 [4C] Incineración de residuos peligrosos y quema de residuos a cielo abierto

La incineración considerada en este apartado se refiere como eliminación por la combustión de los residuos peligrosos industriales y biológico-infecciosos en instalaciones y condiciones controladas. La información se obtuvo de empresas autorizadas por SEMARNAT para la incineración de residuos peligrosos (rubro 6, residuos biológico-infecciosos, y rubro 12, peligrosos industriales (SEMARNAT, 2015).

Los incineradores modernos de residuos peligrosos poseen grandes chimeneas y cámaras de combustión especialmente diseñadas para producir altas temperaturas de combustión, tiempos largos de residencia y agitación eficiente de los residuos al tiempo que introducen aire para una combustión más completa. Los incineradores generan CO₂, CH₄ y N₂O por este proceso. La metodología empleada para el cálculo de las emisiones se puede consultar en el **Anexo E, sección 4C**.

La quema de residuos urbanos a cielo abierto puede definirse como la combustión, al aire libre, de materiales no deseados, tales como papel, madera, plástico, textiles, caucho, aceites y otros residuos. Generalmente se lleva a cabo en sitios de disposición final no controlados o como una práctica en traspatios de casas en algunas zonas rurales, donde las emisiones se liberan directamente a la atmósfera sin pasar por una chimenea o columna. Para el inventario 2015 se consideraron los datos de residuos quemados en viviendas particulares habitadas (INEGI, 1990, 1995, 2000, 2005, 2013) y los quemados en sitios de disposición final de residuos sólidos sólo para 2015.

En 2015 las emisiones de la subcategoría por la incineración de residuos peligrosos y quema de residuos a cielo abierto fue de 1,487 Gg de CO_{2e} (± 62.73%). Del total de emisiones de esta subcategoría, 98% corresponde a las emisiones por quema a cielo abierto y 2% a las emisiones por incineración. Las emisiones del periodo 1990-2015 tuvieron una TCMA negativa de 0.3% al pasar de 1,588 a 1,487 Gg de CO_{2e}.

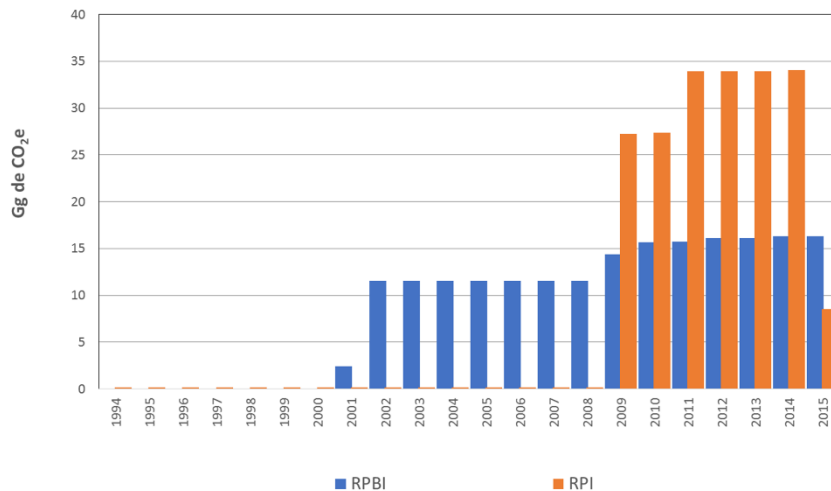
6.3.1 [4C1] Incineración de residuos peligrosos

Las emisiones por incineración de residuos en 2015 fueron de 24.85 Gg de CO_{2e} (± 17.90 %), equivalentes a 0.1% de las emisiones de la categoría. Esta fuente de emisión se compone por la incineración de residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI) y residuos peligrosos industriales (RPI). En el periodo 1994-2015, las emisiones aumentaron 174 veces, de 0.14 a 24.85 GgCO_{2e}, con una TCMA de 29 por ciento.

