



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGIA**

**Estimación de las emisiones de gases de efecto
invernadero (Metano) por las plantas de tratamiento
de aguas residuales en la ciudad de México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B i o l o g o

P R E S E N T A:

Raul Robles Cedillo

JURADO DE EXAMEN

**DIRECTOR: DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES
ASESOR: M. EN C. GERMAN CALVA VAZQUEZ
ASESOR: DR. SALVADOR JUSTO HERNANDEZ AVILES
SINODAL: MTRA. MARICELA ARTEAGA MEJÍA
SINODAL: M. EN C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS**



CIUDAD DE MÉXICO

MAYO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Dr. Adalberto Noyola Robles, quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de cada una de las etapas de este proyecto.

A mis Asesores M en C German Calva Vázquez y Dr. Salvador Justo Hernández Avilés por su apoyo para lograr este objetivo y conocimiento transmitido

A mis sinodales Mtra. Maricela Arteaga Mejía y M en C. Eliseo Cantellano de Rosas por el tiempo dedicado

A la UNAM por brindarme las herramientas para mi desarrollo profesional, así como todas las experiencias en esta etapa de mi vida.

También quiero agradecer al Instituto de Ingeniería por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación.

A SACMEX y su personal por el apoyo en todas las visitas a las PTAR

A M en C Margarita Cisneros Ortiz por todo el apoyo en el ámbito administrativo

A mi familia, en especial a mis padres Claudia y Joel, que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo y un abrazo reconfortante para renovar energías.

A mis amigos más cercanos Abigail, Daniela, Juan, Luis Enrique, y Rubén, quienes me hicieron de la universidad una etapa más fácil y memorable

A Jazmin que su amistad fue de gran ayuda para conseguir este logro y a su familia por el apoyo brindado.

A mis amigos y compañeros del GIPA Alondra, Natalia, Michel y Yovany quienes desde mi servicio social brindaron su amistad, ayuda y conocimiento gracias por todos los recuerdos.

Muchas gracias a todos.



El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

No. de Certificado CMX C SGC 209 2020, válido en el período del

12 de noviembre de 2020 al 11 de noviembre de 2023

Contenido

1.Introducción.....	1
2.Marco teórico.....	4
2.1 México frente al cambio climático.	
2.2 Tratamiento de aguas residuales en México	
2.2.1 Tratamiento de ARM en la ciudad de México	
2.3 Emisiones de GEI en México.	
2.3.1 GEI en el tratamiento de aguas residuales.	
2.3.2 Medidas de mitigación de GEI	
2.4 Metodologías empleadas en la cuantificación de GEI para el tratamiento y eliminación de aguas residuales.	
2.4.1 Metodología empleada para el cálculo de emisiones de gases in situ	
2.4.2 Metodologías empleada en la cuantificación de metano en fase líquida	
2.5 Justificación.	
3.Hipótesis y Objetivos.....	26
3.2 Hipótesis	
3.3 Objetivos	
3.3.1 objetivo general	
3.3.2 Objetivos particulares	
4.Método.....	28
4.1 Sitios De muestreo	
4.2 Calculo teórico de emisiones de metano	
4.3 Cuantificación <i>in-situ</i> de emisiones de metano	
4.4 Cuantificación de metano disuelto.	
5.Resultados.....	53
5.1 emisiones de metano en sedimentadores primarios.	
5.2 Concentración de metano disuelto.	
5.3 Calculo teórico de emisiones metodologías IPCC NIVEL 1 y NIVEL 2	
5.4 Comparación calculo IPCC con datos obtenidos <i>in situ</i>	
5.5 <i>Estimación de emisiones en la red de drenaje y PTARs de la CDMX</i>	
6.conclusiones y recomendaciones.....	83
Referencias.....	88
Anexos.....	93

Índice de figuras y tablas

Figuras

<i>Figura 1.1</i> Concentraciones atmosféricas en ppb de metano a través del tiempo.	2
<i>Figura 2.1.</i> Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero.....	14
<i>Figura 2.2.</i> Producción de GEI en el manejo y tratamiento de aguas residuales municipales.....	16
<i>Figura 4.1</i> Ubicación de las 25 PTAR de la Ciudad de México.....	34
<i>Figura 4.2</i> Cámara estática utilizada en este estudio (2 unidades).....	35
<i>Figura 4.3</i> Ubicación de la cámara estática dentro del sedimentador. Se muestra el tubo flexible para tomar la muestra con el equipo Biogás 5000.....	36
<i>Figura 4.4</i> Ajuste del incremento en el tiempo de la concentración de CH ₄ en la cámara estática colocada en el sedimentador primario de la PTAR Cerro de la Estrella.....	40
<i>Figura 5.1.</i> Muestreo en campo. Cuantificación de emisiones en sedimentador primario (izquierda) y toma de muestra para análisis de metano disuelto.....	55
<i>Figura 5.2</i> Comparación en el total de emisiones directas de metano calculadas con datos in situ, siguiendo las metodologías IPCC y con un balance de masa específico para cada instalación.....	73
<i>Figura 5.3</i> Porcentaje de aportación de las emisiones directas e indirectas para tres procedimientos de cálculo..	78
<i>Figura 5.4</i> porcentaje de emisiones totales generadas por el tratamiento de aguas residuales para tres procedimientos de cálculo.....	79

Tablas

<i>Tabla 2.1</i> Caudal tratado por cada entidad federativa México.....	9
<i>Tabla 2.2</i> Reutilización e intercambio de Aguas tratadas por entidad federativa en m ³ /s.....	10
<i>Tabla 2.3.</i> Propiedades físicas y químicas del metano.....	17
<i>Tabla 2.4</i> Contribución de emisiones de metano por etapa en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.....	18
<i>Tabla 2.5.</i> Porcentaje de oxidación de metano disuelto que ingresa al tanque de aireación.....	19
<i>Tabla 4.1.</i> Relación de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) consideradas en el estudio, con datos de ubicación, datos de operación y tipo de proceso.....	29
<i>Tabla 4.2</i> Puntos de localización de las cámaras estáticas dentro del sedimentador en las PTAR que cuentan con este equipo.....	37
<i>Tabla 5.1</i> Datos obtenidos durante el muestro en 23 PTAR (valores puntuales).....	54
<i>Tabla 5.2</i> Emisiones de metano anuales provenientes de las unidades sedimentadoras.....	56
<i>Tabla 5.3</i> Masa de metano que ingresa disuelto en un año a las plantas de tratamiento y equivalente en CO ₂	56
<i>Tabla 5.4</i> Diferencia de metano disuelto en el influente y en el sedimentador primario por PTAR.....	57
<i>Tabla 5.5</i> Masa de metano que ingresa al reactor biológico.....	58
<i>Tabla 5.6</i> Emisiones totales de metano en equivalentes de CO ₂ del sistema de tratamiento de aguas.....	61
<i>Tabla 5.7</i> Emisiones de CH ₄ para 25 PTAR calculadas según el Nivel 1 (IPCC, 2006).....	63
<i>Tabla 5.8</i> Emisiones de CH ₄ Calculadas teóricamente (Nivel 2a).....	65
<i>Tabla 5.9</i> Emisiones de CH ₄ Calculadas teóricamente (Nivel 2b).....	66
<i>Tabla 5.10</i> Cálculo de emisiones de CH ₄ basado en el Nivel 1 (2019).....	67
<i>Tabla 5.11</i> Comparación entre los valores de emisión calculados mediante balance de masa (BM) y obtenidas in situ.....	70
<i>Tabla 5.12</i> Estimación en la Producción de CH ₄ por lodos biológicos descargados al drenaje.....	75
<i>Tabla 5.13</i> Emisiones directas e indirectas en Ton CO ₂ EQ/año por PTAR. No se incluyen las emisiones estimadas por la descarga de lodos en el drenaje.....	77
<i>Tabla 5.14</i> Porcentaje de emisiones directas, por lodos e indirectas por metodología.....	80

Resumen

La mitigación de gases de efecto invernadero se ha convertido en un objetivo de dimensiones globales de muy alta prioridad. El aumento en la concentración de metano en la atmósfera ha impulsado importantes estudios sobre las fuentes y depósitos de metano debido a su potencial de calentamiento global el cual es 34 veces superior al CO₂.

Se ha identificado que las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generando dos potentes GEI que son metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). En este contexto, es importante conocer los obstáculos y las áreas de oportunidad en el manejo de los gases de efecto invernadero generados por el manejo del agua residual, y así poder definir estrategias de mitigación efectiva que reduzcan significativamente la huella de carbono asociada a la actividad a nivel nacional.

En este trabajo se comparan diversos procedimientos para estimar teóricamente las emisiones de metano con aquellas obtenidas in situ. Se siguió lo indicado por el IPCC 2006 (Nivel 1 y 2) y su actualización del 2019 (Nivel 1), además de un cálculo basado en balance de masa.

Los resultados del total de emisiones directas de metano in situ para 23 PTAR de la Ciudad de México, indican 13,716.7 ton CO_{2eq}/año, valor superior a lo obtenido teóricamente por balance de masa (10,672.9) y el Nivel 2 del IPCC (8,315.3) que fueron las estimaciones más cercanas. La producción de metano en los sedimentadores primarios son una causa importante de la diferencia entre los valores reales y los teóricos.

Se destaca como medida efectiva de mitigación el evitar la generación de metano en las unidades sedimentadoras, ya que, en casi la totalidad de las plantas visitadas, la concentración de metano disuelto se incrementa en el sedimentador primario en relación con el contenido del influente, en un promedio de tres veces para las plantas estudiadas con sedimentador primario.

Las emisiones indirectas (asociadas al consumo de energía eléctrica) superan en un amplio margen a los valores de las emisiones directas, por lo que disminuir las emisiones indirectas sería prioritario para una estrategia de reducción de emisiones en las PTAR de la Ciudad de México. Las emisiones indirectas representan más del 60% del total de las emisiones totales en los escenarios considerados, con partes prácticamente iguales (alrededor del 20% cada una) de emisiones en las PTAR y por los lodos descargados en el drenaje.

Se recomienda rehabilitar las plantas de la ciudad de México y mejorar su operación, para así disminuir las emisiones generadas en los sedimentadores. Así mismo, es necesario tratar los lodos producidos durante el tratamiento de aguas ya que el hecho de descargarlos al drenaje representante una fuente de emisión de metano no despreciable. La opción de la digestión anaerobia con generación de electricidad disminuiría las emisiones indirectas, principal contribuyente (60%) en la huella de carbono de las PTAR estudiadas

Introducción

Uno de los mayores retos ambientales a nivel mundial es la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI), causantes principales del fenómeno del cambio climático a escala mundial. En este contexto resulta fundamental la identificación del impacto ambiental de las actividades humanas generadoras de GEI para adoptar políticas enfocadas en la mitigación y control de estos.

El aumento en la concentración de metano en la atmósfera ha impulsado importantes estudios sobre las fuentes y depósitos de metano particularmente desde que se comprobó su gran capacidad para retener radiación infrarroja. Su potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) es de 28 a 34 veces superior a la del dióxido de carbono y con una vida corta de aproximadamente de 10-12 años (UNEP, 2017).

La concentración de las emisiones de metano ha incrementado considerablemente de un estimado de 700 ppb en 1750 a 1808 ppb en 2010 (Heimann, **2011**). Con un crecimiento anual estimado de 0.008 ppmv (Pipatti et al., 1996; Augenbraum et al., 1999; IEA, 1999)

De acuerdo con el quinto reporte del IPCC las estimaciones de emisiones de metano de 2000 a 2009 fueron 7.5×10^7 t, lo cual representa el 22.66% del total de emisiones antropogénicas (Stocker, 2014).

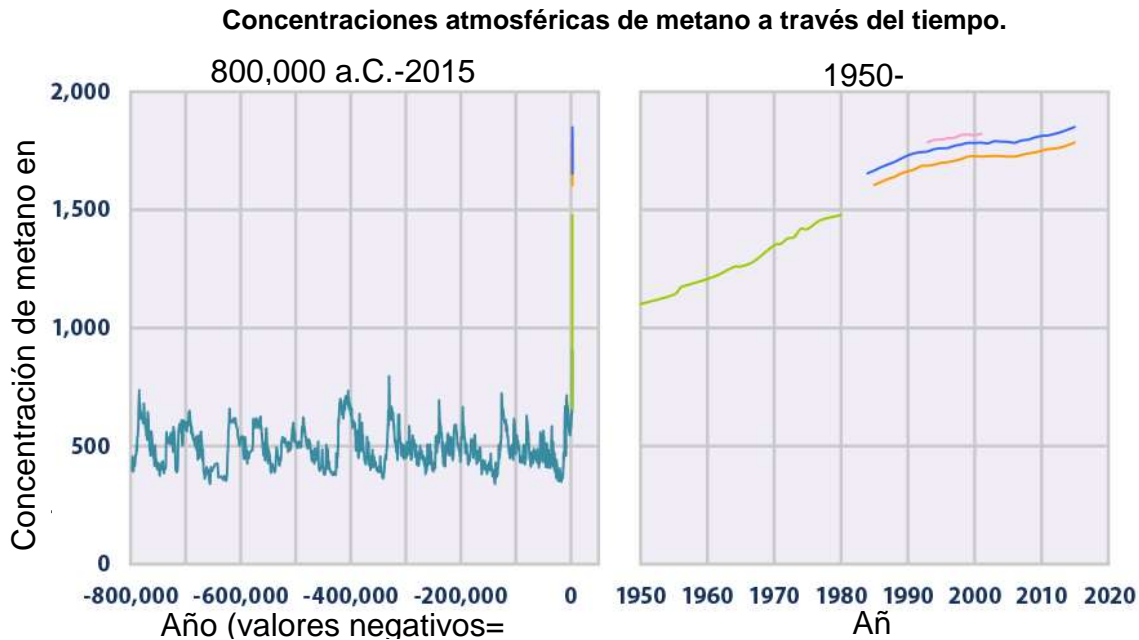


Figura. 1.1 Concentraciones atmosféricas en ppb de metano a través del tiempo (EPA). Las líneas de colores en la imagen derecha representa fuentes de información distinta.

En la Figura 1,1 puede observarse el incremento en la concentración de metano a través del tiempo medido en partes por billón (ppb). Esta información es un histórico de estudios realizados a muestra de hielo y monitoreo recientes a muestras de aire alrededor del mundo. Cada línea (imagen derecha) representa una fuente de información distinta. (Etheridge et al., 2002; NOAA, 2016; Louergue et al. 2008; Steele et al, 2002)

Las emisiones de metano causadas por el hombre podrían reducirse hasta en un 45% en esta década. Esto evitaría casi 0,3°C de calentamiento global para 2045, lo que ayudaría a limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C y pondría al planeta en el camino correcto para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Cada año, la consecuente reducción de ozono a nivel del suelo también evitaría 260.000 muertes prematuras, 775.000 visitas al hospital relacionadas con el asma, 73.000 millones de horas de trabajo perdido por calor extremo y 25 millones de toneladas de pérdidas de cultivos. (UNEP, 2017)

Las principales fuentes de emisiones antropogénicas de metano son: producción y transporte de gas y petróleo, manejo de rumiantes y abono, sembradíos de arroz, vertederos de basura (rellenos sanitarios), tratamiento y manejo de aguas residuales.

Se ha identificado que las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generando dos potentes GEI que son metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Mannina et al., **2018**). Sin embargo, la contribución de la emisión de metano a la huella de carbono de una PTAR es superior a las emisiones de óxido nitroso (Daelman et al., 2012). Las emisiones mundiales de metano por el tratamiento de aguas residuales se incrementaron a 2892 miles de toneladas en 2012 y también aumentó su proporción en 5.17% del total de emisiones de metano antropogénico global (Zhao et al., 2019).

En general, la mayoría de los esfuerzos en mejorar el rendimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se ha enfocado en obtener un efluente de buena calidad. Sin embargo, actualmente están bajo consideración nuevos retos orientados en garantizar la sustentabilidad en términos de viabilidad económica e impacto ambiental, lo que lleva a minimizar la huella de carbono de las instalaciones.

Marco teórico

2.1 México frente al cambio climático.

El cambio climático se ha convertido en uno de los temas prioritarios tanto en la opinión pública, como en la agenda científica y política a nivel mundial. Las condiciones socioeconómicas, la fragilidad de los ecosistemas, y las características geográficas y climáticas hacen que México sea particularmente vulnerable al cambio climático.

México se encuentra entre los 20 países con mayores emisiones de los 195 considerados por las Naciones Unidas. En los últimos 20 años su posición ha variado entre los lugares 11 y 13

Ante esta problemática, México publicó su Ley General de Cambio Climático el 6 de junio de 2012. Esta Ley establece la creación de diversos instrumentos de política pública, entre los que destaca el Registro Nacional de Emisiones (RENE) y su Reglamento, encaminados a compilar la información necesaria sobre la emisión de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (GyCEI) de los diferentes sectores productivos (SEMARNAT, 2020)

México se comprometió ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) mediante el acuerdo de París en la COP21 celebrada el año 2015 a reducir sus emisiones de GEI en un 22% y las de carbono negro en un 51% al 2030 respecto a la línea base construida en un escenario tendencial estimado para el 2013. En complemento, los compromisos adicionales, los cuales estarían condicionados a recibir apoyo de otros países, permitirían incrementar la mitigación de emisiones, alcanzando una meta de reducción de hasta el 36% de las emisiones de GEI y 70% de las emisiones de carbono negro al 2030. Para el sector de los residuos estas emisiones podrían reducirse en un 28.6%. (SEMARNAT, 2020).

Para lograr los objetivos fijados para la reducción de emisiones nacionales, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) ha elaborado rutas tecnológicas para diferentes sectores según la clasificación establecida en el Inventario Nacional de Emisiones de GEI de México.

2.2 Tratamiento y manejo de aguas residuales en México.

La experiencia documentada en México sobre el tratamiento y reúso del agua tratada inició hace más de 100 años, con la construcción de un Tanque Imhoff en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, seguida de la primera planta de lodos activados en Monterrey en 1956. Con la creación de la Conagua, el 16 de enero de 1989, se acentúa la construcción sostenida de esta infraestructura para llegar a 256 plantas de tratamiento de aguas residuales a finales de los ochenta y a 546 en 1992

En la edición 2020 del “Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación 2020” se indica que existen un total de 2642 plantas de tratamiento de aguas residuales con una capacidad instalada de 194,715.32 l/s y un caudal tratado de 141,479.04 l/s, alcanzando una cobertura a nivel nacional de 65.7% del total de agua residual de origen municipal (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Caudal tratado por cada entidad federativa México (Conagua,2019).

Entidad federativa	En operación			
	Nº de plantas	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cobertura de tratamiento (%)
Aguascalientes	135	4 840	3 082	94.9
Baja California	45	7 683	5 814	89.1
Baja California Sur	32	2 071	1 636	68.7
Campeche	19	151	94	6.7
Chiapas	92	1 854	1 321	29.9
Chihuahua	191	10 275	7 046	86.3
Ciudad de México 2/	29	5 605	18 638	85.2
Coahuila de Zaragoza	26	5 680	4 518	64.0
Colima	74	2 355	1 676	65.9
Durango	228	4 701	3 526	90.2
Guanajuato	64	7 558	5 222	72.6
Guerrero	67	4 428	3 755	95.2
Hidalgo 1/	62	35 850	456	18.3
Jalisco	149	15 813	10 721	76.6
México 2/	131	9 727	17 203	56.5
Michoacán de Ocampo	46	4 146	3 175	46.5
Morelos	58	2 964	1 361	21.2
Nayarit	70	3 494	2 510	96.7
Nuevo León	55	16 157	12 590	97.2
Oaxaca	77	1 820	1 294	60.1
Puebla	85	3 517	3 593	56.7
Querétaro de Arteaga	51	2 345	1 592	49.5
Quintana Roo	29	3 012	2 017	57.2
San Luis Potosí	63	2 759	2 229	69.1
Sinaloa	279	6 497	5 837	87.0
Sonora	107	7 424	6 190	67.8
Tabasco	69	2 776	2 009	27.3
Tamaulipas	61	8 184	4 806	88.7
Tlaxcala	58	1 556	1 110	64.7
Veracruz	108	7 015	4 712	42.2
Yucatán	29	509	235	5.3
Zacatecas	53	1 952	1 509	61.0
Total Nacional	2 642	194 715	141 479	65.7

El tratamiento con más instalaciones en el país es el de lagunas de estabilización, aplicado en 792 plantas, equivalente al 30%. Le sigue el de lodos activados que se aplica en 761 plantas, lo que representa el 28.8%. En tercer lugar, figura el proceso de reactor anaerobio de flujo ascendente con 140 plantas, siendo el 5.3% de las PTAR.

Asimismo, el proceso de tratamiento con mayor caudal tratado es el de lodos activados con 69.4 metros cúbicos por segundo, que corresponde al 49% del caudal tratado a nivel nacional.

En el año 2019, del caudal total tratado de aguas residuales, calculado en 141.5 metros cúbicos por segundo, se reusaron 130.5 metros cúbicos por segundo, equivalentes al 92.3%; se intercambiaron 2.2 metros cúbicos por segundo (1.5%) y se descargan al mar o zonas cercanas al mismo 8.7 metros cúbicos por segundo (6.2%), como se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Reutilización e intercambio de Aguas tratadas por entidad federativa en m3/s

Estado	Reúso							Intercambio						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Aguascalientes	3.2	3.3	2.1	1.7	3.4	3.0	3.1	-	-	0.2	-	-	-	-
Baja California	1.5	1.5	2.4	2.8	2.9	3.1	3.1	0.8	0.8	0.4	-	-	-	-
Baja California Sur	0.7	0.7	1.2	1.3	1.3	1.6	1.6	-	-	-	-	-	-	-
Campeche	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	-	-	-	-	-
Chiapas	0.8	0.7	0.9	1.0	1.0	1.0	1.2	-	-	-	-	-	-	-
Chihuahua	6.8	7.0	7.0	7.0	6.7	7.0	7.0	-	-	-	-	-	-	-
Ciudad de México	0.8	0.9	2.9	2.2	2.8	2.3	2.3	2.3	1.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Coahuila	2.5	2.5	2.6	4.0	3.9	3.8	3.8	1.3	-	1.9	0.7	0.7	0.7	0.7
Colima	1.3	1.3	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	-	2.5	-	-	-	-	-
Durango	3.1	3.1	3.3	3.5	3.5	3.5	3.5	0.3	0.3	0.2	-	-	-	-
Guanajuato	5.6	5.2	5.4	5.5	5.0	5.0	5.0	-	-	-	-	0.3	0.3	0.3
Guerrero	1.9	1.9	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	-	-	-	-	-	-	-
Hidalgo	0.2	0.3	9.4	9.6	18.2	22.1	27.4	-	-	-	-	-	-	-
Jalisco	6.7	11.0	11.7	6.2	6.4	6.3	10.5	-	-	-	6.5	6.5	6.0	-
México	5.8	5.9	5.9	6.4	6.3	6.3	6.3	1.0	1.0	1.0	-	-	-	-
Michoacán	3.4	3.3	3.0	2.8	2.8	2.8	2.8	-	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Morelos	1.6	1.5	1.5	2.0	2.0	1.3	1.4	-	-	-	-	-	-	-
Nayarit	2.1	2.1	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2	-	-	-	-	-	-	-
Nuevo León	9.9	10.9	10.8	11.2	11.6	11.8	11.8	1.6	1.6	0.4	0.5	0.7	0.8	0.8
Oaxaca	0.9	0.9	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	0.1	0.1	0.1	-	-	-	-
Puebla	3.2	3.6	3.5	3.6	3.6	3.6	3.6	-	-	-	-	-	-	-
Querétaro	1.6	1.7	1.7	1.9	1.9	1.9	1.6	-	-	-	-	-	-	-
Quintana Roo	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	2.0	-	-	-	-	-	-	-
San Luis Potosí	1.1	1.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	1.0	1.0	-	-	-	-	-
Sinaloa	4.0	4.1	4.4	4.5	5.0	4.9	4.9	-	-	-	-	-	-	-
Sonora	3.5	3.5	3.1	4.4	5.7	5.7	5.9	0.1	0.1	0.1	-	-	-	-
Tabasco	1.8	1.8	1.8	2.6	2.6	2.6	1.9	-	-	-	-	-	-	-
Tamaulipas	4.3	4.1	5.4	5.4	4.7	4.1	4.3	-	-	-	-	-	-	-
Tlaxcala	0.8	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	1.1	-	-	-	-	-	-	-
Veracruz	3.6	3.2	3.4	3.3	3.0	3.0	3.0	-	-	-	-	-	-	-
Yucatán	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	-	-	-	-	-	-	-
Zacatecas	1.5	1.5	1.4	1.7	1.6	1.6	1.5	0.2	0.2	0.2	-	-	-	-
Total Nacional	86.1	91.2	106.9	107.4	118.5	121.0	130.5	8.7	8.9	5.1	8.1	8.6	8.2	2.22

Algunos de los proyectos más relevantes que se realizaron en el período 2014-2018 son los siguientes:

- Túnel Emisor Poniente II Región Centro: consiste en la construcción de un túnel para la captación del agua residual y pluvial de la zona Norponiente del Valle de México.
- Túnel Emisor Oriente (TEO) Región Centro: consiste en la construcción de un túnel para la captación de las aguas residuales y pluviales de la zona metropolitana de la Ciudad de México.
- Modernización de los sistemas de agua potable, drenaje y alcantarillado de la ciudad de San Francisco de Campeche: consiste en modernizar la red de alcantarillado dando servicio a 230,000 habitantes.
- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco Región Centro: consiste en la construcción de una PTAR en la cuenca del Valle de México. De esta manera, se consigue aumentar la cobertura de tratamiento de ARM de la zona metropolitana del valle de México hasta un 60%. Además, se captará y aprovechará el biogás generado en la planta, el cual podría satisfacer hasta el 70% del consumo de energía de la planta.
- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de La Paz, B.C.S. Región Norte: consiste en la construcción de una PTAR para el tratamiento de 700 l/s de ARM.
- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Bahía de Banderas, Nay. Región Centro: consiste en la construcción de una PTAR para tratar 600 l/s de ARM.

2.2.1 Tratamiento y manejo de ARM en la ciudad de México

El sistema de alcantarillado se conforma por 11 mil 644 km de redes secundarias y 2 mil 446 km de redes primarias logrando una cobertura del 98.5% (CONAGUA, 2019). El alcantarillado descarga en el Sistema General de Desagüe, integrado por: 99 plantas de bombeo y 102 plantas en paso a desnivel; 17 presas de almacenamiento y 11 lagunas de regulación; 123.9 kilómetros de cauces a cielo abierto, y 49.3 km de cauces entubados. Los conductos de evacuación del agua residual, combinada con la pluvial del Valle de México son el Emisor Central (o Drenaje Profundo), el Túnel Emisor Oriente, y en menor medida, el Túnel de Tequisquiac (Drenaje General del Valle).

Las descargas de aguas residuales en la ciudad se clasifican de acuerdo a su origen, ya sea que provengan de la industria, doméstico y servicios o comercio. Del total de las descargas de aguas residuales, el 62% corresponden al sector doméstico y servicios, el 21% a la industria y el 17% al sector comercio.

Según la información obtenida en el informe anual Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, edición 2020 en la ciudad de México se generan 23,146 l/s de aguas residuales, de los cuales 21,870 l/s son colectados (94.5%)

En la ciudad de México se tienen registradas 29 plantas de tratamiento en operación con una capacidad total instalada de 5,604.5 l/s y un caudal tratado de 2,451.5 l/s predominando el tratamiento por medio de lodos activados tratando un caudal de 2,400.4 l/s (CONAGUA, 2019). Sumado a esto, 12,990 l/s del agua residual colectada en la Cd de México es enviada a la planta de tratamiento Atotonilco en el estado de Hidalgo logrando así una cobertura de tratamiento del 85% respecto al agua residual colectada.

2.3 Emisiones de GEI en México.

El inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (INEGYCEI) forma parte de los compromisos de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

El INEGYCEI informa sobre los seis gases de efecto invernadero (GEI) contemplados en el protocolo de Kioto: Dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbono (HFC), perflorocarbonos (PCF) y el hexafloruro de azufre (SF₆). Las emisiones de los GEI se contabilizan en unidades de CO₂ equivalente.

A nivel nación, la integración del INEGYCEI es responsabilidad del INNEC siguiendo la siguiente temporalidad

1. Estimación de las emisiones por la quema de combustibles fósiles se realiza anualmente.
2. Estimación de las emisiones no referentes a la quema de combustibles fósiles, con excepción de las relativas al cambio de uso de suelo, se realizarán cada 2 años.
3. Estimación del total de las emisiones por fuentes y absorciones por los sumideros de todas las categorías incluidas en el inventario, se realizará cada 4 años.

De acuerdo a la actualización del inventario 2015 publicada en el 2018 (Figura 2.1), el total de emisiones se contabilizó en 682,959.1 Gg de CO₂eq siendo el gas más relevante emitido por nuestro país el CO₂ con el 72% del total de las emisiones, seguido del metano con el 20%, siendo el 3.3% aportado por el tratamiento y eliminación de agua residual. El balance neto entre emisiones y absorciones para el año 2015 fue de 534,63.03 (±1.19%) Gg de CO₂eq emitidas a la atmosfera.

Se identificó que las principales fuentes de emisiones son:

1. Automóviles y transporte público.
2. Las actividades de producción y transmisión de energía eléctrica.
3. La ganadería para producción de leche y carne.

En la siguiente figura (2.1) se puede observar la contribución de las emisiones por sector, seguida por las categorías, sub categorías y finalmente las emisiones por fuente. Se ilustra con el ancho de cada banda la contribución de las emisiones por actividad.

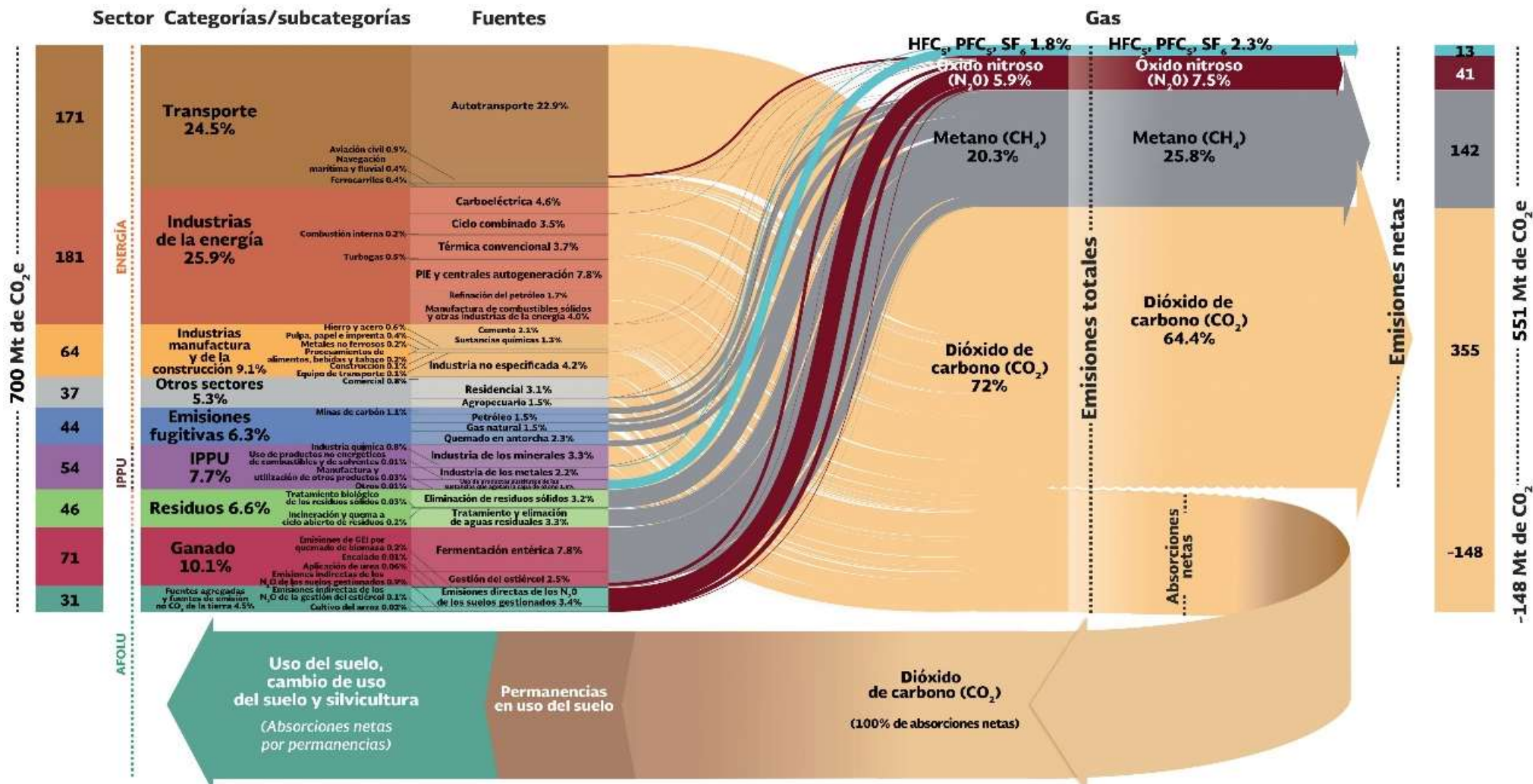


Figura 2.1. Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (INNEC) 2018.

En 1990 las emisiones totales alcanzaron 444,751.91 Gg de CO₂eq que en comparación con los valores reportados en 2015 hubo un incremento del 54% a una tasa de crecimiento anual de 1.7% para el periodo 1990-2010, y de 0.7% para el periodo 2010-2015 mostrando una predisposición a la baja en las emisiones. De seguir con esta tendencia a la baja, se espera que en el 2020 las emisiones de GEI alcancen los 556,740 Gg de CO₂eq.

2.3.1 Emisiones de GEI en la ciudad de México.

El Inventario de Emisiones de la Zona metropolitana y valle de México (ZMVM) 2018 integrada por las 16 alcaldías de la Ciudad de México (CDMX), 59 municipios del Estado de México (EdoMex) y el municipio de Tizayuca, Hidalgo estimó que, en ese año, se emitieron más de 75 millones de toneladas de CO₂eq, considerando las emisiones de cuatro GEI: CO₂, CH₄, N₂O e HFC (SEDEMA, 2018).

De la cuales el 22.7% sería reportado a fuentes de área donde se incluyen las generadas por el manejo de los residuos sólidos y líquidos. Donde el manejo de aguas residuales tratadas y no tratadas representa el 2.17% de las emisiones, así como el 19% del metano emitido en la categoría de manejo de residuos (SEDEMA, 2018).

2.4 GEI en el tratamiento de aguas residuales.

Durante el manejo de las aguas residuales, pueden generarse emisiones de GEI, en particular metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), los cuales son generados a partir del tratamiento, así como por su eliminación o vertido a un cuerpo de agua y por la generación de sus lodos, subproducto del mismo tratamiento (Figura 2.2). El dióxido de carbono (CO₂) generado no se contabiliza como GEI debido a su origen

biogénico (o carbono de ciclo corto, no fósil), de acuerdo con lo indicado por el IPCC (2019), pero si el relacionado con la producción de la energía eléctrica consumida en la planta (emisión indirecta) cuando ésta es generada a partir de combustibles fósiles.

Los GEI producidos pueden dividirse en emisiones directas y emisiones indirectas. Las emisiones directas incluyen al Metano y Óxido nitroso, mientras que las indirectas hacen referencia al CO₂ asociado a la producción de la energía eléctrica consumida en el manejo del agua residual y a la fabricación y transporte de productos químicos utilizados.

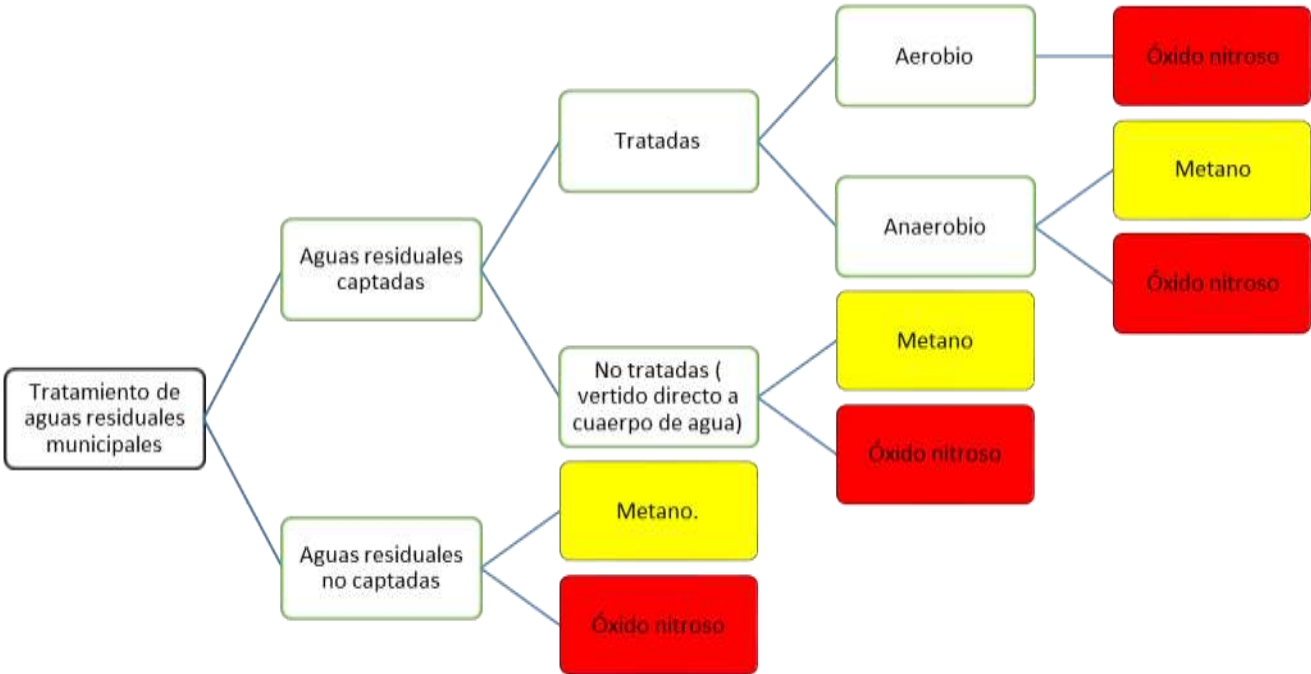


Figura 2.2. Producción de GEI en el manejo y tratamiento de aguas residuales municipales (INNEC, 2018)

Se ha estimado que, en México, el sistema de tratamiento de aguas residuales en conjunto (municipales e industriales), podría llegar a contribuir hasta un 15% del total de las emisiones generadas en el país (Paredes G., 2017).

En el reporte de emisión publicado en 2018 se realizó la estimación de las emisiones generadas por el tratamiento y descarga de aguas residuales municipales, las cuales fueron de 5,592.44 Gg de CO₂ eq, lo que representa el 12.2% de las emisiones anuales totales del sector residuos. (INNEC, 2018)

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 5,371.55 a 5,592.44 Gg de CO₂eq con una tasa de crecimiento media anual de 0.2 por ciento. De esto las emisiones de metano representaron 67% ($\pm 7.63\%$), mientras que el óxido nitroso representó 33 por ciento ($\pm 2.23\%$) (INNEC, 2018).

2.4.1 Emisiones de Metano en PTAR.

El metano es una molécula muy sencilla (alcano) conformada por un átomo de carbono al cual están unidos cuatro átomos de hidrógeno por medio de enlaces covalentes. Sus propiedades físico-químicas se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Propiedades físicas y químicas del metano.

<i>Propiedad física o química</i>	<i>Valor</i>
<i>Masa molar</i>	16.04 g/mol
<i>Punto de fusión</i>	90.6 K
<i>Punto de ebullición</i>	111.55 K
<i>Densidad líquida en el punto de ebullición</i>	424.6 kg/m ³
<i>Densidad gaseosa a 294 K y 1 atm</i>	0.6670 kg/m ³
<i>Gravedad específica</i>	0.56
<i>Solubilidad en agua a 20°C y 1 atm presión parcial CH₄</i>	12 mg _{CH₄} /L

$\Delta_f H^0_{gas}$	-74.87 kJ/mol
$S^0_{gas, 1 atm}$	188 J/mol*K
<i>Punto de inflamabilidad</i>	85.5 K
<i>Límite de explosividad</i>	5-15%

Durante el tratamiento de aguas residuales domésticas pueden presentarse condiciones anaerobias lo cual produce metano debido a la digestión de la materia orgánica bajo estas condiciones. La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás, una mezcla de CO₂, hidrógeno, metano, sulfuro de hidrógeno y trazas de otros elementos. En este interviene un consorcio de bacterias y arqueas metanógenas, estas últimas muy sensibles al oxígeno (Ferrer Y., Perez H, 2010). De ahí que este proceso sea estrictamente anaerobio.

Existe una fracción de metano que ingresa de manera directa a la PTAR en forma disuelta en el agua residual. Este metano puede emitirse a lo largo del proceso en diferentes unidades, en función de las condiciones de turbulencia que favorecen la desorción del gas. Cerca del 50% puede emitirse en el área donde se capta el agua residual y el porcentaje puede incrementarse si existe un mayor contacto con el aire de la atmósfera, como por ejemplo en el uso de transportadores de tornillo o desarenadores aireados (Daelman et al., 2012; Foley et al., 2011; Kwok et al., 2015; Liu et al., 2014; Masuda et al., 2018; Noyola et al., 2018; Ren et al., 2013; Samuelsson et al., 2018; Wang et al., 2011).

Cuando existen sedimentadores primarios también pueden ser una fuente de emisiones contribuyendo hasta un 68% del total de las emisiones en la PTAR (Daelman et al., 2012; Liu et al., 2014; Masuda et al., 2018; Ren et al., 2013). La

Tabla 2.4 presenta los porcentajes de emisión de metano en las diferentes etapas del tratamiento de aguas residuales municipales que se han reportado en la literatura.

Tabla 2.4 Contribución de emisiones de metano por etapa en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales

Referencia	Pretratamiento	Sedimentador	Reactor biológico
Foley et al., 2011	45-57%	11-23%	21-41%
Kwok et al., 2015	52%	18%	28%
Lorenzo-Toja et al., 2016	31.25%	NA	68.74%
Liu et al., 2014	41.66%	4.34%	50%
Masuda et al., 2018	40-53.2%	21.8%-68.1%	11.1%-47.9%
Samuelsson et al., 2018	50-60.35%	10-14%	15-27%

El metano disuelto que ingresa a los reactores biológicos es removido por completo, ya sea por medio de la oxidación biológica por bacterias metanótrofas o bien es emitido a la atmosfera. El porcentaje de emisiones en esta parte del proceso oscila en un rango del 3 al 80% del total que ingresa a la PTAR disuelto (Daelman et al., 2012; Kwok et al., 2015; Wang et al., 2011).