Tabla 4. Emisiones por la incineración de residuos solidos
Gg de CO_{2e}

Año	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
1990	-	-	-	-
1995	0.14	-	-	0.14
2000	0.14	-	-	0.14
2005	10.90	0.08	0.73	11.70
2006	10.90	0.08	0.73	11.70
2007	10.90	0.08	0.73	11.70
2008	10.90	0.08	0.73	11.70
2009	40.60	0.09	0.90	41.60
2010	41.99	0.10	0.99	43.08
2011	48.56	0.10	0.99	49.65
2012	48.92	0.11	1.01	50.04
2013	48.92	0.11	1.01	50.04
2014	49.28	0.11	1.02	50.41
2015	23.72	0.11	1.03	24.85

Figura 3. Emisiones de GEI por fuente de emisión por incineración de residuos peligrosos industriales y biológico-infecciosos, 1994-2015



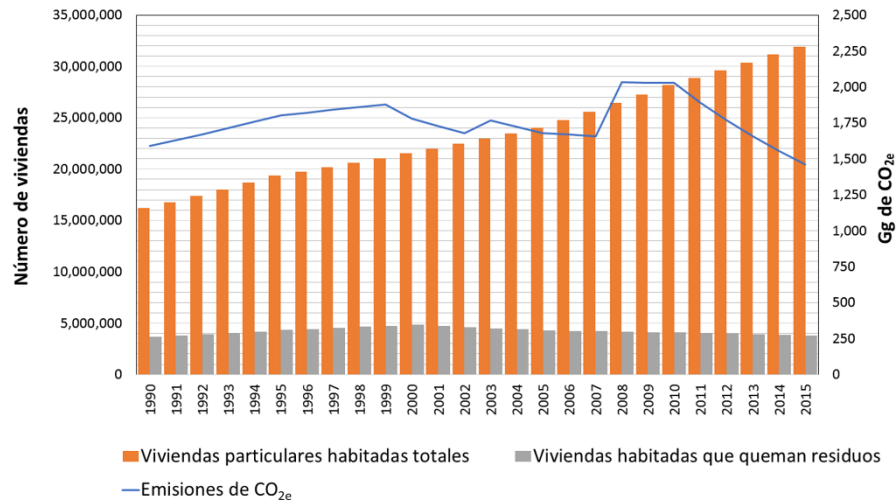
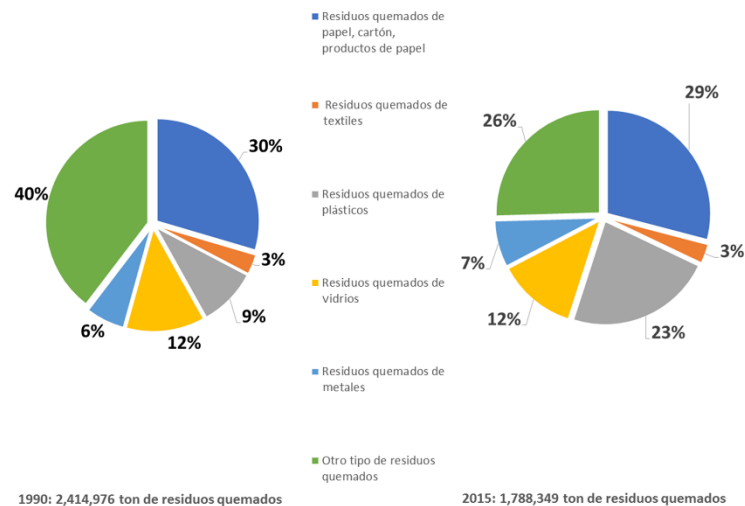
La metodología empleada para el cálculo de las emisiones fue IPCC 2006, con factores de emisión por defecto bajo un nivel 1. Para el caso de los datos de actividad se utilizaron los volúmenes de residuos incinerados, obtenidos a partir de información de la capacidad instalada para las empresas autorizadas por SEMARNAT bajo los rubros 6 “empresas autorizadas para la incineración de RPBI” y 12 “empresas autorizadas para la incineración de RPI” (SEMARNAT, 2015). Para la estimación de los residuos incinerados (de acuerdo con datos de las Cédulas de Operación Anual 2013) se consideró 50% del volumen de la capacidad instalada de las incineradoras autorizadas (para mayor detalle ver **Tabla 2, Anexo D**).

6.3.2 [4C2] Quema de residuos a cielo abierto

En 2015, las emisiones por quema de residuos a cielo abierto fueron de 1,462 Gg de CO_{2e} (±63.79%), equivalentes a 3.2% de las emisiones totales de esta categoría. Esta fuente de emisión se compone por la quema de residuos en viviendas y aquellos quemados en sitios de disposición final como medio de eliminación, en el periodo 1990-2015. Las emisiones tuvieron un decremento de 126 Gg de CO_{2e} con una TCMA negativa de 0.3% al pasar de 1,588.6 a 1,462.3 Gg de CO_{2e}.