La cantidad de metano que es oxidada por los reactores de lodos activados depende mucho del diseño y operación del mismo (Tabla 2.5). Por ejemplo, existe un rango óptimo de aireación para la oxidación del metano el cual es lo suficientemente elevado para evitar limitaciones de oxígeno en la conversión del metano, pero lo bastante bajo para no causar que el metano se desorba y sea emitido a la atmosfera. La profundidad de los tanques aireados también juega un papel fundamental, a una mayor profundidad se permite una mejor solubilidad de los gases lo cual evita la emisión del metano y promueve la transferencia de oxígeno. Finalmente, tanques

de agitación continua muestran mayor conversión de metano respecto a los de tipo secuencial ya que por medio de la agitación se diluye el metano que ingresa al tanque lo cual reduce el porcentaje de emisión y favorece el porcentaje de oxidación del metano (Daelman et al., 2014).

Tabla 2.5. Porcentaje de oxidación de metano disuelto que ingresa al tanque de aireación

Referencia	Tipo de sistema	% de CH₄ oxidado
Baeten et al (2021).	Reactores de lodo granular operados en secuencia.	Aireación continua: 70-88% Alimentación sin aireación: 0-24%
Daelman et al (2014).	Ludzack-Ettinger modificado aireación tipo plug-flow uniforme y decreciente. Reactor de agitación continua (CSTR).	Plug-flow tanque 1: 28% Plug-flow tanque 2: 21% Mezcla completa: 63%
Liu et al (2014).	Anoxico/anaerobio/oxico(A ² O) Reactor de lodos activados secuenciales(SBR).	A ² O: 32.5 - 89.5% SBR: 12.7 - 88.31%
Hwang et al (2016)	Sistema de lodos activados	Aireación continua 45%
Bao et al (2016)	Reactor de lodos activados secuenciales(SBR).	Aireación continua:40-70%

2.4 Metodologías empleadas en la cuantificación de GEI para el tratamiento y eliminación de aguas residuales

Se pueden clasificar los métodos de estimación de GEI en dos grupos dependiendo del tipo de cálculo usado. El enfoque descendente basado en valoraciones atmosféricas de GEI a diferentes escalas (global, regional o local) y el enfoque ascendente el cual utiliza datos de operación, factores de emisión y modelos de flujo para el cálculo de emisiones. Ambos enfoques pueden ser aplicados a escala global

o de proceso, dependiendo en la representatividad de la estimación y el tipo de datos con los que se cuente (Kwok et al., 2015).

Las emisiones de GEI por las PTAR a nivel nacional o regional no suelen ser cuantificadas de manera directa, sino que son estimadas utilizando modelos simplificados basados en factores de emisión o modelos empíricos. Estos pueden ser de tipo estático, los cuales se basan en cálculos con condiciones fijas de operación de la PTAR, o bien dinámicos que toman en cuenta las condiciones de operación y las variables del influente y efluente de la PTAR (Koutsou et al., 2018; Corominas et al., 2012). Los modelos dinámicos no son adecuados cuando se realiza la estimación de emisiones a un gran número de PTARs debido al complejo mecanismo de producción de GEI en las PTAR, lo que se traduce en dificultades para aplicar el modelo (Mannina et al., 2019).

La metodología de factores de emisión es ampliamente utilizada gracias a su simplicidad de aplicación, además de los menores costos asociados. Se han reportado diferentes valores de factores de emisión por varias organizaciones, tales como el IPCC, la Agencia Estadounidense de Protección Ambiental (EPA), la Base de Datos de Emisiones para la Investigación Atmosférica Global (EDGAR), el Centro Danés de Energía y Medioambiente (Thomsen, 2016). Dentro de estos destaca la metodología propuesta por el IPCC, al ser la más utilizada.

En el manual: *The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, se establece la metodología para calcular las emisiones basada en el hecho de que la producción de METANO depende principalmente de la cantidad de materia orgánica degradable en el agua residual. En el documento se proponen valores de

factores de corrección de metano (MCF), que llevan a calcular factores de emisión y con ello las emisiones. Los valores de MCF recomendados se presentan para diferentes procesos o formas de manejar las aguas residuales. Para el caso de PTAR aerobias centralizadas, se proponen MCF entre 0 y 0.3, en función si las plantas están bien operadas, o bien sobrecargadas o mal operadas, respectivamente.

En el año 2019 se realizaron diferentes modificaciones al manual para el inventario de GEI propuesto en el 2006, estableciendo nuevos valores para los factores de emisión y producción de lodos los cuales cambiaron el MCF a 0.03 sin hacer distinción entre plantas bien y mal operadas. En esa nueva edición se introdujo una ecuación para calcular el componente S (masa de DBO en los lodos de purga) con un nuevo término, llamado factor de generación de lodos (Krem) con valores de 0.8 y 1.16 para plantas centralizadas de lodos activados y con aireación extendida respectivamente. Estos valores sin embargo no son consistentes con los balances de masa de los procesos de tratamiento, como se verá en el capítulo 5.

2.4.1 Métodos para la cuantificación de emisiones de gases *in situ*.

Existen cuatro métodos principales para la determinación de los flujos de emisión de gases *in situ*, los cuales son: gas de trazado, micro meteorología, cámaras de flujo y cálculos basados en ecuaciones para la difusión de la interface agua-aire. (Duchemin et al., 1999).

- Método por gas de trazado: Un gas trazador es liberado desde múltiples puntos en la superficie emisora para simular emisiones de gas. El número de puntos

dependerá de la geometría y extensiones del área. El gas comúnmente utilizado es el hexafluoruro de azufre (SF_6) debido a su baja concentración en la atmósfera y fácil detección a bajas concentraciones. Algunas desventajas como el alto costo del equipo y la dependencia en las condiciones climatológicas limitan su aplicabilidad.

- Método Micro meteorológico: Es aplicado idealmente en áreas planas donde las emisiones ocurren homogéneamente. Generalmente utiliza rangos de transferencia estimados o medidos. La técnica de correlación de Eddy (una medición directa de la densidad de flujo determinada por la velocidad del viento vertical y la variación en la concentración) ha sido aplicada a las instalaciones de PTAR. El método tiene la ventaja de que las lecturas continuas brindan flujos promedio en superficies extendidas, sin embargo, requiere hacer suposiciones que debe ser validadas por complejos y sofisticados modelos matemáticos, lo que puede ser una desventaja. Por otra parte, el equipo es costoso, complicado y requiere ser fijado en el sitio por largos periodos, especialmente cuando abarca grandes áreas.

- Método dilución de la capa límite (BLM): En este caso Los flujos de CO_2 y CH_4 desde la superficie del agua pueden estimarse, conociendo el gradiente de concentración entre el agua y el aire ya se del CO_2 o del CH_4 y el coeficiente de intercambio gaseoso del gas en cuestión a la temperatura dada. Al respecto, recientemente se han desarrollado equipos automatizados, utilizando los principios del BLM como medio para evaluar los flujos de GEI por los ambientes acuáticos, que han demostrado ser de gran utilidad en estudios como la variación diaria en las emisiones de GEI. No obstante, otros estudios han encontrado que el BLM

subestima los flujos medidos y su uso no se recomienda para superficies de gran extensión.

-Método por cámara de flujo: El principio de este método se basa en la determinación del cambio de concentración de los gases emitidos por una superficie durante un intervalo de tiempo en un volumen de aire definido y confinado.

Existen cámaras de flujo estáticas y dinámicas; la diferencia principal radica en la continuidad del flujo de aire. En las primeras no existe un intercambio de aire con el exterior, mientras que en las segundas se trabaja con un sistema de flujo continuo. No obstante, la cámara estática puede homogenizar la mezcla de gases y garantizar la representatividad de la muestra al incluir dispositivos mecánicos como ventiladores o bombas de recirculación. Por el otro lado, la cámara dinámica introduce aire limpio y seco de manera controlada. Este gas es analizado a la salida para determinar la concentración del compuesto de interés desde el cual se determina el rango de emisión por la superficie

Se debe mencionar que las metodologías basadas en mediciones en campo raramente son utilizadas para realizar inventarios nacionales, debido al costo y tiempo requeridos. Siendo una de las principales debilidades en el desarrollo de los inventarios de emisiones de GEI más precisos y representativos.

2.5 Metodologías empleada en la cuantificación de metano en fase líquida.

Cromatografía de gas de espacio vacío: El método de cuantificación por cromatografía de gases de espacio vacío "HGC" (en inglés) es ampliamente usado

en la determinación de metano y oxido nitroso en cuerpos naturales de agua (Smith, R.L.; Böhlke, J.K.,2019). La popularidad de este método es gracias a su simplicidad y al hecho de que es un método que no genera suciedad o impurezas para el cromatógrafo (Sparkman O.,2011). El HGC es una técnica de muestreo que implica la determinación indirecta de los compuestos volátiles en muestras liquidas o solidas por medio del análisis de la fase gaseosa que está en equilibrio termodinámico con la muestra en un sistema cerrado, los cuales predominantemente se encuentran en concentraciones traza (Robards K., et al, 2004)

Existen métodos estáticos y dinámicos del “HCG”. En los métodos estáticos la muestra y la fase gas llegan a un equilibrio en un recipiente sellado y la muestra de la fase gas se obtiene por medio de una jeringa de forma manual o. En los métodos dinámicos con ayuda de un gas inerte que se pasa a atreves de la muestra se liberan los analitos.

Una manera de incrementar la sensibilidad del método es a través de incrementar el coeficiente de actividad de la muestra, esto se puede lograr cambiando el pH o por la adición de una sal. (Robards K., et al, 2004).

Espectrometria de masas a través de membrana (MIMS): El MIMS por sus siglas en ingles es una técnica para el análisis de compuestos orgánicos volátiles en soluciones acuosas y en aire. se ha demostrado que este método es comparable al método de cromatografía de gases de espacio vacío (Zhao F., 2021).

El método es muy sensible y bastante rápido con ayuda de una membrana porosa o no porosa que suelen ser de polietileno y teflón para muestras de gas y de

polidimetilsiloxano para compuestos volátiles orgánicos, estas son hidrofóbicas y así favorecen el transporte de los compuestos orgánicos hidrofóbicos hacia el vacío del espectrómetro, una de las mayores ventajas del método frente a HSG es la alta sensibilidad y el poco tiempo que emplea. Su principal desventaja es la incapacidad de separar individualmente los analitos, sin embargo, esto puede resolverse con la aplicación de la desorción programada por temperatura.(Ketola R., 1998)

Justificación.

La mitigación de gases de efecto invernadero se ha convertido en un objetivo de dimensiones globales de muy alta prioridad. El control del incremento de la temperatura en la troposfera está asociado a la existencia de los seres vivos en el planeta, incluido el humano. El compromiso de los gobiernos y de amplios sectores de la sociedad deberá incrementarse en los próximos años, ante la amenaza que representa el cambio climático asociado con un incremento de 2°C en la temperatura media anual de la tierra.

México debe cumplir con sus compromisos internacionales en la materia. Por lo que, se deben considerar todas las fuentes de GEI, incluso las menos significativas, ya que todo esfuerzo suma para lograr la meta nacional y mundial. En este sentido, el integrar un inventario nacional de emisiones completo y lo más preciso posible, es una tarea de alta prioridad. Para ello, deben mejorarse los procedimientos para el cálculo de las emisiones de GEI.

Dentro del sector agua, el manejo de aguas residuales industriales y municipales emite aproximadamente el 15% del metano antropogénico en México, cantidad a la

que se debe adicionar las emisiones de CO₂ indirectas que corresponden al consumo de energía eléctrica necesaria para su operación.

En este contexto, es importante conocer los obstáculos y las áreas de oportunidad en el manejo de los gases de efecto invernadero generados por el manejo del agua residual, y así poder definir estrategias de mitigación efectiva que reduzcan significativamente la huella de carbono asociada a la actividad a nivel nacional.

La Cd de México, como mayor centro urbano en el país, tiene un importante papel en la mejora del sector de residuos para control de sus emisiones de GEI. Para ello, es fundamental contar con datos de emisiones reales provenientes de sus plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que esta información será la base para realizar un diagnóstico preciso y de ahí poder formular estrategias y programas efectivos, que lleven en el mediano y corto plazo a una reducción de sus emisiones de GEI.

Por otro lado, es importante señalar el hecho que existe muy poca información sobre mediciones directas para el cálculo de emisiones de GEI en PTAR en México. En ese sentido, este trabajo brinda una mejor perspectiva y aporta información valiosa para determinar con evidencia formal el grado de diferencia que representan los valores reales comparados con los calculados con base en factores de emisión teóricos o recomendados en forma genérica.

Hipótesis y objetivos.

Hipótesis

El valor de las emisiones reales de GEI (metano) en las PTAR de la Cd de México será mayor al calculado teóricamente con la metodología del IPCC Nivel 1 y Nivel 2, ya que no considera la aportación de metano disuelto en el influente.

Objetivos

Objetivo General

- Evaluar las emisiones de metano reales respecto a las teóricas calculadas con la metodología IPCC nivel 1 y nivel 2, para las 26 PTAR bajo responsabilidad del Sistema de Aguas de la Cd de México (SACMEX)

Objetivos secundarios

- Cuantificar la concentración real de metano emitida por cada una de las 24 PTARs en la ciudad de México
- Determinar el aporte a las emisiones de Metan provenientes de la descarga de lodos.
- Cuantificar las emisiones de metano teóricas siguiendo la metodología Nivel 1 y 2 del IPCC (2006 y 2019)

Método

4.1 Sitios de muestreo.

Las 25 plantas de tratamiento objeto de este trabajo se presentan en la tabla 4.1, con datos de ubicación, tipo de proceso y datos de operación. En dos de ellas no se pudieron obtener muestras, debido a que estaban fuera de operación (La Lupita, por daños en la red de drenaje por el sismo de 2017, y Santa Marta Acatitla, que estaba fuera de operación por problemas en el sistema de bombeo de ingreso).

Los puntos de muestreo en las 23 PTAR de la Cd de México se ubicaron en la obra de toma (influyente) y en el sedimentador primario en caso de que el proceso de tratamiento lo incluyera. Para el influyente y el sedimentador, se cuantificó el metano disuelto; además se midió la emisión de metano a la atmósfera en el sedimentador. En el influyente se determinó en sitio pH, temperatura y conductividad. La demanda química de oxígeno (DQO) en el influyente se realizó en el laboratorio. La ubicación de las 25 PTAR en la Ciudad de México se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Relación de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) consideradas en el estudio, con datos de ubicación, datos de operación y tipo de proceso

Planta	Ubicación	Capacidad (l/s)	Influyente promedio 2020 (l/s)	Proceso de tratamiento.	Disposición final del agua tratada
1. <i>Abasolo.</i>	Carretera México - Ajusco km 5 y Camino Real al Ajusco, pueblo de San Miguel Ajusco CP 14700, alcaldía Tlalpan coordenadas: 19.2346223, -99.1935031	15	2.22	Lodos activados convencional.	Zona de viveros de producción florícola Río Abasolo
2. <i>Acueducto De Guadalupe*</i>	Calle Piélago No. 27 Fraccionamiento Acueducto de Guadalupe CP 07270, alcaldía Gustavo A. Madero. Coordenadas 19.525707268221726, -99.15498435377596	110	53.88	Lodos activados convencional.	Zonas industriales de Iztapalapa e Iztacalco, deportivos, camellones y áreas verdes
3. <i>Bosque de las lomas</i>	Paseo ahuehuetes Norte No. 360 Colonia Bosques de las Lomas CP 11700, alcaldía Miguel Hidalgo coordenadas 19.416451, -99.233761	25	21.93	Lodos activados aireación extendida.	Riego de camellones en la avenidas Palmas y Reforma, comercios en Polanco
4. <i>Cerro de la estrella</i>	alcaldía de Iztapalapa en la ciudad de México, entre las calles de Naranjo y San Lorenzo en la colonia San Juan Jalpa en las coordenadas 19° 20' 19.65" N, 99° 04' 42.44".	3000	1677.5	Lodos activados con aireación extendida	zona de reserva ecológica de Xochimilco, Tláhuac y Mixquic. Mantenimiento de áreas verdes como parques, camellones y jardines de la alcaldía de Xochimilco. Mantenimiento de la producción agrícola en la zona chinampera de Xochimilco.
5. <i>Chapultepec**</i>	Camino de acceso por calle de Pedregal Esquina F.F.C.C. Cuernavaca, Col. Lomas de Chapultepec CP 11000	160	94.12	Reactor biológico de membrana y pulimento con osmosis inversa	Lago de la 1a y 2a Sección de Chapultepec rebombeos fuente de Xochipilli, Tanque Zaragoza, Panteón Dolores, Central Poniente, Paseo de la Reforma, parque México y España, camellones de Polanco
6. <i>Ciudad Deportiva</i>	Lateral del Viaducto Río de la Piedad, sin número, Col. Magdalena Mixhuca CP 08010, Alcaldía Iztacalco. Coordenadas 19.408368, -99.096767.	230	91.31	Lodos activados convencional	Contraprestación SACMEX 25 l/s, el resto del agua se distribuye al Foro Sol, Ciudad Deportiva, Palacio de los Deportes y Camellones de las inmediaciones

7. Coyoacán*	Avenida Heroica Escuela Naval Militar, No. 66, Col. Paseos de Taxqueña, CP 04250, alcaldía Coyoacán, Coordinadas 19.346501, -99.120216	250	184.13	Lodos activados convencional	Riego de áreas verdes de la zona Sur-Oriente, Tlalpan y Álvaro Obregón, abasto a zonas industriales y Canal nacional
8. El Llano	Bordo Sur del Canal Ameca Meca, esquina Puente de Tubos, Col. El Llano, Pueblo de San Juan Ixtayopan	250	68.78	Modificación de Lodos activados, torres de carbón activado	Riego agrícola de San Juan Ixtayopan y San Andrés Mixquic
9. El Rosario	Av. De las Culturas, sin número, Col. Unidad habitacional El Rosario, CP 02110, Alcaldía Azcapotzalco, coordenadas 19.510097, -99190870.	25	7.73	Lodos activados convencional, filtración con grava-arena y torres de carbón activado	Riego de áreas verdes en la alcaldía y llenado del lago del Parque Tezozomoc, suministro de la zona industrial
10. Iztacalco	Av. Girasol, sin número, Unidad habitacional Picos Iztacalco, CP 87050, alcaldía Iztacalco coordenadas 19.384299, -99.105864	13	7.13	Lodos activados convencional, filtración con grava-arena y torres de carbón activado	Riego de áreas verdes en la Unidad Habitacional INFONAVIT Iztacalco
11. La Lupita***	Calle Benito Juárez, sin número, Barrio La Lupita, Pueblo de San Juan Ixtayopan, CP 13500	15	13.8	Lodos activados convencional	Riego agrícola de ejidatarios de San Juan Ixtayopan
12. Parres	Calle Benito Juárez, sin número, Barrio La Lupita, Pueblo de San Juan Ixtayopan, CP 13500, alcaldía Tlalpan coordenadas 19.1373365, -99.1716377.	7.5	2.09	Lodos activados convencional	abasto de la planta procesadora de asfalto y riego de áreas verdes
13. Pemex Picacho	Boulevard Presidente Adolfo Ruiz Cortines, Periférico Sur, Un. 4091, Col. Fuentes del Pedregal, CP 14140, alcaldía Tlalpan coordenadas 19.1373365, -99.1716377	13	11.33	Lodos activados convencional	Riego de áreas verdes de la Unidad Habitacional Pemex Picacho
14. Río Magdalena	Ferrocarril a Cuernavaca, Col. San Nicolás Totolapan, CP 10900, alcaldía Magdalena Contreras. Coordinadas 19.3028867, -99.2395590	50	15.55	Modificación de Lodos activados, filtración	Río Magdalena y control de la contaminación

15. Reclusorio Sur	Circuito Martínez de Castro, sin número, Col. Haxcallote, Pueblo de San Mateo Xalpa, alcaldía Xochimilco. Coordenadas 19.236897, -99.129225.	30	16.29	Adaptación de Lodos Activados convencional	Río San Lucas para control de contaminación
16. San Andrés Mixquic	Bordo Norte de Canal Ameca, sin número, Barrio Santa cruz, Pueblo de San Andrés Mixquic, CP 13640, alcaldía Tláhuac coordenadas 19.230691, -98.962377.	30	19.82	Modificación de Lodos activados	Riego agrícola Santa Cruz, El Triángulo t deportivo Emiliano Aguilar en Tláhuac
17. San Juan de Aragón*	Tlacos 135, San Juan de Aragón I secc, Gustavo A. Madero, Cp. 07969 Ciudad de México. Coordenadas: 19.4559450, -99.0980664	500	150.07	Lodos activados convencional	Llenado del lago y riego de áreas verdes del bosque de San Juan de Aragón, alameda oriente, auto lavados y deportivos de la zona
18. San Lorenzo Tezonco	Av. Canal de Chalco y Av. Heberto Catillo, Col. Unidad habitacional Villa de los Trabajadores del Distrito Federal, alcaldía Tláhuac, coordenadas 19.277814, -99.050199.	225	43.06	Aireación a contracorriente, filtración en medio sintético	Llenado de canales en San Gregorio Atlapulco y lago del Parque Ecológico de Tláhuac
19. San Luis Tlaxialtemalco	Av. 5 de mayo, sin número Barrio el artista, Pueblo San Luis Tlaxialtemalco, CP 16610,	150	77.11	Lodos activados convencional, filtración con grava-arena y antracita	Llenado de los canales para mantener la navegación en la zona chinampera de San Luis Tlaxialtemalco y San Gregorio Atlapulco, Vivero Acuexcomatl y deportivo de la zona
20. San Miguel Xicalco	Carretera Federal México Cuernavaca, KM. 25, Pueblo San Miguel Xicalco, CP 14090	7.5	5.5	Lodos Activados convencional	Riego de aéreas verdes y llenado de canales.
21. San Nicolás Tetelco	Cerrada 20 de noviembre, sin número, Col. Emiliano zapata, Pueblo de San Nicolás Tetelco, CP 13700, alcaldía Tláhuac coordenadas 19.211984, -98.967759	15	13.94	Lodos activados convencional	Zona agrícola de San Nicolás Tetelco
22. San Pedro Atocpan	Carretera Xochimilco-Oaxtepec, KM. 17+400, Pueblo de San Pedro Actopan, CP 12200	60	25.92	Modificación de Lodos activados, filtración	Zona agrícola de la alcaldía Milpa Alta

23. Santa Fe*	Calle Encina, sin número, Col. Jalapa Tepito, CP 02420, alcaldía Álvaro Obregón coordenadas 19°22'31.91" norte y 99°14'8.81".	280	43.3	Lodos activados convencional, filtración zeolita, torres de carbón activado	Saneamiento de la barranca Tlalpizahuaya y riego de áreas verdes Zedec Santa Fe
24. Santa Martha Acatitla***	Calzada Ermita Iztapalapa y calle Zacatepec, Col. Paraja Zacatepec, CP 09560	14	5.78	Lodos activados convencional, floculación química y adsorción (torres activado)	Complejos de Reclusorios de Santa Martha Acatitla y áreas verdes
25. Tlatelolco	Calle Lerdo, sin número, Unidad habitacional Nonoalco, Tlatelolco, CP 06900, alcaldía Cuauhtémoc coordenadas 19.452507, -99.140421.	22	8.06	Adaptación de Lodos Activados convencional	Unidad Habitacional Nonolco Tlatelolco, riego de la Alameda Central y Santa María la Rivera, deportivo Plutarco Elías Calles

* PTAR concesionada; ** PTAR en operación por CONAGUA, *** Fuera de operación al momento de realizar el muestreo (ver Anexo, Tabla A1)

Tabla elaborada con la información obtenida del censo de SACMEX 2020.

UBICACIÓN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CDMX

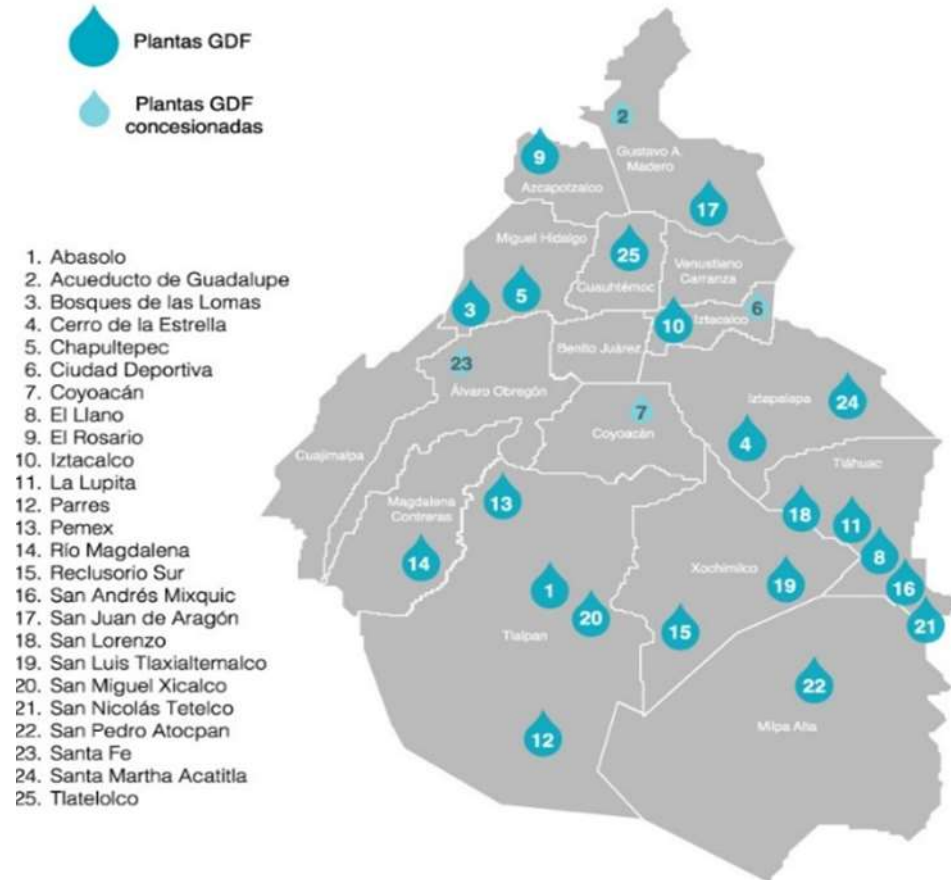


Figura 4.1 Ubicación de las 25 PTAR de la Ciudad de México (http://cuidarelagua.cdmx.gob.mx/plantas_tratamiento.html)

4.2 Cálculo de emisiones de metano in situ

Para llevar a cabo la cuantificación in situ de metano se empleó el método de la cámara estática (EPA,1986), por ser preciso, simple y versátil.

Se utilizó una cámara estática utilizada por Paredes (2016) con las siguientes medidas (Figura 4.2):

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>
<i>Diámetro externo (anillo de sello)</i>	0.50 m
<i>Diámetro interno (base)</i>	0.40 m
<i>Altura</i>	0.178 m
<i>Área de superficie</i>	0.125 m
<i>Volumen del espacio vacío</i>	0.0318 m ³



Figura. 4.2 Cámara estática utilizada en este estudio (2 unidades).

Para la medición de metano se utilizó un equipo portátil Biogas 5000 (Geotech, USA).



Parámetro	Rango	Error		
CH ₄	0-100 % (vol)	0-5% ±0.3%	0-70%± 0.5%	70-100% ±1.5% FS
CO ₂	0-100 % (vol)	0-5% ±0.3%	0-60%± 0.5%	60-100% ±1.5% FS
O ₂	0-25 % (vol)	0-25% ±1.0% (vol)		
H ₂ S	0-5000 ppm	0-5000 ppm ± 2.0 % FS		
Flujo de gas	550 cc/min			

4.2.1 Protocolo de muestreo.

1. Colocar las dos cámaras en el sedimentador primario, ubicándolas en una zona cercana a la entrada y a la salida del tanque.
2. Verificar que la cámara estática quede sumergida a 5 cm de profundidad.
3. Tomar un análisis inicial del contenido de gases dentro del cámara justo después de haberla colocado.






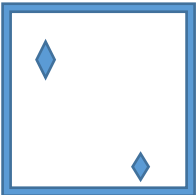

4. Realizar mediciones de la concentración de gases con ayuda del equipo Biogás 5000 en periodos de 30 min. Durante un tiempo total de 2 horas (figura 4.3).


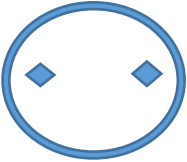


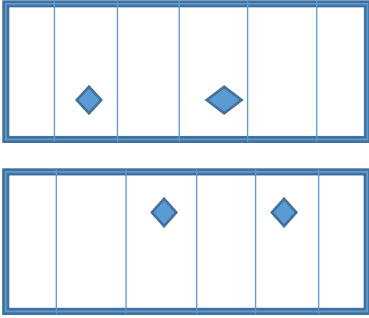






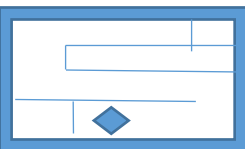
Figura 4.3 Ubicación de la cámara estática dentro del sedimentador. Se muestra el tubo flexible para tomar la muestra con el equipo Biogás 5000.

En la Tabla 4.2 se presentan detalles de la ubicación de las cámaras estáticas en los sedimentadores de las PTAR que cuentan con este elemento.

Tabla 4.2 Puntos de localización de las cámaras estáticas dentro del sedimentador en las PTAR que cuentan con este equipo.

PTAR	Dimensiones del sedimentador	UBICACIÓN DE CAMARA ESTATICA
Abasolo	Diametro: 6m	
A. Guadalupe	Largo: 18m Ancho: 3m	
C. Estrella	Largo: 43m Ancho: 20m	
C. Deportiva	Largo: 24m Ancho: 13m	
Coyoacán	Largo: 28m Ancho: 10m	
El Llano	Largo: 18m Ancho: 11m	
Rosario	Largo: 15m Ancho: 3m	

Iztacalco	Largo: 8m Ancho:4m	
Parres	Diametro: 5m	
Pemex	Diametro: 10m	
R. Sur	Diametro: 9m	
Sj. Aragón	Largo: 24m Ancho:7 m	
Tlaxialtemalco	Diametro:16m	
Xicalco	Diametro: 4m	

Tetelco	Diametro: 8m	
Sta. Fe	Largo: 28m Ancho: 18m	
Tlatelolco	Largo: 4m Ancho: 2m	

4.3.2 Calculo de las emisiones de CH₄.

Las emisiones de metano fueron calculadas por el método de regresión lineal basada en los cambios de concentración respecto al tiempo con ayuda de la siguiente ecuación.

$$E_{CH_4} = \frac{\Delta C}{\Delta t} \left(\frac{Volumen}{Area} \right) \quad (Eq. 4)$$

Donde:

E_{CH_4} = Emisiones de metano en (mg/m²h)

$\frac{\Delta C}{\Delta t}$ = El valor de la pendiente obtenida por medio del análisis de regresión lineal considerando el incremento en la concentración respecto al tiempo en (mg/m³h)

Volumen = El volumen de fase gas de la cámara 0.0318 m³

Área = Superficie cubierta por la cámara 0.125 m²

El cálculo para las emisiones de CH₄ producidas por los sedimentadores primarios se realiza de la siguiente manera.

Una vez efectuadas las mediciones en el periodo de 2 horas, se realiza una gráfica con los datos obtenidos para conocer la tasa de aumento (pendiente de la recta) de la concentración de metano dentro de la cámara estática con respecto al tiempo mediante el análisis de regresión lineal considerando como criterio un valor de r² mayor a 0.85.

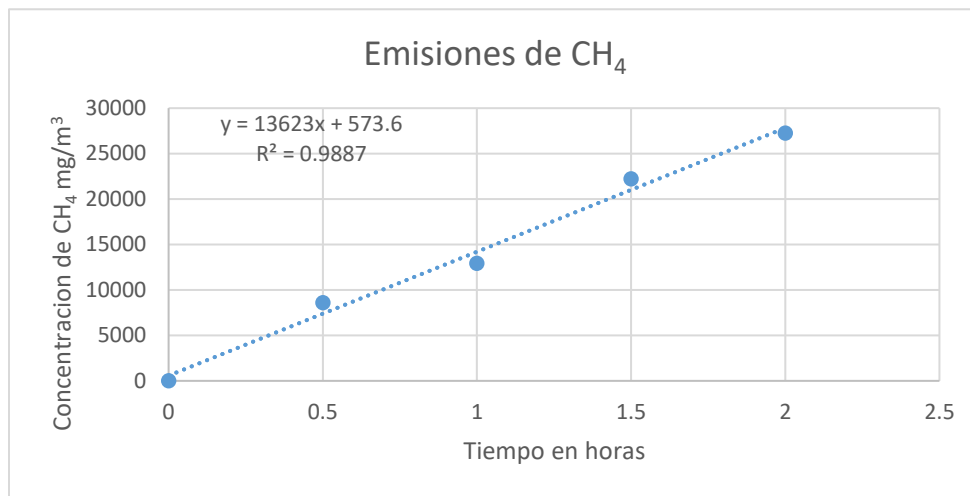


Figura 4.4 Ajuste del incremento en el tiempo de la concentración de CH₄ en la cámara estática colocada en el sedimentador primario de la PTAR Cerro de la Estrella

Una vez obtenido el valor de la pendiente, ésta se introduce en la ecuación 4.




$$E_{CH_4} = 13623 \frac{mg}{m^3 h} * \left(\frac{0.0318 m^3}{0.125 m^2} \right)$$

El valor obtenido $E_{CH_4} = 3465.7 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ representa las emisiones del sedimentador primario captadas por una cámara. Cuando se utilizaron dos cámaras, se calculó el promedio de los valores obtenidos en ambas cámaras.

4.3 Determinación de Metano disuelto en agua.

El método empleado para el análisis del metano disuelto es descrito por S. Lopez (2018) siendo una combinación de las técnicas descritas por F. Gal'chenko et al. (2004) y Daelman et al. (2012).

Los materiales y equipos utilizados fueron:

<i>Botellas serológicas (160 ml)</i>	
<i>Jeringas de 20 ml</i>	
<i>Jeringa Hamilton Pressure lock</i>	

Cromatógrafo de gases SRI con detector de ionización de flama

Columna Porapak Q de acero inoxidable (3 pies de longitud, 1/8 de diámetro), temperatura del horno 136°C, nitrógeno como gas acarreador (2 psi), aire (2.6 psi) e hidrógeno (2 psi) para la flama.

Temperatura del horno 136°C



El protocolo de muestreo es el siguiente.

1. Se agregan 20 g de cloruro de sodio (sal común) en una botella serológica de 160 ml sellándola con un tapón plástico y colocando un aro metálico para evitar fugas de gas o líquido.
2. Justo antes de realizar el muestreo, extraer de la botella sellada con ayuda de una jeringa 40 ml de aire. Este volumen será el mismo de líquido a introducir.
3. Extraer del punto de muestreo el agua residual a analizar con ayuda de un recipiente tratando de evitar turbulencias.
4. Tomar con la jeringa el volumen de la muestra e inyectarlo a la botella sellada; etiquetar la muestra con los datos del sitio.
5. Almacenar la muestra a temperatura ambiente; previo al análisis, agitar vigorosamente la botella y dejar reposar durante 5 min.
6. Extraer 1 ml de la fase gaseosa con ayuda de una jeringa Hamilton Pressure-Lok, que conserva la misma presión de la botella, e inyectarla al cromatógrafo de gases.

7. El área de los picos obtenida por el integrador que recibe la señal del cromatógrafo, se relaciona con la curva de calibración previamente cargada (ver anexo). De ahí se obtendrá el valor del metano disuelto en mg/L.

4.3.1 Cálculo de la concentración de metano disuelto.

La concentración de metano disuelto se calcula a partir de la concentración conocida en la fase gaseosa después del equilibrio; para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$CH_{4\ dis} = Y^{CH_4} \left(\frac{M_{CH_4} * V_g}{V_{mol} * V_l} \right) * 1000 \text{ (Eq. 5)}$$

Donde:

$CH_{4\ dis}$ = Concentración de metano disuelto (mg/L)

Y^{CH_4} = concentración de CH_4 en la fase gas, determinada en el cromatógrafo (fracción v/v)

V_g = Volumen de la fase gaseosa (L)

V_l = Volumen de la fase líquida (L)

M_{CH_4} = Masa molecular del metano 16 (g/mol)

V_{mol} = volumen molar del CH_4 a condiciones locales (25° y 0.771 atm): 31.7 L/mol

1000 = factor de conversión a mg/L

El flujo másico total de metano disuelto que ingresa a la PTAR se estima con la siguiente ecuación:

$$C CH_{4dis} = CH_{4dis} * Q_{agua} \quad (Eq. 6)$$

Donde:

$C CH_{4dis}$ = Flujo másico de metano disuelto que ingresa (kg/día)

CH_{4dis} = Concentración de metano disuelto (kg/m³)

Q_{agua} = Gasto de agua residual que ingresa a la planta (m³/día)

Para convertir el metano a unidades equivalentes de CO₂ se utiliza la ecuación:

$$CO_{2eq} = GWP_{CH_4} * C CH_{4dis} \quad (Eq. 7)$$

Donde:

CO_{2eq} = Flujo másico de metano disuelto en kilogramos de CO_{2eq} (kg CO_{2eq}/día)

GWP_{CH_4} = Potencial de calentamiento global del metano es 34(kg CO_{2eq}/kg CH₄)

$C CH_{4dis}$ = Flujo másico de metano disuelto (kg/día)

Para el cálculo de la concentración de metano disuelto se utiliza la ecuación 5 sustituyendo los valores correspondientes. A manera de ejemplo se tomará la concentración obtenida para la planta Tlatelolco " $Y^{CH_4} = 0.28\%$ " lo que corresponde a la concentración volumen/volumen del CH₄ obtenida con ayuda del cromatógrafo.

$$CH_{4dis} = 0.0028 \left(\frac{L}{L} \right) \left(\frac{16.04 \left(\frac{g}{mol} \right) * 0.12(L)}{31.7 \left(\frac{L}{mol} \right) * 0.04(L)} \right) * 1000$$

Lo cual resulta en una concentración de **4.250 mg CH₄/L**.

4.4 Parámetros fisicoquímicos.

Los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y temperatura se obtuvieron con ayuda de un equipo multiparamétrico marca HANNA modelo HI 9828.

El análisis de DQO se realizó por medio del kit para DQO rango medio 0-1500 mg/L marca HANNA y el espectrofotómetro modelo HI83099-01

Multiparamétrico
HANNA



ESPECIFICACIONES		HI 9828
pH	Rango	0,00 a 14,00 pH
	Resolución	0,01 pH
	Precisión	±0,02 pH
Conductividad	Rango	0,000 a 200,000 mS/cm (CE absoluto hasta 400 mS/cm)
	Resolución	Manual: 1 µS/cm; 0,001 mS/cm; 0,01 mS/cm; 0,1 mS/cm; 1 mS/cm; Automática: 1 µS/cm de 0 a 9999 µS/cm; 0,01 mS/cm de 10,00 a 99,99 mS/cm ; 0,1 mS/cm de 100,0 a 400,0 mS/cm; Automática mS/cm: 0,001 mS/cm de 0,000 a 9,999 mS/cm; 0,01 mS/cm de 10,00 a 99,99 mS/cm; 0,1 mS/cm de 100,0 a 400,0 mS/cm
	Precisión	±1% de lectura o ±1 µS/cm (el que sea mayor)
Temperatura	Rango	-5,00 a 55,00°C; 23,00 a 131,00°F; 268,15 a 328,15K
	Resolución	0,01°C; 0,01°F; 0,01K
	Precisión	±0,15°C; ±0,27°F; ±0,15K

Kit para DQO HANNA



Intervalo: 0-1500 mg/L O₂

Resolución: 1 mg/L

Exactitud: ±15 mg/L ±4% de la lectura

Método: Dicromato EPA

Espectrofotómetro HANNA



Fuente de Luz: lámpara de tungsteno con filtro de banda angosta

Detector de Luz: foto celda de silicio

4.5 Cálculo de emisiones teóricas de metano.

Las emisiones teóricas de metano provenientes de las PTAR se estimaron siguiendo el método establecido en los lineamientos del IPCC para los gases de efecto invernadero en el volumen 5, capítulo 6: Tratamiento y disposición de agua residual (IPCC, 2006). Se aplicó el método “Nivel 1” utilizando factores de emisión por defecto y el “Nivel 2” con un factor de corrección del metano (MCF) para el país y el cálculo de la producción de lodos biológicos (S) basado en la variante del proceso de lodos activados correspondiente (convencional o aeración extendida).

Para ello, en el procedimiento de cálculo se utilizaron los datos de caudal de agua residual alimentada a cada PTAR, así como la concentración de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) para la entrada y la salida de cada una de ellas. De esta forma, se evita realizar el cálculo de estimaciones basadas en población servida (P) y el factor de generación anual de DBO por habitante servido, aproximaciones que incrementan la incertidumbre del resultado.

Los valores de DBO de entrada y salida, así como el caudal tratado para cada PTAR se presenta en la Tabla A1 del Anexo I.

4.5.1 Estimación con base en el Nivel 1.

El método nivel 1 (Nivel 1), el cual utiliza valores por defecto recomendados por el IPCC. Primeramente, se calcula el factor de emisión de metano (EF) correspondiente al tipo de tratamiento:

$$EF_j = B_0 * MCF_j \quad (Eq. 1)$$

Donde:

EF_j = Factor de emisión de metano (kg CH₄/kg DBO)

J= tipo de tratamiento o sistema de descarga

B_0 =Capacidad máxima de producción de metano (kg CH₄/kg DBO)

MCF_j = Factor de corrección del metano (valor por defecto recomendado por el IPCC).

Para realizar el cálculo de las emisiones de metano por PTAR se aplica la ecuación:

$$\text{Emisión de CH}_4 = EF * (TOW - S) - R \quad (Eq. 2)$$

Donde:

Emisión de CH₄ = Cantidad de metano emitida en el año de inventario kg CH₄/año)

TOW =materia orgánica total en el agua residual en el año del inventario (kg DBO/año).

S = materia orgánica removida en forma de lodo en el año del inventario (kg DBO/año).