Tabla 5. Emisiones de GEI por la quema de residuos en viviendas
Gg de CO_{2e}

Año	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
1990	463.5	923.5	201.7	1,588.6
1995	526.1	1,048.4	229.0	1,803.5
2000	553.3	1,005.6	219.6	1,778.5
2005	618.7	869.3	189.9	1,677.8
2006	616.0	865.1	188.9	1,670.1
2007	608.6	860.3	187.9	1,656.8
2008	982.8	862.9	188.5	2,034.2
2009	980.6	861.0	188.1	2,029.7
2010	979.4	859.9	187.8	2,027.1
2011	913.7	802.2	175.2	1,891.1
2012	854.2	750.0	163.8	1,767.9
2013	800.2	702.5	153.4	1,656.1
2014	751.1	659.5	144.0	1,554.6
2015	706.5	620.3	135.5	1,462.3

Figura 4. Emisiones de GEI, viviendas habitadas y viviendas que queman residuos**Figura 5.** Participación de la composición de la quema de residuos en viviendas, 1990 y 2015

Para la cuantificación de las emisiones sólo se contemplan, según el IPCC, aquellos residuos que contengan carbono fósil, y se excluyen biogénicos como son residuos de jardinería y alimentos (IPCC *et al.*, 2006).

6.4 [4D] Tratamiento y descarga de aguas residuales

Las aguas residuales son fuente de metano (CH₄) cuando se las trata o descarga en medio anaeróbico. También pueden ser una fuente de emisiones de óxido nitroso (N₂O). Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) procedentes de aguas residuales no se consideran en este inventario porque son biogénicas y no deben incluirse en el total nacional de emisiones. Las aguas residuales se originan en una variedad de fuentes municipales, comerciales

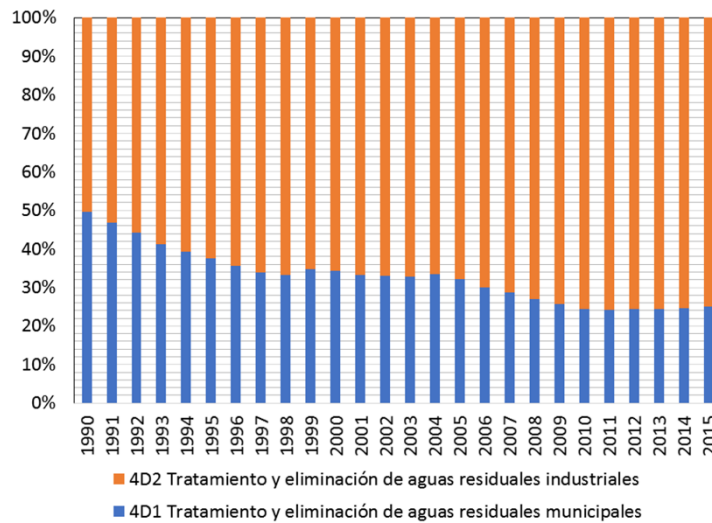
e industriales y pueden tratarse *in situ* (no recolectadas), transportarse por drenaje a una planta de tratamiento (recolectadas), o descargarse sin tratamiento a cuerpos de aguas (IPCC *et al.*, 2006). Para fines de este inventario en particular para aguas residuales municipales se cuantificaron las emisiones de las colectadas en alcantarillado, que en 2015 alcanzaron 92 por ciento.

Las aguas residuales municipales provienen de aguas utilizadas en los hogares (para fines de limpieza, cocina, baños o regaderas), mientras que las aguas residuales industriales derivan de las prácticas de procesos de transformación o uso industrial. Los sistemas de tratamiento son distintos tipos, según el origen del agua residual; la diferencia primordial entre ellos depende de si se aplican en un medio aeróbico o uno anaeróbico, pues de ello depende la generación de metano, que es mayor en los sistemas anaerobios.

En 2015 las emisiones totales de la subcategoría 4D fueron 22,302 Gg de CO_{2e} (\pm 208.84%), equivalentes a 48.6% de las emisiones totales de esta categoría en la que las aguas residuales industriales contribuyeron con 36.4% y las aguas residuales municipales con 12.2 por ciento. Por tipo de GEI, las emisiones de CH₄ contribuyen, en promedio, con 91.6% de las emisiones, mientras que el restante 8.4% corresponde a emisiones de N₂O. Las emisiones del periodo entre 1990 y 2015 se duplicaron al pasar de 10,832 a 22,301 Gg de CO_{2e} con una TCMA de 2.9 por ciento.