R = Cantidad de metano recuperado (o quemado) en el año del inventario (kg CH₄/año)

El procedimiento basado en el IPCC (2006) procedimiento consta de los siguientes pasos

1. Determinar la cantidad de materia orgánica biodegradable en el influente (TOW) para cada PTAR (kg DBO/año)
2. Estimar la cantidad de DBO que es retirada en forma de lodo (S). El valor por defecto que recomienda el IPCC (2006) es cero.
3. En el caso que exista la producción de biogás en la PTAR (digestores anaerobios), cuantificar la masa de metano (R) que es quemada en antorcha o bien aprovechada en producción de energía, dentro o fuera de la PTAR. El valor por defecto recomendado por el IPCC (2006) es cero.
4. Seleccionar el factor de corrección de metano (MCF), para los diferentes tipos de fuentes emisoras (procesos o sistemas) de acuerdo con la Tabla 6.2 del manual del IPCC (2006). Para el caso de este estudio, se refiere a la tecnología de tratamiento.
5. Definir la capacidad máxima de producción de metano a partir de la DBO (B₀), la cual puede ser obtenida para el país o bien tomar el valor recomendado por el IPCC (0.6 kgCH₄/kgDBO).
6. Aplicar la ecuación 1 para calcular el factor de emisión (EF_i)
7. Aplicar la ecuación 2 para obtener el resultado (emisiones anuales de metano)

Este procedimiento se aplicó a cada una de las PTAR consideradas (Tabla 4.1). Los valores por defecto que requiere las ecuaciones 1 y 2 fueron, de acuerdo con lo recomendado por el IPCC (2006):

$MCF = 0$ (valor para plantas de tratamiento aerobias centralizadas, para plantas bien operadas)

$B_o = 0.6 \text{ kgCH}_4/\text{kgDBO}$

Para S y R se adoptó el valor por defecto recomendado por el IPCC (2006) de cero, en ambos casos. Es importante señalar que en la realidad el valor no es cero para S, pues existe una corriente de lodos purgados en toda PTAR. El valor de R es efectivamente cero, al no existir ningún proceso anaerobio en los sistemas de tratamiento estudiados.

4.5.2 Estimación con base en el Nivel 2

Para el cálculo con base en Nivel 2 se optó por definir dos metodologías con base en referencias bibliográficas y las condiciones de operación actuales de las PTAR.

4.5.2.1 Metodología Nivel 2a.

Cuando se cuenta con un valor de factor de emisión propio para el país y para el tipo de actividad (tratamiento de aguas residuales con determinada tecnología), puede aplicarse el siguiente nivel de la metodología de cálculo de emisiones (Nivel 2), de acuerdo con el IPCC (2006).

Para ello, se ha publicado para México un factor de corrección de metano (MCF) recomendado para plantas de tratamiento aerobias (lodos activados, sin

componente de proceso anaerobio) con base en mediciones en campo en el país y en datos de la literatura (Noyola et al., 2018). Este valor es de 0.06 para plantas bien operadas, vs el valor de 0 recomendado por IPCC, (2006). Por lo tanto, aplicando la ecuación 1, se considera el factor de emisión de metano (EFj) de 0.036 kg CH₄/kg DBO para las PTAR de la Ciudad de México con base en Nivel 2.

Para aplicar el Nivel 2 es necesario definir los valores de S, al no ser ya aceptable tomar el recomendado por defecto (0) que como se señala arriba, que no es realista. De la Tabla 4.1 se identifica que todos los procesos de tratamiento considerados en este estudio son del mismo tipo (lodos activados convencionales y lodos activados con aeración extendida) con algunas variantes (membranas, contracorriente) que no modifican sustancialmente el tipo de proceso biológico. La producción de lodo de purga es diferente entre los lodos activados convencionales y la aeración extendida. La razón de ello es que, en la segunda, el tiempo de residencia de lodos es significativamente mayor (20 a 30 días) que el de la versión convencional (5 a 15 días), lo que implica la digestión del lodo en el mismo tanque de aeración, resultando en una producción menor de lodo de purga y más digerido (mineralizado) para la variante de aeración extendida.

Con base en juicio experto, se determinó el factor de producción de lodos (FS) que representa la fracción de la materia orgánica removida por el proceso de tratamiento y que es retirada en forma de lodo (expresado como DBO) se consideró como se presenta a continuación:

Lodos activados convencionales: FS = 0.45 kg DBO_{lodo}/kg DBO_{rem}

Aeración extendida: $FS = 0.30 \text{ kg DBO}_{\text{lodo}}/\text{kg DBO}_{\text{rem}}$

DBO_{lodo} es la cantidad de DBO en el lodo retirado del tratamiento

DBO_{rem} es la cantidad de DBO removida o eliminada por en proceso de tratamiento

Para el cálculo de la DBO del lodo, a partir de sólidos volátiles (SV), la unidad comúnmente utilizada, se aplicaron los siguientes factores de conversión para la variante lodos activados convencionales: $1 \text{ kg SV} = 1.42 \text{ kg DQO}$ y $1 \text{ kg DBO} = 2 \text{ kg DQO}$, que en combinación resulta en $1 \text{ kg SV} = 0.7 \text{ kg DBO}$

Para la aeración extendida, los factores son $1 \text{ kg SV} = 1.42 \text{ kg DQO}$ y $1 \text{ kg DBO} = 2.4 \text{ kg DQO}$, que en combinación resulta en $1 \text{ kg SV} = 0.6 \text{ kg DBO}$

En el anexo se presentan detalles del procedimiento de cálculo aplicado.

4.5.2.2 Metodología Nivel 2b.

Se seguirá la misma metodología Nivel 2a, aplicando el ajuste en la clasificación de la variante de lodos activados para las PTAR convencionales que estén operando con un caudal menor al 66% en referencia al de diseño. Tales instalaciones se asumirán como tipo aireación extendida y se tomará el valor de K_{rem} ($0.3 \text{ kg DBO}_{\text{lodo}}/\text{kg DBO}_{\text{rem}}$). Esto se apegará más a la realidad de operación, ya que el tiempo de retención hidráulica aumenta y la relación sustrato/microorganismos (carga orgánica) disminuye, generando condiciones similares a las plantas con el sistema de aireación extendida.

4.5.3 Estimación con base en Nivel 1 aplicando IPCC (2019).

Para determinar el valor de las emisiones de CH₄ siguiendo la más reciente versión del manual del IPCC (2019), se realiza aplicando la misma ecuación del Nivel 1 versión 2006 (Ecuación 2). El cambio consiste en la actualización del factor de corrección de metano (MCF) para plantas aerobias, de 0.03, y la introducción de una nueva ecuación para el cálculo del término S, la cantidad de DBO contenida en los lodos de purga:

$$S_{aerobio} = S_{masa} * K_{rem} * 1000 \quad (Eq. 3)$$

Donde:

$S_{aerobio}$ = componente orgánico removido del agua residual (en forma de lodo) por procesos aerobios, kgDBO/año

S_{masa} = Cantidad de lodo crudo removido del tratamiento de agua residual, en base seca, toneladas ST/año

K_{rem} = factor de conversión de masa base seca (ST) de lodo a masa de DBO, kgDBO/kgST

En consecuencia, se obtiene un factor de emisión (EF) para plantas aerobias centralizadas de 0.018 kg CH₄/kg DBO y un valor de K_{rem} indicado por IPCC (2019) de 0.8 kgDBO/kgST para plantas de tratamiento aerobias con sedimentador primario y de 1.16 kgDBO/kgST para plantas aerobias sin sedimentador primario. Es importante señalar aquí que estos valores tienen una importante sobreestimación si se analizan con base en un balance de masa de los procesos biológicos que se llevan a cabo en esos sistemas de tratamiento. Constituye, por lo

tanto, una importante imprecisión en la metodología más reciente del IPCC que resulta en una subestimación de las emisiones de metano.

Resultados.

En la tabla 5.1 se presenta un resumen de los resultados preeliminares obtenidos del análisis in situ de emisiones en los sedimentadores y el análisis a las muestras del influente para metano disuelto en fase líquida, así como los parámetros fisicoquímicos. En la tabla no se incluyen las plantas de tratamiento a las que no se tuvo acceso (La Lupita y Santa Marta Acatitla).

Tabla 5.1 Datos obtenidos durante el muestro en 23 PTAR (valores puntuales)

PTAR	Emisiones CH ₄ mg/m ² h en sedimentador	mg/l CH ₄ disuelto en influente	pH	Temperatura °C	Conductividad mS/cm	DQO mg/l
1. Abasolo.	ND	1.206	8.15	14.6	1.978	2357
2. A. Guadalupe	474.3	1.365	8.13	24.7	1.574	526
3. B. Lomas	NA	0.971	8.43	20.7	0.641	443
4. C. Estrella	3119.1	0.980	7.36	23.1	0.435	228
5. Chapultepec	NA	0.434	8.10	22	0.588	460
6. Cd. Deportiva	1368	2.825	7.38	23.5	1.501	411
7. Coyoacán	2298.2	1.488	7.65	22	0.614	408
8. El Llano	11746.9	2.613	7.75	19.6	1.044	630
9. El Rosario	182.4	2.035	7.70	22.4	0.753	178
10. Iztacalco	1222.5	5.758	7.73	24.3	1.043	852
12. Parres	346.6	0.451	8.49	17.0	1.750	1529
13. Pemex P.	ND	0.961	8.72	20.8	1.030	425
14. R. Magdalena	NA	1.079	8.03	19.8	0.566	395
15. R. Sur	4300.9	1.716	8.64	18.3	1.074	1432
16. SA. Mixquic	NA	3.560	7.64	20.9	1.717	339
17. SJ. Aragón	1045.8	1.412	8.24	21.3	1.253	214
18. SL. Tezonco	NA	3.129	7.64	21.1	0.677	401
19. SL. Tlaxialtemalco	10105.3	0.444	7.24	18.6	0.724	306
20. SM. Xicalco	2430.7	1.903	7.38	24.3	2.095	1246
21. SN. Tetelco	NA	0.333	8.01	18.6	1.281	2280
22. SP. Atocpan	ND	1.804	8.28	19.4	0.348	170
23. Santa Fe	8828.4	2.128	8.20	17.6	2.317	1862
25. Tlatelolco	ND	4.316	7.80	21.1	0.748	295

ND = No detectado NA= No aplica (no cuenta con sedimentador primario)



Fig.5.1. Muestreo en campo. Cuantificación de emisiones en sedimentador primario (izquierda) y toma de muestra para análisis de metano disuelto (derecha).

De la información obtenida durante la etapa de muestreo se observó que los valores oscilaron de 0.18 hasta 11.7 g CH₄/m² h⁻¹ coincide con datos reportados por Lorenzo-Toja et al 2016, G. Paredes,2016 y Wang *et al*, 2011 en emisiones en PTAR.

Los datos obtenidos del metano disuelto que ingresa a la PTAR oscilan de 0.3 mg CH₄/L a 5.8 mg CH₄/L los cuales son valores superiores a los obtenidos por S. López 2018, similares a los reportados por Liu, 2014 y Guisasola, 2008 lo cual demuestra la gran carga de metano que ingresa a las PTAR y que no considera significativa la metodología IPCC.

5.1 Cálculo de emisiones de CH₄ con base en datos de muestreo en campo

El cálculo para las emisiones anuales considera el área y número de sedimentadores en operación. Posteriormente se realiza la conversión a kilogramos equivalentes de CO₂ multiplicando por el potencial de calentamiento global (GWP) del metano que es 34 (IPCC,2013).}

Tabla 5.2 Emisiones de metano anuales provenientes de las unidades sedimentadoras.

<i>PTAR</i>	<i>Emisiones CH₄ mg/m²h</i>	<i>Área sedimentador en m²</i>	<i>Numero de sedimentadoras operando</i>	<i>Emisiones CH₄ Ton/año</i>	<i>Equivalente de CO₂ Ton/año</i>
1. Abasolo.	ND	28.3	1	ND	ND
2. A. Guadalupe	474.3	54	2	0.4	15.3
4. C. Estrella	3119.1	860	5	117.5	3994.6
6. Cd. Deportiva	1368.0	125	2	3.0	101.9
7. Coyoacán	2298.2	280	2	11.3	383.3
8. El Llano	11746.9	198	1	20.4	692.7
9. El Rosario	182.4	45	1	0.1	2.4
10. Iztacalco	1222.5	32	1	0.3	11.7
12. Parres	346.6	19.6	1	0.1	2.0
13. Pemex P.	ND	78.5	1	ND	ND
15. R. Sur	4300.9	63.6	1	2.4	81.5
17. S.J. Aragón	1045.8	168	4	6.2	209.3
19. SL. Tlaxiátemalco	10105.3	201.1	2	35.6	1210.3
20. SM. Xicalco	2430.7	12.6	1	1.0	33.0
21. SN. Tetelco	8828.4	50.3	1	1.1	36.4
23. Santa Fe	ND	504	2	ND	ND
25. Tlatelolco	ND	8	1	ND	ND

ND: No detectado

Posteriormente, para cuantificar la carga total de metano disuelto que ingresa a las PTAR se utiliza la ecuación 5 con los datos obtenidos en la tabla 5.1. Una vez obtenido este dato se hará la conversión a kilogramos equivalentes de CO₂ considerando el caudal que recibe la planta anualmente en metros cúbicos. Los resultados se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Masa de metano que ingresa disuelto en un año a las plantas de tratamiento y equivalente en CO₂.

PTAR	mg/l CH ₄ disuelto inf	Caudal de agua m ³ /día	CH ₄ Ton/año	CO _{2eq} Ton/año
1. Abasolo.	1.2	191.8	0.1	2.9
2. A. Guadalupe	1.4	4655.2	1.7	56.1
3. B. Lomas	1	1894.8	0.7	24.4
4. C. Estrella	1	153211.4	51.9	1764.4
5. Chapultepec	0.4	8131.9	1.3	43.9
6. Cd. Deportiva	2.8	7889.1	8.1	276.6
7. Coyoacán	1.5	15908.8	8.6	293.9
8. El Llano	2.6	5942.6	5.5	188.1
9. El Rosario	2.0	667.9	0.4	15
10. Iztacalco	5.8	616	1.3	44
12. Parres	0.5	180.6	0.03	1
13. Pemex Picacho	1	978.9	0.3	11.7
14. R. Magdalena	1.1	1343.5	0.5	18
15. R. Sur	1.7	1407.4	0.9	30
16. SA. Mixquic	3.6	1712.4	2.2	75.7
17. SJ. Aragón	1.4	12966	6.8	232
18. SL. Tezonco	3.1	3720.4	4.2	144.5
19. SL. Tlaxialtemalco	0.4	6662.3	1.1	36.5
20. SM. Xicalco	2.1	475.2	0.4	12.6
21. SN. Tetelco	2	1204.4	0.8	28.4
22. SP. Atocpan	0.3	2239.5	0.3	9.3
23. Santa Fe	1.8	3741.1	1.8	61.9
25. Tlatelolco	4.3	696.4	1.1	37.3

Es importante mencionar que el metano emitido por los sedimentadores proviene del gas que entra disuelto en el influente, así como del que es producido por los lodos acumulados en esas unidades. La tabla 5.4 presenta la concentración de metano disuelto en el influente y en el sedimentador para aquellas plantas que cuentan con sedimentador primario. La diferencia entre ambos valores puede asociarse al metano producido en el sedimentador.

Tabla 5.4 Diferencia de metano disuelto en el influente y en el sedimentador primario por PTAR

<i>PTAR</i>	<i>CH₄ disuelto en influente (mg CH₄ /L)</i>	<i>CH₄ disuelto en sedimentador (mg CH₄/L)</i>	<i>Diferencia (mg CH₄/L)</i>	<i>% de incremento</i>
1. <i>Abasolo.</i>	1.2	4	+2.8	233%
2. <i>A. Guadalupe</i>	1	5.7	+4.7	307%
4. <i>C. Estrella</i>	1	3.2	+2.2	220%
6. <i>Cd. Deportiva</i>	2.8	3.5	+0.7	25%
7. <i>Coyoacán</i>	1.5	4.5	+3.0	575%
8. <i>El Llano</i>	2.6	18.3	+15.7	604%
9. <i>El Rosario</i>	1.8	2.4	+0.6	33%
10. <i>Iztacalco</i>	5.8	3.6	-2.2	-62%
12. <i>Parres</i>	0.5	2.8	+2.3	460%
13. <i>Pemex P.</i>	1	2.1	+1.1	110%
15. <i>R. Sur</i>	1.7	30.4	+28.7	1666%
17. <i>SJ. Aragón</i>	1.4	3.8	+2.4	171.%
19. <i>SL. Tlaxialtemalco</i>	0.4	5.3	+4.9	1225%
20. <i>SM. Xicalco</i>	2.1	41.5	+39.4	1876%
21. <i>SN. Tetelco</i>	1.9	18.1	+16.2	853%
23. <i>Santa Fe</i>	1.3	8.7	+7.4	383%
25. <i>Tlatelolco</i>	4.3	3.3	-1	-33%

La tabla 5.4 muestra que en general, los sedimentadores son productores de metano, en algunos casos en forma considerable. Vale notar las PTAR Reclusorio Sur, San Luis Tlaxialtemalco y San Miguel Xicalco, con incrementos de más de 10 veces con relación a la concentración de metano a la entrada. Solo dos PTAR presentaron valores inferiores en el sedimentador (Iztacalco y Tlatelolco).

En la tabla 5.5 se pueden visualizar los valores en toneladas de CH₄/año correspondiente a la concentración de metano disuelto que continuaría en el proceso de tratamiento después de pasar por la unidad sedimentadora en los casos que aplica.

Tabla 5.5 Masa de metano que ingresa al reactor biológico.

<i>PTAR</i>	<i>mg CH₄/L disuelto sedimentador</i>	<i>"Q" Caudal de agua m³/día</i>	<i>CH₄ Ton/año</i>
<i>1. Abasolo.</i>	4	191.8	0.3
<i>2. A. Guadalupe</i>	5.7	4655.2	9.7
<i>4. C. Estrella</i>	3.2	153211.4	167.6
<i>6. Cd. Deportiva</i>	3.5	7889.1	10
<i>7. Coyoacán</i>	4.5	15908.8	26.3
<i>8. El Llano</i>	18.3	5942.6	39.8
<i>9. El Rosario</i>	2.4	667.9	0.6
<i>10. Iztacalco</i>	3.6	616	0.8
<i>12. Parres</i>	2.1	180.6	0.2
<i>13. Pemex Picacho</i>	3.6	978.9	0.7
<i>15. R. Sur</i>	30.3	1407.4	15.6
<i>17. S.J. Aragón</i>	3.8	12966	18
<i>19. S.L. Tlaxialtemalco</i>	5.3	6662.3	12.8
<i>20. S.M. Xicalco</i>	41.5	475.2	7.2
<i>21. S.N. Tetelco</i>	18.1	1204.4	7.9
<i>23. Santa Fe</i>	8.7	3741.1	11.9
<i>25. Tlatelolco</i>	3.3	696.4	0.8
<i>Total</i>			330.2

Por lo que para fines de la cuantificación total de emisiones se tomará la concentración de metano disuelto correspondiente a la unidad sedimentadora ya que este incluye el que ingreso a la planta y la carga adicional generada durante el proceso.

Para estimar la fracción de metano disuelto que es desorbido en el tanque aerobio, se consideró lo reportado por Liu et al. (2014), Daelman et al. (2014), Hwang et al. (2016), Bao et al. (2016) y Baeten et al. (2021), información presentada en la Tabla 2.5 del Capítulo 2 (página 19). Con base en esta información, se consideró para este trabajo que un 40% del metano disuelto que ingresa al reactor biológico es

metabolizado por la biomasa del sistema, liberando a la atmósfera el resto (60%), lo que contribuye a la emisión total de la PTAR.

Con lo anterior, el cálculo de las emisiones anuales para cada PTAR integra dos elementos: la parte desorbida en el tanque de aireación (60% del metano que ingresa al mismo), más la emisión directa a la atmósfera por el sedimentador. En la tabla 5.7 se presentan los valores obtenidos para las emisiones totales de las 23 PTAR evaluadas.

En la Tabla 5.7 también se presentan las emisiones de metano por metro cubico de agua tratada. Este valor constituye un factor de emisión específico para cada una de las 23 PTAR. Destacan los altos valores (mayores a 0.6) de El Llano, R. Sur, SL Tlaxialtemaco y SM Xicalco, lo cual puede ser resultado de la importante producción de metano en sus unidades sedimentadores, que en parte se emite directamente en ellas, como otra parte se libera a la atmosfera en el tanque de aireación que le sigue.

Tabla 5.6 Emisiones totales de metano en equivalentes de CO₂ del sistema de tratamiento de aguas.

<i>PTAR</i>	<i>CH₄ Disuelto INF Ton/año</i>	<i>CH₄ Disuelto sedimentador Ton/año</i>	<i>CH₄ no oxidado (desorbido) Ton/año</i>	<i>Emisiones sedimentador CH₄ Ton/año</i>	<i>Total por PTAR CO₂eq Ton/año</i>	<i>Emisiones kg CO₂eq/m³ tratado</i>
1. Abasolo.	0.1	0.3	0.2	ND	5.8	0.08
2. A. Guadalupe	1.7	9.7	5.8	0.4	212.2	0.13
3. B. Lomas	0.7	NA	0.4	NA	14.6	0.02
4. C. Estrella	51.9	167.6	100.6	117.5	7414.0	0.10
5. Chapultepec	1.3	NA	0.8	NA	26.3	0.01
6. Cd. Deportiva	8.1	10	6	3.0	306.4	0.11
7. Coyoacán	8.6	26.3	15.8	11.3	920.0	0.16
8. El Llano	5.5	39.8	23.9	20.4	1504.0	0.73
9. El Rosario	0.4	0.6	0.4	0.1	14.4	0.06
10. Iztacalco	1.3	0.8	0.5	0.3	38.1	0.16
12. Parres	0.03	0.2	0.1	0.1	5.7	0.08
13. Pemex Picacho	0.3	0.7	0.4	ND	14.9	0.04
14. R. Magdalena	0.5	NA	0.3	NA	10.7	0.02
15. R. Sur	0.9	15.6	9.4	2.4	399.7	0.78
16. SA. Mixquic	2.2	NA	1.3	NA	45.4	0.07
17. SJ. Aragón	6.8	18	10.8	6.2	576.8	0.11
18. SL. Tezonco	4.2	NA	2.5	NA	86.7	0.06
19. SL. Tlaxialtemalco	1.1	12.8	7.7	35.6	1471.1	0.62
20. SM. Xicalco	0.4	7.2	4.3	1.0	179.9	1.14
21. SN. Tetelco	0.8	7.9	4.7	1.1	198.5	0.45
22. SP. Atocpan	0.3	NA	0.2	NA	5.6	0.01
23. Santa Fe	1.8	11.9	7.1	ND	243.7	0.18
25. Tlatelolco	1.1	0.8	0.5	ND	22.4	0.09
Total	100.03	330.2	203.7	199.4	13,716.7	

NA= no aplica (no hay sedimentador primario). ND= No detectado.