Tabla 6. Emisiones por el tratamiento y descarga de aguas residuales, 1990-2015
Gg de CO_{2e}

Año	4D1 Aguas residuales municipales	4D2 Aguas residuales industriales	Total
1990	5,372	5,460	10,832
1995	5,506	9,200	14,706
2000	5,648	10,835	16,483
2005	5,721	12,037	17,758
2010	5,372	16,658	22,030
2011	5,394	16,859	22,253
2012	5,379	16,689	22,068
2013	5,396	16,711	22,107
2014	5,401	16,450	21,851
2015	5,592	16,709	22,301

Figura 6. Participación por fuente en las emisiones por tratamiento y descarga de aguas residuales

6.4.1 [4D1] Tratamiento y descarga de aguas residuales municipales

Las emisiones atribuibles a aguas residuales municipales incluyen las de metano generadas por procesos de tratamiento y descarga de aguas residuales colectadas en México; en 2015 se estimaron con información de los caudales y procesos de las 2,477 plantas de tratamiento de aguas residuales que hay en el país (CONAGUA, 2015b). Según CONAGUA, durante 2015 se produjeron 10,977,681,600 m³ de agua y de ese volumen se generaron 6,768,887,040 m³ de aguas residuales colectadas en alcantarillado; este valor representa en promedio 91.4% de cobertura del alcantarillado de aguas residuales municipales en el país y una cobertura de tratamiento de 57 por ciento.

En 2015, según la información proporcionada por CONAGUA, se aplicaron alrededor de 26 procesos de tratamiento de agua residual municipal (**Tabla 7**). El volumen total de aguas tratadas durante ese año fue de 3,815,673,432 m³, y las emisiones por el tratamiento y descarga de aguas residuales municipales fue de 5,592 Gg de CO_{2e} (± 832.69%), equivalente a 12.2% de las emisiones totales del sector.

Del total de emisiones, 64% corresponde a aguas no tratadas y 34% a emisiones por tratamiento. En el periodo 1990-2015, las emisiones pasaron de 5,372 a 5,592 Gg de CO_{2e} con una TCMA fue de 0.2 por ciento. Por tipo de GEI, las emisiones de metano representaron 67%, mientras que el óxido nitroso representó 33 por ciento. La incertidumbre por tipo de GEI fue de ±7.63% para CH₄ y ±2,495.23 para las emisiones de N₂O; estos valores resultan del factor de emisión del intervalo [0.0005-0.25] (IPCC 2006) y de la **Ecuación 1**.

Ecuación 1

$$U = \frac{L_{SUP} - L_{INF}}{2 \times FE_{PROMEDIO}}$$

Donde:

U= Incertidumbre.

L_{SUP}= Límite superior.L_{INF}= Límite inferior.FE_{PROMEDIO}= Factor de emisión por defecto.

En la **Tabla 7** se muestran las emisiones por tipo de tratamiento así como la cobertura de cada una. Se observa que el proceso de tratamiento de lodos activados es el más frecuente (55.5%), seguido por el de lagunas de estabilización (11.7%) y duales (11.6%).

Tabla 7. Emisiones por proceso de tratamiento en aguas residuales municipales en 2015