Con base en la Tabla 5.7, es posible establecer el total de emisiones de metano en equivalentes de CO_{2eq} año por las PTAR de la Ciudad de México, el cual es de **13,716.7 (ton CO_{2Eq}/año)**. Es válido señalar que al realizar el análisis en una única ocasión en un periodo de tiempo corto (2 horas) puede existir alta incertidumbre respecto a los valores obtenidos. Sin embargo, Ribera-Guardia et al. (2019) evaluaron las emisiones en la PTAR de Girona España en tres periodos de 11 días y mostraron que no existían diferencias significativas en el patrón de emisiones.

La Tabla 5.7 contiene las aportaciones de las emisiones de las dos fuentes (sedimentador y tanque de aireación) son de la misma importancia (alrededor de 200 Ton/año para el total de PTAR evaluadas). De aquí se desprende como primera medida de mitigación, el evitar la generación de metano en las unidades sedimentadoras. Al comparar la concentración de este gas en el influente y en el sedimentador, en casi la totalidad de los casos, la concentración se incrementa en un orden de magnitud. En la sumatoria, el metano disuelto que ingresa a las 23 PTAR es de 100 Ton/año, y el metano medido en los sedimentadores de las 17 PTAR que cuentan con esta etapa es de 330 Ton/año, lo que representa en forma global un incremento de tres veces.

Por otro lado, la oxidación más completa en el reactor biológico puede reducir las emisiones al limitar la fracción de metano disuelto que es liberado a la atmosfera en estas unidades. Para ello es necesario mantener en buenas condiciones esta etapa del proceso. En procesos con etapa previa anóxica de desnitrificación, el metano puede ser utilizado como fuente de carbono para las bacterias desnitrificantes, como

lo señalan varios autores (Haroon et al., 2013, Hu te al., 2011, Islas-Lima et al., 2004).

Es importante mencionar que en los valores de la **Tabla 5.7** el manejo de lodo de purga no está considerado, ya que no existe un proceso de tratamiento para este residuo en la mayoría de las PTAR. La práctica común en las instalaciones de la Cd. de México es la descarga de lodos al drenaje, salvo cuatro excepciones. El punto se discutirá en el apartado 5.5.

5.2. Cálculo de emisiones de CH₄ con base en IPCC.

En esta sección se considera el total de las 25 plantas de la Tabla 4.1, a pesar de que dos de ellas no se encontraban en operación al momento del estudio, como se ha mencionado. Para ello, se recurrió a los datos de bitácora proporcionados por SACMEX, en particular los datos de DBO influente y efluente, así como el caudal tratado.

5.2.1 Cálculo de emisiones de CH₄ basado en el Nivel 1 (2006)

Utilizando la metodología Nivel 1 indicada por el IPCC (2006) se calcularon las emisiones de CH₄ por PTAR.

Tabla 5.7 Emisiones de CH4 para 25 PTAR calculadas según el Nivel 1 (IPCC, 2006)

<i>PTAR</i>	<i>DBO Inf (mg/L)</i>	<i>TOW (ton/año)</i>	<i>CO₂EQ ton/año</i>
1. <i>Abasolo.</i>	743.3	52.0	0
2. <i>A. Guadalupe</i>	279.8	475.4	0
3. <i>B. Lomas</i>	225.1	155.7	0
4. <i>C. Estrella</i>	130.7	6,914.3	0
5. <i>Chapultepec</i>	264.7	785.7	0
6. <i>Cd. Deportiva</i>	164.3	473.1	0
7. <i>Coyoacán</i>	148.2	860.6	0
8. <i>El Llano</i>	304.0	659.4	0
9. <i>El Rosario</i>	161.6	39.4	0
10. <i>Iztacalco</i>	280.1	63.0	0
11. <i>La Lupita</i>	237.2	103.2	0
12. <i>Parres</i>	960.9	63.3	0
13. <i>Pemex Picacho</i>	282.8	101.0	0
14. <i>R. Magdalena</i>	127.5	62.5	0
15. <i>R. Sur</i>	276.5	142.0	0
16. <i>SA. Mixquic</i>	188.4	117.8	0
17. <i>SJ. Aragón</i>	189.1	875.4	0
18. <i>SL. Tezonco</i>	156.3	212.2	0
19. <i>SL. Tlaxialtemalco</i>	132.5	322.2	0
20. <i>SM. Xicalco</i>	769.3	133.4	0
21. <i>SN. Tetelco</i>	584.0	256.7	0
22. <i>SP. Atocpan</i>	773.0	631.9	0
23. <i>Santa Fe</i>	285.3	389.6	0
24. <i>SM. Acatitla</i>	260.2	47.4	0
25. <i>Tlatelolco</i>	187.2	47.6	0

Con base a la metodología señalada, se obtiene un total de emisiones de CH₄ en equivalentes de CO₂ para el sistema de tratamiento de aguas de la CDMX de 0 (tCO₂eq/año). Tal resultado se debe al factor de emisión con valor cero (0.0) recomendado por el IPCC para PTAR aerobias bien operadas. Ello implica que, en tales casos, no existiría producción de metano directa. Sin embargo, la evidencia en campo y la publicada, muestra que esta es una situación ideal (Noyola et al. 2018)

y por lo tanto no representativa de la realidad, donde el metano disuelto en el influente produce emisiones dentro de la PTAR.

5.2.2 Cálculo de emisiones de CH₄ basado en el Nivel 2 (2006)

La aplicación de la metodología del Nivel 2a, tomando el valor para MCF de 0.06 como indican Noyola et al. (2018) y valores de FS representativos de las dos tecnologías utilizadas en la Cd de México (0.45 kgDBO/kgST para lodos activados convencionales y de 0.3 kgDBO/kgST para aeración extendida) lleva a los valores de emisiones que se muestran en la Tabla 5.8 (cálculo Nivel 2a).

El total obtenido para las emisiones de CH₄ siguiendo la metodología Nivel 2a es de **7,150.6 (tCO₂eq/año)**.

Tabla 5.8 Emisiones de CH4 Calculadas teóricamente (Nivel 2a).

<i>PTAR</i>	<i>DBO Inf</i> (mg/L)	<i>DBO ef</i> (mg/L)	<i>TOWrem</i> (ton/año)	<i>Lodos</i> <i>Producidos(S)</i> (ton/año)	<i>CO₂EQ</i> (ton/año)
1. Abasolo.	743.3	26.1	50.2	31.2	23.3
2. A. Guadalupe	279.8	30.2	424.1	269.3	189.5
3. B. Lomas	225.1	17.3	143.7	43.1	123.1
4. C. Estrella	130.7	2.2	6,797.9	4,199.9	3180.0
5. Chapultepec	264.7	2.7	777.7	79.3	854.8
6. Cd. Deportiva	164.3	22.8	407.4	261.4	178.7
7. Coyoacán	148.2	15.4	771.1	489.0	345.3
8. El Llano	304.0	29.7	595.0	376.5	267.4
9. El Rosario	161.6	19.4	34.7	22.1	15.4
10. Iztacalco	280.1	25.2	57.3	36.2	25.9
11. La Lupita	237.2	27.2	91.4	27.4	78.3
12. Parres	960.9	78.8	58.1	36.6	26.3
13. Pemex Picacho	282.8	25.1	92.1	58.1	41.6
14. R. Magdalena	127.5	15.9	54.7	16.4	46.9
15. R. Sur	276.5	20.7	131.4	82.6	59.8
16. SA. Mixquic	188.4	20.7	104.8	31.4	89.8
17. SJ. Aragón	189.1	19.7	784.2	497.4	351.1
18. SL. Tezonco	156.3	23.9	179.8	53.9	154.0
19. SL. Tlaxialtemalco	132.5	14.4	287.2	182.4	128.3
20. SM. Xicalco	769.3	48.5	125.0	78.3	57.2
21. SN. Tetelco	584.0	45.8	236.6	148.8	107.4
22. SP. Atocpan	773.0	104.0	546.8	55.8	601.1
23. Santa Fe	285.3	18.1	364.9	228.5	166.9
24. SM. Acatitla	260.2	19.5	43.9	27.6	20.0
25. Tlatelolco	187.2	23.0	41.7	26.6	18.5
<i>Total</i>			13,201.9	7,359.9	7,150.6

5.2.2.1 Cálculo de emisiones de CH4 basado en el Nivel 2b.

La aplicación de la metodología Nivel 2b, toma los mismos factores de MCF y de producción de lodos que en el caso Nivel 2a, pero en esta ocasión considerando como variante de aireación extendida aquellas plantas con sistema de lodos

convencionales que traten un caudal menor al 66% en referencia al de diseño. Los resultados se presentan en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Emisiones de CH₄ Calculadas teóricamente (Nivel 2b).

<i>PTAR</i>	<i>DBO Inf</i> (mg/L)	<i>DBO ef</i> (mg/L)	<i>TOWrem</i> (ton/año)	<i>Lodos</i> <i>Producidos(S)</i> (ton/año)	<i>CO_{2EQ}</i> (ton/año)
1. <i>Abasolo.</i>	743.3	26.1	50.2	26.0	29.6
2. <i>A. Guadalupe</i>	279.8	30.2	424.1	227.1	241.2
3. <i>B. Lomas</i>	225.1	17.3	143.7	43.1	123.1
4. <i>C. Estrella</i>	130.7	2.2	6,797.9	3,491.4	4047.2
5. <i>Chapultepec</i>	264.7	2.7	777.7	79.3	854.8
6. <i>Cd. Deportiva</i>	164.3	22.8	407.4	221.6	227.5
7. <i>Coyoacán</i>	148.2	15.4	771.1	489.0	345.3
8. <i>El Llano</i>	304.0	29.7	595.0	317.0	340.3
9. <i>El Rosario</i>	161.6	19.4	34.7	18.7	19.6
10. <i>Iztacalco</i>	280.1	25.2	57.3	30.4	32.9
11. <i>La Lupita</i>	237.2	27.2	91.4	27.4	78.3
12. <i>Parres</i>	960.9	78.8	58.1	30.7	33.5
13. <i>Pemex Picacho</i>	282.8	25.1	92.1	58.1	41.6
14. <i>R. Magdalena</i>	127.5	15.9	54.7	16.4	46.9
15. <i>R. Sur</i>	276.5	20.7	131.4	69.3	76.1
16. <i>SA. Mixquic</i>	188.4	20.7	104.8	31.4	89.8
17. <i>SJ. Aragón</i>	189.1	19.7	784.2	419.1	446.9
18. <i>SL. Tezonco</i>	156.3	23.9	179.8	53.9	154.0
19. <i>SL. Tlaxialtemalco</i>	132.5	14.4	287.2	153.8	163.2
20. <i>SM. Xicalco</i>	769.3	48.5	125.0	78.3	57.2
21. <i>SN. Tetelco</i>	584.0	45.8	236.6	148.8	107.4
22. <i>SP. Atocpan</i>	773.0	104.0	546.8	55.8	601.1
23. <i>Santa Fe</i>	285.3	18.1	364.9	191.3	212.5
24. <i>SM. Acatitla</i>	260.2	19.5	43.9	23.1	25.4
25. <i>Tlatelolco</i>	187.2	23.0	41.7	22.5	23.5
<i>Total</i>			13,201.9	6,323.6	8,419

Al comparar los dos cálculos de Nivel 2 (Tablas 5.8 y 5.9) se identifica un incremento en las emisiones al considerar el tipo de operación real de la PTAR estudiadas (8,419.0 vs. 7,150.6 Ton/año), lo que representa un aumento del 18%.

5.2.3 Cálculo de emisiones de CH₄ basado en el Nivel 1 (2019)

Siguiendo la metodología actualizada para el Nivel 1, este propone tomar como MCF un valor de 0.03 sin distinguir plantas bien operadas y mal operadas. Además, para el cálculo de lodos extraídos (S) se introduce una nueva ecuación que incorpora el factor Krem para convertir la masa de lodo en base seca a masa de DBO (ver ecuación 3 en sección 4.2.3). Los valores recomendados para Krem por el IPCC son 0.8 y 1.16 kgDBO/kgST para lodos activados convencionales y aireación extendida respectivamente. Al respecto, se mencionó anteriormente que estos valores representan una importante imprecisión en la metodología más reciente del IPCC que resulta en una subestimación de las emisiones de metano. En cuanto a la variable TOW, no sufre cambios y representa el total que ingresa a la planta. Los resultados se muestran en la tabla 5.10.

5.10 Cálculo de emisiones de CH₄ basado en el Nivel 1 (2019).

<i>PTAR</i>	<i>DBO Inf</i> (mg/L)	<i>DBO ef</i> (mg/L)	<i>TOW</i> (ton/año)	<i>Lodos</i> <i>Producidos(S)</i> (ton/año)	<i>CO_{2EQ}</i> (ton/año)
1. Abasolo.	743.3	21.4	52.0	43.6	5.2
2. A. Guadalupe	279.8	29.6	475.4	368.6	65.4
3. B. Lomas	225.1	17.3	155.7	166.7	0
4. C. Estrella	130.7	2.3	6,914.3	5,849.0	652.0
5. Chapultepec	264.7	2.7	785.7	669.3	71.2
6. Cd. Deportiva	164.3	18.1	473.1	365.1	66.0
7. Coyoacán	148.2	17.0	860.6	883.7	0
8. El llano	304.0	24.1	659.4	525.3	82.1
9. El Rosario	161.6	6.4	39.4	32.6	4.1
10. Iztacalco	280.1	7.7	63.0	52.8	6.2
11. La Lupita	237.2	26.7	103.2	106.3	0
12. Parres	960.9	74.0	63.3	50.6	7.8
13. Pemex Picacho	282.8	20.4	101.0	81.1	12.2
14. R. Magdalena	127.5	11.1	62.5	49.4	8.0
15. R. Sur	276.5	20.0	142.0	152.9	0
16. SA. Mixquic	188.4	20.7	117.8	121.6	0
17. SJ. Aragón	189.1	19.7	875.4	679.9	119.7
18. SL. Tezonco	156.3	23.9	212.2	208.6	2.3
19. SL. Tlaxialtemalco	132.5	14.4	322.2	249.1	44.8
20. SM. Xicalco	769.3	48.5	133.4	108.0	15.6
21. SN. Tetelco	584.0	45.8	256.7	204.7	31.9
22. SP. Atocpan	773.0	104.0	631.9	634.3	0
23. Santa Fe	285.3	6.5	389.6	327.9	37.7
24. SM. Acatitla	260.2	14.8	47.4	38.6	5.4
25. Tlatelolco	187.2	23.0	47.6	36.2	6.9
<i>Total</i>			13,985	12,005.9	1,268.9

El cálculo del Nivel 1 (2019) arroja un total de **1,268.9 (tCO_{2eq}/año)**. Como se ha mencionado, los factores Krem recomendados producirán subestimaciones en el cálculo de emisiones siguiendo este procedimiento, puesto que se incrementa la salida de la DBO del sistema en forma de lodo.

5.3 Cálculo de emisiones de CH₄ específicas por PTAR con datos cinéticos y de balance de masa (BM)

Adicionalmente se comparó con el cálculo realizado por Morgan-Sagastume JM, (2021) el cual sigue la metodología Nivel 2 pero considerando valores de S específicos para la mayor parte de las PTAR estudiadas, calculados mediante un balance de masa con base en los datos de DBO influente y caudal alimentado de la Tabla 1 del Anexo. Para efectuarlo, se consideraron para cada PTAR dimensiones de los equipos y datos cinéticos, dando como resultado eficiencias de remoción de DBO y su correspondiente generación de lodos de desecho, en forma particular para cada instalación. Además, en los casos donde existe un digestor de lodos aerobio en operación, se tomó en consideración para calcular la producción de lodos. En la tabla 5.11 se muestra un comparativo de los resultados de emisiones basados en balance de masa (BM) específicos a cada PTAR y los datos obtenidos *in situ* (Tabla 5.7), exceptuando las dos plantas que no se encontraban en operación durante la visita (La Lupita y Santa Marta Acatitla).

Al calcular las emisiones y el factor de producción de lodos partiendo del balance de masa se obtienen para varias PTAR valores semejantes o relativamente cercanos con los obtenidos con datos medidos *in situ* (plantas A. Guadalupe, Cd. Deportiva, El Rosario, Iztacalco, SN. Tetelco y Tlatelolco). Sin embargo, hay plantas en las que los valores distan mucho entre sí, lo que puede deberse a la producción de CH₄ en el sedimentador, así como a la carga en el metano disuelto que ingresa a la PTAR. El comparativo de las emisiones totales, sin contemplar las dos plantas que no pudieron ser medidas *in situ*, de **10,672.9 ton CO₂Eq/año** para las calculadas

por balance de masa y **13,716.7 ton CO₂Eq/año** para las obtenidas *in situ*, indica emisiones **22% menores** para el caso del balance de masa.

Tabla 5.11 Comparación entre los valores de emisión calculados mediante balance de masa (BM) y obtenidas *in situ*.

PTAR	Factor generación de lodo (BM) kgDBO/kgST _{lodo}	Digestor aerobio de lodos	Ton CO ₂ eq/año (BM)	Ton CO ₂ eq/año (<i>in situ</i>)
1. Abasolo.	0.71	Si (no operando)	27.5	5.8
2. A. Guadalupe	0.56	NO	212.1	212.2
3. B. Lomas	0.4	NO	127.1	14.6
4. C. Estrella	0.51	SI	5839.8	7414.0
5. Chapultepec	0.34	NO	870	26.3
6. Cd. Deportiva	0.56	NO	220.1	306.4
7. Coyoacán	0.55	NO	437.7	920.0
8. El Llano	0.51	NO	429.0	1504.0
9. El Rosario	0.51	NO	25.3	14.4
10. Iztacalco	0.62	NO	35.0	38.1
11. La Lupita	0.45	NO	NA	SD
12. Parres	0.45	Si (no operando)	45.1	5.7
13. Pemex Picacho	0.34	Si (no operando)	86.7	14.9
14. R. Magdalena	0.41	SI	50.8	10.7
15. R. Sur	0.37	NO	84.7	399.7
16. SA. Mixquic	0.37	SI	107.6	45.4
17. SJ. Aragón	0.47	NO	304.94	576.8
18. SL. Tezonco	0.37	SI	169.4	86.7
19. SL. Tlaxialtemalco	0.37	SI	336.0	1471.1
20. SM. Xicalco	0.38	SI	115.0	179.9
21. SN. Tetelco	0.41	SI	212.7	198.5
22. SP. Atocpan	0.38	SI	531.1	5.6
23. Santa Fe	0.32	SI	372.8	243.7
24. SM. Acatitla	0.34	SI	NA	SD
25. Tlatelolco	0.5	NO	32.5	22.4
Total			10,672.9	13,716.7

SD: Sin datos; NA: No aplica

5.4 Comparación de los valores de emisiones de CH₄

De los resultados obtenidos *in situ* puede concluirse que el supuesto del Nivel 1, IPCC (2006) de que las plantas aerobias centralizadas bien operadas no emiten metano, no tiene sustento. Esto ha sido reconocido recientemente por el propio IPCC al incorporar un factor de corrección de metano recomendado diferente de cero (0.03) en su actualización más reciente (IPCC, 2019).

Respecto al Nivel 2a, sin distinción de la versión, considerando el valor de factor de corrección de metano por defecto (0.06) recomendado por Noyola et al. (2018) para México, y valores de Krem-DBO de 0.3 (aeración extendida) y 0.45 (lodos activados convencionales) se obtienen valores relativamente cercanos a las obtenidas *in situ* suponiendo plantas bien operadas, lo cual no fue siempre el caso para las PTAR visitadas, como lo muestra la producción de metano en la mayor parte de los sedimentadores primarios. Esta aportación no es considerada en el cálculo por Nivel 2 y constituye la principal causante de la diferencia en ambos cálculos.

Ahora bien, para el caso de Nivel 2b considerando las condiciones en las que se encuentran actualmente las PTAR referentes al caudal y la carga orgánica de operación se puede observar que el valor de las emisiones incrementa referente al Nivel 2a y es más cercano a lo obtenido *in situ* y mediante el método de balance de masas (MB). Con base en ello, es recomendable tomar en cuenta las condiciones reales de operación de las PTAR, y no solo basarse en condiciones de diseño, al momento de seguir esta metodología para el inventario de emisiones.

Considerando las modificaciones que se realizaron por parte del IPCC en el 2019, se puede observar que el cálculo por Nivel 1, al utilizar un factor de conversión de

metano de 0.03, ya presenta al menos valores en sus emisiones. En este cálculo, y a diferencia de la versión anterior (IPCC, 2006) que recomienda un valor S de cero (producción de lodos en masa de DBO por año), aquí se consideraron los nuevos valores de S recomendados (a partir de valores del nuevo factor Krem de 0.8 y 1.16). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, esos factores están sobredimensionados, lo que resulta en un exceso de lodos extraídos y no considerados en el cálculo de las emisiones, resultando en su subestimación, como se muestra claramente en la Figura 5.2.