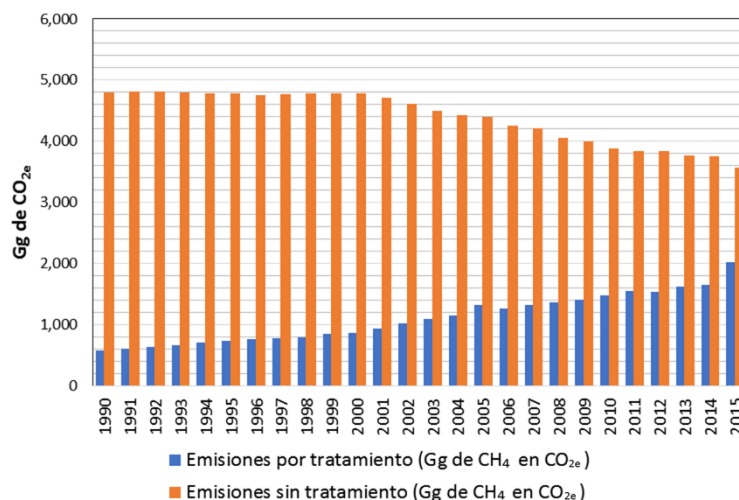
Proceso de tratamiento	Gg de CO _{2e}	% de cobertura
Aerobio	0.7	0.1%
Anaerobio	34.6	0.5%
Biológico	13.4	0.6%
Discos biológicos o biodiscos	10.1	0.7%
Dual	492.0	11.6%
Filtros biológicos o rociadores o percoladores	92.0	4.4%
Fosa séptica + filtro biológico	2.2	0.0%
Fosa séptica + <i>wetland</i>	13.4	0.1%
Humedales (<i>wetland</i>)	16.7	0.4%
Lagunas aireadas	84.1	6.0%
Lagunas de estabilización	245.1	11.7%
Lodos activados	745.8	55.5%
Otro	4.6	0.1%
Primario avanzado	50.2	3.6%
Primario o sedimentación	36.6	1.3%
RAFA* + filtro biológico	24.2	0.4%
RAFA	86.5	1.3%
RAFA + humedal	11.6	0.2%
Reactor enzimático	1.6	0.1%
Sedimentación + <i>wetland</i>	0.9	0.0%
Tanque Imhoff	19.0	0.3%
Tanque Imhoff + filtro biológico	5.8	0.1%
Tanque Imhoff + <i>wetland</i>	0.4	0.0%
Tanque séptico o fosa séptica	9.8	0.1%
Terciario	0.4	0.2%
Zanjas de oxidación	22.3	0.8%
Total	2,023.97	100%

* Reactor aerobio de flujo ascendente, o UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).

En la **Tabla 8** se muestran las emisiones por tipo de GEI para aguas residuales recolectadas tratadas y no tratadas.

Tabla 8. Emisiones de GEI por el tratamiento y descarga de aguas residuales municipales
Gg de CO_{2e}

Año	CH ₄		N ₂ O	Total
	Con tratamiento	Sin tratamiento	Sin tratamiento	
1990	572	3,709	1,091	5,372
1995	730	3,554	1,222	5,506
2000	865	3,316	1,468	5,648
2005	1,320	2,824	1,577	5,721
2006	1,263	2,658	1,595	5,516
2007	1,323	2,593	1,615	5,532
2008	1,367	2,439	1,619	5,424
2009	1,412	2,373	1,623	5,408
2010	1,485	2,244	1,643	5,372
2011	1,556	2,175	1,663	5,394
2012	1,540	2,086	1,752	5,379
2013	1,625	1,987	1,784	5,396
2014	1,652	1,907	1,843	5,401
2015	2,024	1,702	1,866	5,592

Figura 7. Emisiones de GEI por el tratamiento y descarga de aguas residuales municipales, 1990-2015

En el método para calcular las emisiones (IPCC *et al.*, 2006) se emplearon parámetros por defecto para los factores de emisión, como son la capacidad máxima de producción de metano y el factor de corrección de metano, tanto para aguas tratadas como para no tratadas (ver **Anexo E**). En el caso de los datos de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) se empleó información nacional de los años 2004 a 2015 (CONAGUA, 2015a); los de años anteriores se estimaron.

6.4.2 [4D2] Tratamiento y descarga de aguas residuales industriales

Para los fines de este inventario, las emisiones resultantes del tratamiento y eliminación de aguas residuales industriales incluyen a las de metano generadas en los procesos de producción de los giros siguientes: alimenticio; bebidas alcohólicas y no alcohólicas; beneficio del café; celulosa y papel; industria cervecera; ingenios azucareros; jabón y detergentes; petrolero; plásticos y resinas, y sustancias químicas orgánicas. Estos giros se homologaron según las metodologías del IPCC (IPCC *et al.*, 2006) y, a partir de información proporcionada por CONAGUA, se discriminó por actividad industrial y sólo se seleccionaron aquellos giros que IPCC considera fuentes clave de generación de GEI.

Para 2015 se contó con información de los caudales de 1,020 plantas que, en conjunto, trataron 1,405,283,879 m³. Los tipos de tratamiento se clasifican en primario, secundario y terciario. En los casos de plantas que se refieren a sus procesos de tratamiento como “no especificado”, en el cálculo de las emisiones se consideró un promedio de los factores de emisión para tratamientos primario y secundario (CONAGUA, 2015b).