Respecto a las emisiones calculadas por el método de balance de masas BM, se puede observar que es el más cercano a los valores in situ obtenidos, situándose en un valor intermedio entre aquel y el obtenido mediante el Nivel 2. Si bien el método BM es más específico también es más complejo, pues requiere datos reales de cada planta y el desarrollo de cálculos cinéticos y de balance de masa específicos para cada instalación. Por lo anterior, y como se muestra en la Figura 5.2, la metodología Nivel 2 representa una opción más accesible en cuanto a requerimiento de datos y con aceptable grado de confianza para construir un inventario de emisiones de PTAR.

Finalmente, es necesario reiterar que el cálculo de emisiones in situ refleja la realidad de la operación de las PTAR, que en este caso mostraron en su mayor parte, una producción de metano en las unidades sedimentadoras, aspecto que no contempla de ninguna forma la metodología del IPCC ni el procedimiento de balance de masa. De aquí se desprende que es necesario introducir en la metodología IPCC

un factor que corrija este faltante. En caso que las PTAR no operen en forma óptima, en particular la purga frecuente (y efectiva) de los lodos del sedimentador primario.

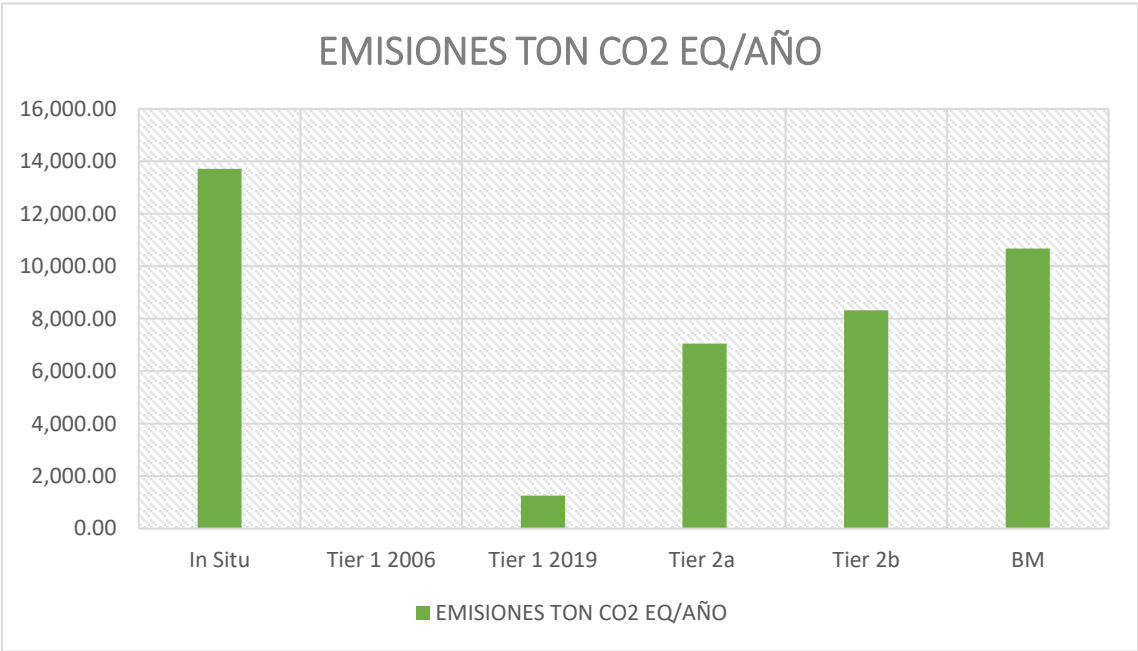


Figura 5.2 Comparación en el total de emisiones directas de metano calculadas con base en datos in situ, siguiendo las metodologías IPCC y con un balance de masa específico para cada instalación

5.5 Producción de CH₄ por lodos en drenaje.

Es importante recalcar que tanto los resultados obtenidos de las mediciones in situ y con las metodologías IPCC no se considera la aportación que tienen los lodos producidos durante el tratamiento ya que no existe información clara en la metodología sobre este apartado.

En este estudio, fue necesario evaluar la contribución que tendría la descarga de los lodos en el alcantarillado, práctica adoptada en casi la totalidad de las PTAR en la Cd de México.

Una vez descargados al drenaje, una fracción de la materia orgánica puede ser metabolizada a metano, bajo las condiciones de la red de drenaje (Guisasola, 2008; Foley 2009). A pesar de no ser condiciones óptimas para la digestión anaerobia, si presentaría una producción de metano.

Basado en la información obtenida por Daelman et al. (2012) y Appels et al. (2008), entre otros, se consideró una producción de 120 litros (condiciones normales) de CH₄ por kg SV de lodo (86 gCH₄/kg SV). Este valor representa alrededor de la tercera parte del metano que se produciría en un digestor anaerobio mesofílico alimentado con lodos de PTAR.

En la Tabla 5.12 se muestran los valores obtenidos por PTAR, con base en la producción de lodos S calculada por Nivel 2b anteriormente, considerando que cuatro PTAR no descargan sus lodos al drenaje, pues lo aplican en suelo (Chapultepec, SL. Tezonco, SP Atocpan y Santa Fe) y no aportarían a estas emisiones.

Tabla 5.12 Estimación en la Producción de CH₄ por lodos biológicos descargados al drenaje.

<i>PTAR</i>	<i>Lodos kg DBO/año</i>	<i>kg SV/año</i>	<i>Ton CH₄/año</i>	<i>Ton CO₂EQ/año</i>
1. Abasolo.	25991.4	15594.8	1.3	45.6
2. A. Guadalupe	227072.3	136243.4	11.7	398.4
3. B. Lomas	43113.4	25868.0	2.2	75.6
4. C. Estrella	3491391.2	2094834.7	180.2	6125.3
5. Chapultepec	79321.3	47592.8	0.0	0.0
6. Cd. Deportiva	221565.9	132939.5	11.4	388.7
7. Coyoacán	489001.6	293401.0	25.2	857.9
8. El Llano	316962.7	190177.6	16.4	556.1
9. El Rosario	18672.1	11203.2	1.0	32.8
10. Iztacalco	30420.4	18252.2	1.6	53.4
11. La Lupita	27417.4	16450.4	1.4	NA
12. Parres	30741.8	18445.1	1.6	53.9
13. Pemex Picacho	58107.1	34864.3	3.0	101.9
14. R. Magdalena	16418.1	9850.8	0.8	28.8
15. R. Sur	69252.2	41551.3	3.6	121.5
16. SA. Mixquic	31445.9	18867.6	1.6	55.2
17. SJ. Aragón	419111.9	251467.1	21.6	735.3
18. SL. Tezonco	53937.4	32362.4	0.0	0.0
19. SL. Tlaxialtemalco	153819.8	92291.9	7.9	269.9
20. SM. Xicalco	78276.1	46965.7	4.0	137.3
21. SN. Tetelco	148830.6	89298.4	7.7	261.1
22. SP. Atocpan	55778.6	33467.2	0.0	0.0
23. Santa Fe	191270.9	114762.5	0.0	0.0
24. SM. Acatitla	23122.3	13873.4	1.2	NA
25. Tlatelolco	22513.2	13507.9	1.2	39.5
<i>Total</i>			306.7	10,338.1

NA: No aplica (fuera de operación)

La aportación de CH₄ estimada a partir de los lodos descargados al drenaje es **10,426.8 ton CO₂EQ/año**. Si esta cantidad se adiciona a las emisiones calculadas *in situ* en la PTAR, se llegaría a un total de **24,054.9 ton CO₂EQ/año** (75% adicionales, con base en las emisiones *in situ* de las PTAR). Con respecto a las estimaciones basadas en el Nivel 2b, la sumatoria es **18,845.8 ton CO₂EQ/año** (123%

adicionales). En números generales, las emisiones estimadas del drenaje, debido a la descarga de los lodos recibidas, representa duplicar las emisiones de las plantas.

La magnitud relativa de las emisiones de los lodos en el drenaje lleva a considerar necesario un cambio en el destino actual de los lodos residuales. Esto constituiría una importante medida de mitigación. Además, si se aplica una digestión anaerobia, posiblemente centralizada para plantas cercanas, se podría aprovechar el biogás obtenido para uso energético, lo que reduciría la facturación eléctrica y las emisiones indirectas.

5.6 Emisiones indirectas

Hasta este punto, únicamente se han calculado las emisiones directas de metano por cada PTAR. Sin embargo, para un cálculo completo de la huella de carbono, debe considerarse la aportación de GEI por fuentes indirectas (particularmente asociadas al consumo de energía eléctrica en cada PTAR) ya que esto representa una fracción significativa del total de emisiones (huella de carbono). La justificación de ello es que la energía eléctrica que consume la PTAR viene asociada a una emisión de CO₂ procedente del uso de combustibles fósiles en la planta termoeléctrica generadora. La emisión se calcula con base en un factor de emisión de CO_{2EQ}/kWh producido, que es representativo de la red eléctrica de un país o región.

A continuación, la Tabla 5.13 presenta los valores de emisiones directas e indirectas en CO_{2EQ}/año, para las PTAR visitadas, exceptuando las dos que estaban fuera de

operación. En el cálculo no se consideran las emisiones estimadas producidas en el drenaje por la descarga de lodos.

Tabla 5.13 Emisiones directas e indirectas en Ton CO_{2EQ}/año por PTAR. No se incluyen las emisiones estimadas por la descarga de lodos en el drenaje

<i>Planta</i>	<i>Emisiones directas in situ Ton CO_{2EQ}/año</i>	<i>Emisiones directas Nivel 2b Ton CO_{2EQ}/año</i>	<i>Emisiones directas BM Ton CO_{2EQ}/año</i>	<i>Emisiones indirectas Ton CO_{2EQ}/año</i>
1. Abasolo.	5.8	29.6	27.5	185.4
2. A. Guadalupe	212.2	241.2	212.1	1100.9
3. B. Lomas	14.6	123.1	127.1	841.4
4. C. Estrella	7414.0	4047.2	5839.8	12739.1
5. Chapultepec	26.3	854.8	870	5982.3
6. Cd. Deportiva	306.4	227.5	220.1	1014.8
7. Coyoacán	920.0	345.3	437.7	1735
8. El llano	1504.0	340.3	429.0	1390.5
9. El Rosario	14.4	19.6	25.3	210.5
10. Iztacalco	38.1	32.9	35.0	145.9
11. La Lupita	SD	NA	NA	NA
12. Parres	5.7	33.5	45.1	149.6
13. Pemex Picacho	14.9	41.6	86.7	420.4
14. R. Magdalena	10.7	46.9	50.8	412.8
15. R. Sur	399.7	76.1	84.7	253.1
16. SA. Mixquic	45.4	89.8	107.6	332.7
17. SJ. Aragón	576.8	446.9	304.9	3365.2
18. SL. Tezonco	86.7	154.0	169.4	642.8
19. SL. Tlaxialtemalco	1471.1	163.2	336.0	613.3
20. SM. Xicalco	179.9	57.2	115.0	129.6
21. SN. Tetelco	198.5	107.4	212.7	509.7
22. SP. Atocpan	5.6	601.1	531.1	731.6
23. Santa Fe	243.7	212.5	372.8	2596.3
24. SM. Acatitla	SD	NA	NA	NA
25. Tlatelolco	22.4	23.5	32.5	292.3
Total	13,716.7	8,315.3	10,672.9	35,795.2
NA: No aplica (fuera de operación)				
SD: Sin datos (fuera de operación)				

En la Figura 5.3 puede apreciarse una aportación indirecta de **72% del total** de emisiones (**49,511.9 Ton CO₂Eq/año**) para las mediciones in situ, de **83%** para las emisiones teóricas calculas con Nivel 2b (**43,017.5 Ton CO₂Eq/año**) y de **77%** para las emisiones calculadas por BM (**46,468.1 Ton CO₂Eq/año**).

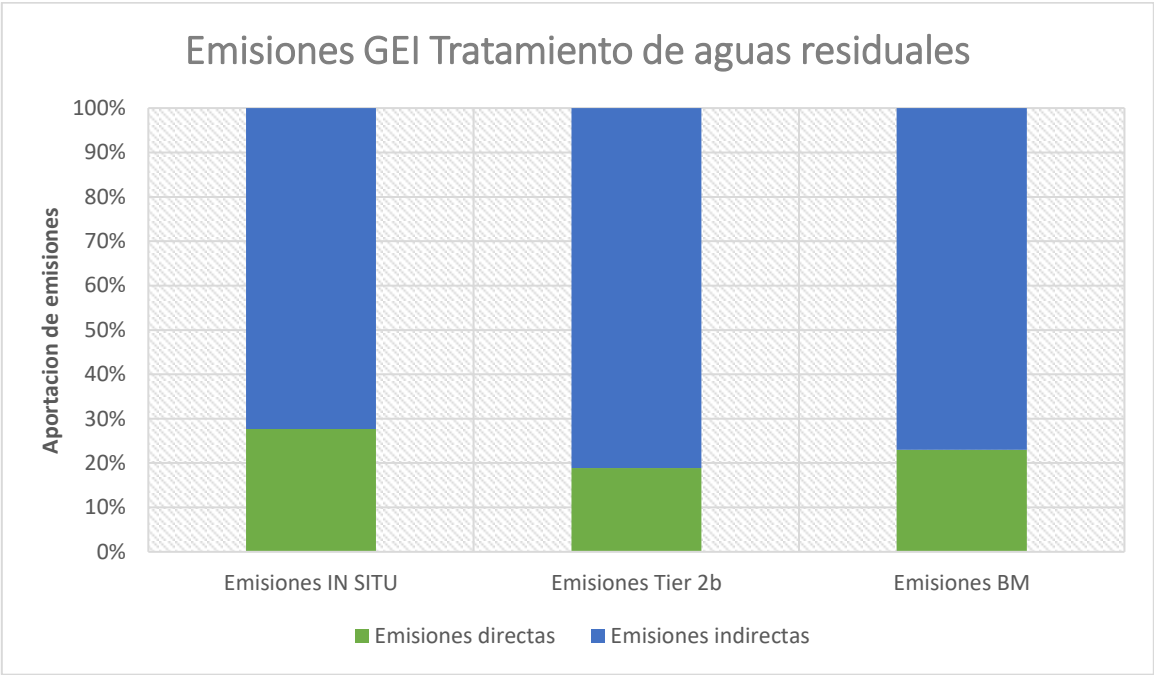


Figura 5.3 Porcentaje de aportación de las emisiones directas e indirectas para tres procedimientos de cálculo. No se incluyen las emisiones estimadas provenientes de la descarga de lodos en el drenaje

Como puede observarse, las emisiones indirectas superan en un amplio margen a los valores de las emisiones directas, por lo que disminuir las emisiones indirectas sería prioritario para una estrategia de reducción de emisiones en las PTAR de la Ciudad de México. Tal objetivo puede lograrse mediante la instalación de medidas de eficiencia energética en los puntos de consumo de la PTAR, lo cual conlleva una mayor instrumentación y control de la aireación en particular. Así mismo, contemplar la generación de energía renovable en sitio para reducir el consumo de la

proveniente de la red, y la adopción de tecnologías de tratamiento con menor consumo de energía eléctrica por unidad de volumen tratado.

La estimación de emisiones para los lodos descargados al drenaje no se contabiliza aun en el total anterior. En la Figura 5.4 se presentan las aportaciones de CO₂eq de las tres fuentes asociadas a las PTAR de la Cd de México, emisiones directas, indirectas y por lodos. A su vez, la Tabla 5.14 presenta los valores relativos y absolutos para los tres procedimientos de cálculo. Estas cifras representan una imagen completa de las emisiones anuales y de la huella de carbono de las PTAR operadas o bajo responsabilidad del Sistema de Aguas de la Cd de México (SACMEX).

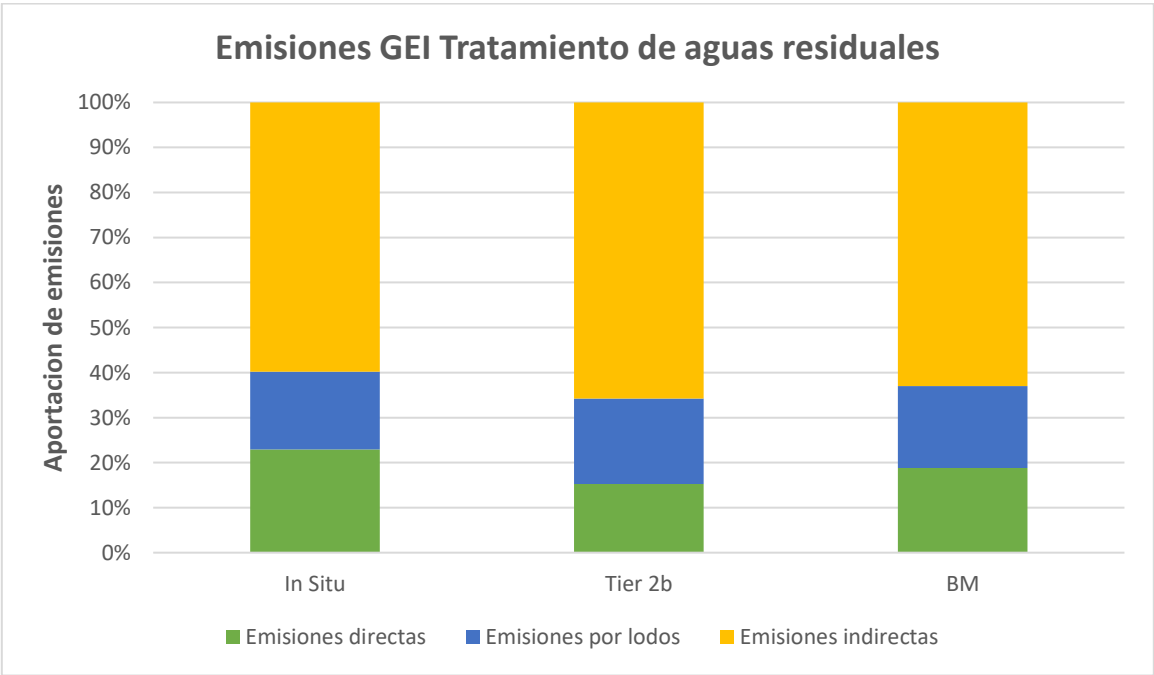


Figura 5.4 porcentaje de emisiones totales generadas por el tratamiento de aguas residuales para tres procedimientos de cálculo.

La aportación de lodos representa de un 17-20% del total de emisiones para cada una de las metodologías, valores muy similares a las aportaciones directas, por lo

que se resalta la necesidad de mejorar el tratamiento y disposición de los lodos generados con el fin de disminuir el valor de las emisiones totales o bien darle un aprovechamiento adecuado al metano producido por lodos. Las emisiones indirectas, por consumo de energía eléctrica, representan más del 60% del total de las emisiones. cómo se puede ver a continuación en la tabla 5.13

Tabla 5.14 Porcentaje de emisiones directas, por lodos e indirectas por metodología.

<i>Metodología</i>	<i>Emisiones directas</i>	<i>Emisiones por lodos</i>	<i>Emisiones indirectas</i>	<i>Total (ton CO_{2EQ}/año)</i>
In situ	23%	17%	60%	59,850
Nivel 2b	15%	20%	65%	54,448.6
BM	19%	19%	62%	56,806.2

5.7 Estimación de la producción de metano en el sistema de alcantarillado de la CDMX

La red de alcantarillado de la ciudad de México puede clasificarse en red secundaria, red primaria, vasos de regulación y grandes conductos de salida. En conjunto se encargan de recolectar y desalojar las aguas residuales y pluviales.

López Saucedo (2018) realizó la estimación de la emisión de CH₄ en la red secundaria de la Cd de México. Este cálculo comprende un alto grado de incertidumbre y solo busca evidenciar la potencial contribución que representa el alcantarillado urbano.

La red secundaria de alcantarillado de la CDMX tiene una longitud de 11,626 kilómetros, mayormente constituida por tuberías con un diámetro máximo de 45 cm y 193,766 pozos de visita.

La estimación de la carga anual de metano disuelto se realizó utilizando factores específicos para la temporada de estiaje y lluvia: 0.00079 kg CH₄/m³ y 0.0004 kg CH₄/m³, respectivamente. El caudal anual calculado de aguas residuales recolectadas por la red secundaria se estimó en 531,027,585 m³/año. El resultado de la carga anual de metano disuelto en el agua residual que es transportada en el sistema de alcantarillado de la Cd de México es 346.9 ton CH₄/año.

La estimación de metano emitido por la red de drenaje se calculó utilizando un factor de emisión de 40.9 mg/m³ considerando 193,766 pozos cuya área de ventilación promedio es de 0.00785 m² y velocidad media de la salida de los gases igual a 0.217 m/s. Con estos valores se calcula la emisión de metano a través de los registros de la red secundaria: 426.1 ton CH₄/año

Finalmente, para conocer la cantidad anual de metano asociada a la operación de la red secundaria de alcantarillado de la CDMX se sumaron los valores obtenidos de la carga de metano disuelto y el metano emitido. El resultado de la carga anual total de metano relacionada con el sistema de alcantarillado es de 772.0 ton CH₄/año (45 % disuelto, 55% emitido), que, considerando un potencial de calentamiento global de metano de 34, el equivalente en CO₂ relacionado con la red de drenaje de la Cd de México sería 26,248 ton CO_{2eq}/año.