Los valores de volúmenes de agua residual no tratada se tomaron de los datos de CONAGUA en el portal Sistema Nacional de Información del Agua (CONAGUA, 2015a), que para 2015 reportó que de los 6,769,745,600 m³ generados de aguas residuales industriales, se trató sólo 33%; el 67% restante (4,546,175,600 m³) no fue tratado.

En 2015 las emisiones por el tratamiento y descarga de aguas residuales industriales fueron 16,709 Gg de CO_{2e} con una incertidumbre ± 5.18 por ciento; de estas emisiones, 75% corresponde a aguas no tratadas. La TCMA fue 2.9% y, en 2015, su contribución al total de las emisiones de la subcategoría fue de 48.6 por ciento.

En la **Tabla 9** se muestran las emisiones, el número de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y el caudal de operación de los principales giros industriales entre 2013 y 2015. En ese mismo lapso, el giro alimenticio representó, en promedio, 43% de las emisiones totales por tratamiento de aguas residuales industriales seguido de sustancias químicas orgánicas (24.6%), petrolero (14.4%) e ingenios azucareros (10.5%). El resto contribuyó con 7.5 por ciento.

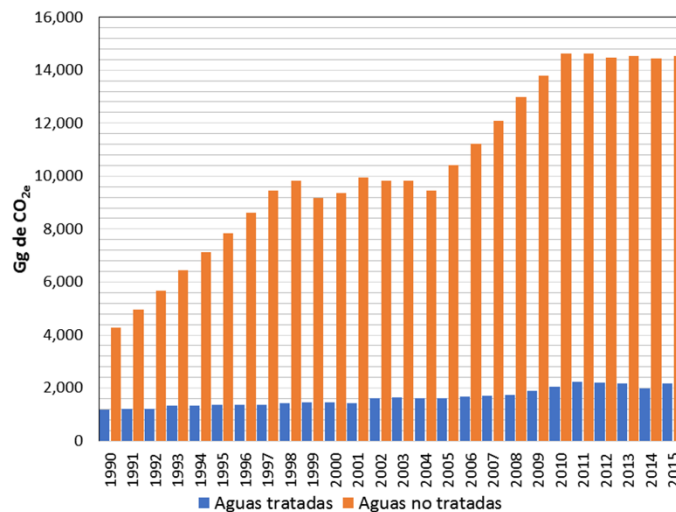
Tabla 9. Emisiones, número y caudales de PTAR industriales en operación, 2013-2015

Giro	Emisiones (Gg de CO _{2e})	Número de PTAR en operación	Caudal en operación (m ³)
2013			
Alimenticio	995	866	645,397,984
Bebidas alcohólicas	38	36	2,994,045
Bebidas no alcohólicas	64	85	39,473,513
Beneficio del café	14	34	4,504,996
Celulosa y papel	27	49	61,297,170
Cervecera	30	11	16,906,301
Ingenios azucareros	227	51	307,078,900
Jabón y detergentes	0	1	252,288
Petrolero	253	311	135,271,212
Plásticos y resinas	9	23	1,626,430
Sustancias químicas orgánicas	521	53	101,547,666
2014			
Alimenticio	785	437	504,985,923
Bebidas alcohólicas	37	30	3,004,767
Bebidas no alcohólicas	38	75	24,164,835
Beneficio del café	15	22	5,543,918
Celulosa y papel	30	47	62,496,484
Cervecera	32	11	16,906,301
Ingenios azucareros	209	46	341,299,875
Jabón y detergentes	0	1	252,288
Petrolero	334	243	175,337,166
Plásticos y resinas	6	19	1,405,745
Sustancias químicas orgánicas	515	52	101,461,793
2015			
Alimenticio	951	466	654,607,059
Bebidas alcohólicas	20	33	1,798,074
Bebidas no alcohólicas	31	79	19,758,459
Beneficio del café	12	20	4,490,027
Celulosa y papel	29	48	61,528,390
Cervecera	37	11	19,512,468
Ingenios azucareros	231	50	372,246,938
Jabón y detergentes	0	1	252,288
Petrolero	319	242	165,497,336
Plásticos y resinas	6	20	1,286,299
Sustancias químicas orgánicas	524	49	104,306,541

En la serie histórica 1990-2012, al no contar con información desagregada por giro industrial y planta de tratamiento, el método para la estimación de emisiones fue la superposición parcial del IPCC (los datos agregados, *Top down*, bajo un nivel 1, se ajustan con la serie de datos desagregados). Es importante destacar que muchos de los parámetros empleados en la estimación de emisiones agregadas fueron lo más cercano posible a los empleados en la serie 2013-2015.

Tabla 10. Emisiones de aguas tratadas y no tratadas
Gg de CO_{2e}

Año	Aguas tratadas	Aguas no tratadas	Total
1990	1,184.42	4,276	5,460.28
1995	1,358.99	7,841	9,200.02
2000	1,460.36	9,374	10,834.76
2005	1,617.20	10,420	12,036.73
2006	1,672.74	11,229	12,901.63
2007	1,712.32	12,095	13,807.21
2008	1,734.30	12,978	14,711.82
2009	1,903.13	13,798	15,701.16
2010	2,041.69	14,616	16,657.69
2011	2,242.89	14,616	16,858.89
2012	2,207.72	14,482	16,689.32
2013	2,179	14,532	16,710.93
2014	2,002	14,448	16,450.16
2015	2,161	14,549	16,709.30

Figura 8. Evolución de emisiones por tratamiento y eliminación de aguas residuales industriales

La metodología para el cálculo de emisiones se basó sobre IPCC 2006. Se emplearon parámetros por defecto para el cálculo de los factores de emisión como son la capacidad máxima de producción de metano y el factor de corrección de metano tanto para aguas tratadas como para no tratadas. En el caso de los datos de la demanda química de oxígeno (DQO) se emplearon datos proporcionados de CONAGUA, así como para el porcentaje de eficiencia de remoción de lodos para los giros alimenticio, bebidas alcohólicas y no alcohólicas, beneficio del café, celulosa y papel, cervecera, ingenios azucareros, jabón y

detergentes y petrolero; para el resto de los giros se emplearon parámetros por defecto del IPCC.

Referencias

- Christian, T., R. Yokelson, B. Cárdenas, L. Molina, G. E. y S. H. (2010). Trace gas and particle emissions from domestic and industrial biofuel use and garbage burning in central Mexico. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- CONAGUA. (2015a). Sistema Nacional de Información del Agua. Retrieved from <http://sina.conagua.gob.mx/sina/>
- CONAGUA. (2015b). *Volúmenes de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales (Información proporcionada vía oficio)*.
- CONAPO. (2017). *Proyecciones de la población 2010-2050*. Retrieved from <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>
- Emisiones Mundiales de Metano y Oportunidades de Atenuación. (2010), 1–4.
- EPA. (2017). *Landfill Methane Outreach Program (LMOP). Chapter 1, Landfill Gas Energy Basics 2017*. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/production/files/201607/documents/pdh_chapter1.pdf
- FAOSTAT. (2017). *FAO-Food Security Indicators*. Retrieved from <http://www.fao.org/economic/ess/ess-fs/indicadores-de-la-seguridad-alimentaria/es/#.Wo74cYPOW70>
- INEGI. (1990). *Censo de Población y Vivienda 1990*. Retrieved from <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/1990/>
- INEGI. (1995). *Censo de Población y Vivienda 1995*. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/conteos/conteo95/Viviendas.asp?s=est&c=11886&proy=cpv00_viviendas
- INEGI. (2000). *Censo de Población y Vivienda 2000*. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/censos/cpv2000/Viviendas.asp?s=est&c=10259&proy=cpv00_viviendas
- INEGI. (2005). *Censo de Población y Vivienda 2005*. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/conteos/conteo2005/Viviendas.asp?s=est&c=17357&proy=cpv05_viviendas
- INEGI. (2013). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Retrieved from <http://www.beta.inegi.org.mx/datos/?init=2>
- IPCC, Eggleston, S., Buendía, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5, Waste, 5.
- Ludwing. (2009). *Landfill Methane Outreach Program. Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás. Versión 2.0*. Washington, D.C.
- SEMARNAT. (2012). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, Compendio de Estadísticas Ambientales Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental, edición 2012*.
- SEMARNAT, S. de. (2015). Empresas autorizadas para el manejo de residuos peligrosos. Retrieved from <https://www.gob.mx/SEMARNAT/documentos/empresas-autorizadas-para-el-manejo-de-residuos-peligrosos>.