La emisión estimada de la red de drenaje de la Cd de México representa el doble de las emisiones directas de las 23 PTAR de la Cd de México, calculadas con datos in situ. Al respecto, si bien se trata de una estimación muy gruesa, muestra que es relevante. Su importancia decrecería conforme se incrementará el tratamiento del agua residual que circula por el drenaje de la ciudad (actualmente se trata dentro de la Ciudad de México el 15% del agua residual que ella produce).

La emisión de esta cantidad de metano se daría en los propios pozos de visita, estaciones de bombeo y lumbreras de los grandes conductos de drenaje (55% de las emisiones) y en las plantas de tratamiento o sitios de descarga de los emisores, ya fuera de la Zona Metropolitana (45% como emisiones de metano soluble)

Si bien este cálculo es una estimación gruesa de la contribución de la red de drenaje, sirve para resaltar la importancia de considerar la aportación de emisión generadas por el sistema de alcantarillado, ya que se ha demostrado que su aportación es significativa, por lo que debería tomarse en cuenta al momento de realizar el inventario de emisiones de metano del manejo del agua residual en centros urbanos.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Las emisiones anuales directas de metano de las 23 PTAR de la Cd de México, por escenario calculado, fueron (ton CO_{2eq}/año): 1,263.1 (Nivel 1, 2019), 7,052.5 (Nivel 2a), 8,315.3 (Nivel 2b), 10,672.9 (Balance de masa) y 13,716.7 (in situ).

Las emisiones calculadas por el método de balance de masas BM son las más cercanas a las estimadas con los valores in situ obtenidos. Si bien el método BM es más específico también es más complejo, pues requiere datos reales de cada planta y el desarrollo de cálculos cinéticos y de balance de masa específicos para cada instalación. En consecuencia, la metodología Nivel 2 representa una opción más accesible en cuanto a requerimiento de datos y con aceptable grado de confianza para construir un inventario de emisiones de PTAR

El supuesto del Nivel 1, IPCC (2006) en el sentido que las plantas aerobias centralizadas bien operadas no emiten metano, no tiene sustento. Esto ha sido reconocido recientemente por el propio IPCC al incorporar un factor de corrección de metano recomendado diferente de cero (0.03) en su actualización más reciente (IPCC, 2019). El metano disuelto en el influente será desorbido en algún grado dentro del proceso de tratamiento.

La metodología actualizada en 2019 para el Nivel 1 recomienda un valor de 0.03 para el factor de corrección sin distinguir plantas bien operadas y mal operadas. Para el cálculo de lodos extraídos (S) se introduce una nueva ecuación que incorpora un factor Krem para convertir la masa de lodo en base seca a masa de DBO. Sin embargo, los valores recomendados para Krem por el IPCC son 0.8 y 1.16 kgDBO/kgST para lodos activados convencionales y aireación extendida

respectivamente, representan una importante imprecisión y, por ende, una subestimación de las emisiones de metano.

Las emisiones de metano de las dos fuentes dentro del proceso de tratamiento (sedimentador primario y tanque de aireación) son de la misma importancia (alrededor de 200 Ton/año por fuente para el total de PTAR evaluadas). El evitar la generación de metano en las unidades sedimentadoras se destaca como medida efectiva de mitigación.

Las emisiones indirectas (asociadas al consumo de energía eléctrica) superan en un amplio margen (representan más del 60%) a los valores de las emisiones directas, por lo que disminuir las emisiones indirectas sería prioritario para una estrategia de reducción de emisiones en las PTAR de la Ciudad de México.

Finalmente, el cálculo de emisiones in situ refleja la realidad de la operación de las PTAR, la producción de metano en las unidades sedimentadoras, aspecto que no contempla de ninguna forma la metodología del IPCC ni el procedimiento de balance de masa. De aquí se desprende que es necesario introducir en la metodología IPCC un factor que corrija este faltante. En caso que las PTAR no operen en forma óptima, en particular la purga frecuente (y efectiva) de los lodos del sedimentador primario.

Recomendaciones

La producción de metano en la mayor parte de los sedimentadores primarios no es considerada en el cálculo por Nivel 2 y constituye la principal causante de la diferencia con lo estimado con datos obtenidos in situ. Con base en ello, es recomendable tomar en cuenta las condiciones reales de operación de las PTAR, y no solo basarse en condiciones de diseño, al momento de seguir el Nivel 2 para el inventario de emisiones.

Se recomienda rehabilitar las plantas de la ciudad de México y mejorar su operación, para así disminuir las emisiones generadas en las unidades sedimentadoras, e incrementar la fracción de metano disuelto que se oxida en el tanque de aireación.

Se recomienda dar un tratamiento adecuado de los lodos producidos durante el tratamiento de aguas ya que el hecho de descargarlos al drenaje representante una fuente de emisión de metano no despreciable. Además, la producción de biogás en digestores anaerobios, seguida de la generación de electricidad disminuiría las emisiones indirectas, principal contribuyente (60%) en la huella de carbono de las PTAR estudiadas. Se debe evaluar la modificación de los procesos actuales a sistemas anaerobios-aerobios.

Referencias

- Appels, L., Baeyens, J., Degreève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- Augenbraum, H., Matthews, E., Sarma, D., 1999. The global methane cycle. disponible en: icp.giss.nasa.gov/research/methane.html.
- Baeten, JE, Walgraeve, C, Granja, RC, van Loosdrecht, MCM, Volcke, EIP, Unaerated feeding alters the fate of dissolved methane during aerobic wastewater treatment, *Water Research*, Volumen 204, 2021, 117619, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117619>.
- Blake, D.R., 1994. Methane role in atmospheric change. SWANA'S 17th Annual International Landfill Gas Symposium. Long Beach, CA.
- Bao, Z.Y., Sun, S.C., Sun, D.Z., 2016. Assessment of greenhouse gas emission from A/O and SBR wastewater treatment plants in Beijing, China. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 108, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.028>.
- Calander B, Scientific aspects of the framework convention on climate change and national greenhouse gas inventories *Environmental Monitoring and Assessment*, 38 (1995), pp. 129-140
- Campos, J.L, Valenzuela-Heredia, D, Pedrouso, A, Val del Río, A, Belmonte, M, Mosquera-Corral, A, "Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention", *Journal of Chemistry*, vol. 2016, ArticleID 3796352, 12 pages, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3796352>
- Comisión Nacional del Agua, 2019, Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, edición 2020
- Corominas L, Flores-Alsina X, Snip L, Vanrolleghem PA. Comparison of different modeling approaches to better evaluate greenhouse gas emissions from whole wastewater treatment plants. *Biotechnol Bioeng*. 2012 Nov;109(11):2854-63. Doi: 10.1002/bit.24544. Epub 2012 May 19. PMID: 22566078.
- Daelman, M.R.J., Van Voorthuizen, E.M., Van Dongen, U.G.J.M., Volcke, E.I.P., Van Loosdrecht, M.C.M., 2012 Methane emission during municipal wastewater treatment. *Water Res*. 46(11), 9540-9547.
- Daelman, M.R.J., Van Eyne, T., Van Loosdrecht, M.C.M., Volcke, E.I.P., 2014. Effect of process desing and operating parameters on aerobic methane oxidation in municipal WWTP's. *Water Res*. 66, 308-319
- Duchemin, E. and Lucotte, M. and Canuel, R. 1999 Comparison of Static Chamber and Thin Boundary Layer Equation Methods for Measuring Greenhouse Gas Emissions from Large Water Bodies, *Environmental Science & Technology*, 33(2), 350-357, <https://doi.org/10.1021/es9800840>

Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.J. Francey, and R.L. Langenfelds. 2002. Historic CH₄ records from Antarctic and Greenland ice cores, Antarctic firn data, and archived air samples from Cape Grim, Tasmania. In: Trends: A compendium of data on global change. Oak Ridge, TN: U.S. Department of Energy. Accessed September 13, 2005. http://cdiac.ornl.gov/trends/atm_meth/lawdome_meth.html.

Ferrer, Yoandy, & Pérez, Heidy (2010). Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento. ICIDCA. Sobre los Derivados

Foley, J., Yuan, Z.G., Lant, P., 2009. Dissolved methane in rising main sewer systems: field measurements and simple model development for estimating greenhouse gas emissions. *Water Sci. Technol.* 60(11), 2963-2971.

Gal'chenko V. F., Lein A. Yu., Ivanov M. V., 2003. Methane content in the bottom sediments and water column of the black sea.

Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). Contribución Determinada a nivel Nacional: México. Versión actualizada 2020.

Guisasola, A., de Haas, D., Keller, J., Yuan, Z., 2008. Methane formation in sewer systems. *Water Res.* 42, 1421–1430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2007.10.014>.

Haroon, M.F., Hu, S., Shi, Y., Imelfort, M., Keller, J., Hugenholtz, P., Yuan, Z., Tyson, G.W., 2013. Anaerobic oxidation of methane coupled to nitrate reduction in a novel archaeal lineage. *Nature* 500 (7464), 567–570.

Heimann, M. Enigma of the recent methane budget. *Nature* 476, 157–158 (2011). <https://doi.org/10.1038/476157a>

Hu, S., Zeng, R.J., Keller, J., Lant, P.A., Yuan, Z., 2011. Effect of nitrate and nitrite on the selection of microorganisms in the denitrifying anaerobic methane oxidation process. *Env. Microbiol. Rep.* 3 (3), 315–319.

Hu, Wanqiu & Chen, Lujun. (2019). Greenhouse gas emission by centralized wastewater treatment plants in Chinese industrial parks: Inventory and mitigation measures. *Journal of Cleaner Production.* 225. [10.1016/j.jclepro.2019.03.311](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.311).

Hwang KL, Bang CH, Zoh KD. Characteristics of methane and nitrous oxide emissions from the wastewater treatment plant. *Bioresour Technol.* 2016 Aug;214:881-884. Doi: [10.1016/j.biortech.2016.05.047](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.047). Epub 2016 May 18. PMID: 27237575.

IEA (International Energy Agency), 1999. Greenhouse gas and climate change. Disponible en: <http://www.ieagreen.org.uk/ghgs.htm>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018, Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático (2018) Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI) del sector Aguas Residuales de México. Gobierno de México.

IPCC (International panel on climate change) 2006, Guidelines for national greenhouse gas inventories. vol. 5 Waste. IPCC National Inventories Programme, Institute for global Environmental Strategies, Hayama, Kanawa, Japan. www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_volume5/v5_6_Ch6_wastewater.pdf.

IPCC (International panel on climate change) 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. vol. 5 Waste. IPCC National Inventories Programme, Institute for global Environmental Strategies, Hayama, Kanawa, Japan.

Islas-Lima, S., Thalasso, F., Gómez-Hernandez, J., 2004. Evidence of anoxic methane Oxidation coupled to denitrification. *Water Reserch*, Volumen 38 (1), paginas 13–16

Ketola R., Method development in membrane inlet mass espectrometry. Air analysis and desorption techniques. Espoo 1998, Technical research Centre of Finland, VTT Publications 364. 90pp

Koutsou, OP, Gatidou, G, Athanasios S. Stasinakis, Domestic wastewater management in Greece: Greenhouse gas emissions estimation at country scale, *Journal of Cleaner Production*, Volumen 188, 2018, Paginas 851-859, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.039>.

Kwok, C.E.Y., Muller, D., Caldow, C., Lebeque, B., Monster, J.G., Rella, C.W., Scheutz, C., Schmidt, M., Ramonet, M., Warneke, T., Broquet, G., Ciais, P., 2015 Methane Emission estimates using chamber and tracer release experiments for a municipal waste water treatment plant, *Atmos Meas, Tech*, 8(7), 2853-2867.

Liu, Y., Cheng, X., Lun, X., Sun, D., 2014, CH₄ emission and conversion from A2O and SBR processes in full-scale wastewater treatment plants. *J. Environ. Sci.* 26(1), 224-230.

Liu, Y., Ni, B.J., Sharma, K.R., Yuan, Z., 2015. Methane emission from sewers. *Sci. Total Environ.* 524-525, 40–51.

López, S. (2018) *Generación de metano en sistemas de alcantarillado*. Tesis de Maestría. Posgrado de Ingeniería, UNAM, México.

Loulergue, L., A. Schilt, R. Spahni, V. Masson-Delmotte, T. Blunier, B. Lemieux, J.-M. Barnola, D. Raynaud, T.F. Stocker, and J. Chappellaz. 2008. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years. *Nature*453:383–386.

www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/loulergue2008/loulergue2008.html.

Mannina G., Butler D., Benedetti L., Deletic A., Fowdar H., Fu G., Kleidorfer M., McCarthy D., Steen-Mikkelsen P., Rauch W., Sweetapple C., Vezzaro L., Yuan Z., Willems P., (2018) Greenhouse gas emissions from integrated urban drainage systems: Where do we stand?, *Journal of Hydrology*, Volume 559, 2018, Pages 307-314, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.058>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169418301409>)

Mannina G., Reboucas, T.F., Cosenza, A., Chandran, K., 2019 A plant-wide wastewater treatment plant model for carbon and energy footprint: model application and scenario analysis, *J. Clean. Prod.* 217, 244-256, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.255>

Masuda, S., Sano, I., Hojo, T., Li, Y.Y., Nishimura, O., 2018. The comparison of greenhouse gas emissions in sewage treatment plants with different treatment. *Chemosphere* 193, 581–590.

Morgan-Sagastume JM. (2021) Plan de gestión de las Aguas Residuales Tratadas y Acciones para incrementar el potencial de reúso en la Ciudad de México Sistema de Aguas de la Ciudad de México, informe técnico convenio 0081-10-ED-F-DGAT-DIPL-1-21-1928, elaborado para Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). Instituto de Ingeniería UNAM.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhan, H., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. doi:10.1017/CBO9781107415324.018

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2016. Monthly mean CH₄ concentrations for Mauna Loa, Hawaii. Accessed July 16, 2016. ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/data/trace_gases/ch4/flask/surface/ch4_mlo_surface-flask_1_ccgg_month.txt.

Noyola, A. M. G. Paredes, L. P. Güereca, L. T. Molina, M. Zavala (2018) Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review.,

Paredes G. (2017) *Estimación de los factores de emisión de CH₄ de los tres procesos de tratamiento de aguas residuales municipales más representativos en México*. Tesis de Doctorado. Posgrado de Ingeniería, UNAM, México

Pipatti, R., Savolainen, I., & Sinisalo, J. (1996). Greenhouse impacts of anthropogenic CH₄ and N₂O emissions in finland. *Environmental Management*, 20(2), 219-233. doi:10.1007/BF01204006

Ren, Y.G., Wang, J.H., Li, H.F., Zhang, J., Qi, P.Y., Hu, Z., 2013. Nitrous oxide and methane emissions from different treatment processes in full-scale municipal wastewater treatment plants. *Environ. Technol.* 34 (21), 2917–2927.

Ribera-Guardia, A., Bosch, L., Corominas, L., Pijuan, M., 2019. Nitrous oxide and methane emissions from a plug-flow full-scale bioreactor and assessment of its carbon footprint. *J. Clean. Prod.* 212, 162–172.

Robards K., Haddad P.R., Jackson P.E., 2004, *Principles and Practice of Modern Chromatographic Methods*, capítulo 3- Gas Chromatography, Academic Press, Pages 75-177, ISBN 9780080571782, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057178-2.50006-6>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080571782500066>)

Samuelsson, J., Delre, A., Tumlin, S., Hadi, S., Offerle, B., Scheutz, C., 2018. Optical technologies applied alongside on-site and remote approaches for climate gas emission quantification at a wastewater treatment plant. *Water Res.* 131, 299–309.

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. (2018) Registro de descargas de Aguas Residuales 2016.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2020), Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, edición 2020.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México. Agosto, 2021.

Smith, R.L.; Böhlke, J.K. 2019, Methane and nitrous oxide temporal and spatial variability in two U.S. Midwestern streams containing high nitrate concentrations. *Sci. Total Environ.*, 685, 574–588.

Sparkman O., Penton Z., Kitson F., 2011, *Gas Chromatography and Mass Spectrometry*, Chapter 2 - Gas Chromatography, (Second Edition), Academic Press, Pages 15-83, ISBN 9780123736284, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373628-4.00002-2>.

2. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123736284000022>)

Steele, L.P., P.B. Krummel, and R.L. Langenfelds. 2002. Atmospheric methane record from Shetland Islands, Scotland (October 2002 version). In: *Trends: A compendium of data on global change*. Oak Ridge, TN: U.S. Department of Energy. Accessed September 13, 2005. http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/atm_meth/csiro/csiro-shetlandch4.html.

Thomsen, M., 2016. Wastewater treatment and discharge: scientific report from DCE. Danish Centre for Environment and energy Danish Centre for Environment and Energy, Aarhus University, <http://dce2.au.dk/pub/SR193.pdf>

UNEP, 2017, Avances y oportunidades en la reducción de contaminantes climáticos de vida corta en América Latina y el Caribe.

Wang, J., Zhang, J., Xie, H., Qi, P., Ren, Y., Hu, Z., 2011. Methane emissions from a fullscale A/A/O wastewater treatment plant. *Bioresour. Technol.* 102 (9), 5479–5485.

Wang S, Liu Q, Li J, Wang Z. Methane in wastewater treatment plants: status, characteristics, and bioconversion feasibility by methane oxidizing bacteria for high value-added chemicals production and wastewater treatment. *Water Res.* 2021 Jun 15;198:117122. Doi: 10.1016/j.watres.2021.117122. Epub 2021 Apr 6. PMID: 33865027.

Yver Kwok, C. E., Müller, D., Caldow, C., Lebègue, B., Mønster, J. G., Rella, C. W., Scheutz, C., Schmidt, M., Ramonet, M., Warneke, T., Broquet, G., & Ciais, P. (2015). Methane emission estimates using chamber and tracer release experiments for a municipal waste water treatment plant. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(7), 2853–2867. <https://doi.org/10.5194/amt-8-2853-2015>

Zhao, X., Jin, X.K., Guo, W., Zhang, C., Shan, Y.L., Du, M.X., Tillotson, M.R., Yang, H., Liao, X.W., Li, Y.P., 2019. China's Urban Methane Emissions From Municipal Wastewater Treatment Plant. *Earth's Future* 7 (4), 480–490

Zhao, F., Xu, H., Kana, T., Zhu, G., Zhan, X., Zou, W., Zhu, M., et al. (2021). Improved Membrane Inlet Mass Spectrometer Method for Measuring Dissolved Methane Concentration and Methane Production Rate in a Large Shallow Lake. *Water*, 13(19), 2699. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w13192699>

ANEXOS

I DATOS DE OPERACIÓN

Tabla A1. Datos promedio de operación de las 25 PTAR

	PTAR (mg/L) DBO INF	(mg/L) DBO EFL	Q (L/s)
1. <i>Abasolo.</i>	743.3	26.1	2.22
2. <i>A. Guadalupe</i>	279.8	30.2	53.88
3. <i>B. Lomas</i>	225.1	17.3	21.93
4. <i>C. Estrella</i>	130.7	2.2	1677.52
5. <i>Chapultepec</i>	264.7	2.7	94.12
6. <i>Cd. Deportiva</i>	164.3	22.8	91.3
7. <i>Coyoacán</i>	148.2	15.4	184.13
8. <i>El Llano</i>	304.0	29.7	68.78
9. <i>El Rosario</i>	161.6	19.4	7.73
10. <i>Iztacalco</i>	280.1	25.2	7.13
11. <i>La Lupita*</i>	237.2	27.2	13.8
12. <i>Parres</i>	960.9	78.8	2.09
13. <i>Pemex Picacho</i>	282.8	25.1	11.33
14. <i>R. Magdalena</i>	127.5	15.9	15.55
15. <i>R. Sur</i>	276.5	20.7	16.29
16. <i>SA. Mixquic</i>	188.4	20.7	19.82
17. <i>SJ. Aragón</i>	189.1	19.7	146.8
18. <i>SL. Tezonco</i>	156.3	23.9	43.06
19. <i>SL. Tlaxiátemalco</i>	132.5	14.4	77.11
20. <i>SM. Xicalco</i>	769.3	48.5	5.5
21. <i>SN. Tetelco</i>	584.0	45.8	13.94
22. <i>SP. Atocpan</i>	773.0	104.0	25.92
23. <i>Santa Fe</i>	285.3	18.1	43.3
24. <i>SM. Acatitla*</i>	260.2	19.5	5.78
25. <i>Tlatelolco</i>	187.2	23.0	8.06

* Fuera de operación

Tabla A2. Plantas visitadas que no se encontraban en condiciones para realizar el muestreo

Planta	Motivos
11. La Lupita	La planta no opera desde el terremoto del 2017 debido a que se rompió la tubería de suministro. No se permite el acceso a la planta
24. Santa Martha Acatitla	La planta se encontraba sin operar. La información proporcionada por el operador, indica que la planta tiene poco más de 3 meses sin operar.

II ESTIMACIÓN DE DBO EN LODO DE PURGA

a) Lodos activados convencionales (con sedimentación primaria)

- Calcular masa diaria de DBO removida por sedimentador primario (Mrem-prim): **Mprim**.
Para ello puede considerarse que 30% de la DBO entrante es retirada en el sedimentador primario
- Calcular masa diaria de DBO entrante a reactor biológico (Mbiol)
- Calcular masa diaria de DBO removida por reactor biológico (Mrem-biol)
Corresponde a la diferencia entre el flujo másico DBO entrada (Mi) y el de salida (Me)
- Calcular producción de lodo (SV) en reactor biológico, usando la correspondiente Yobs (P-SV lodo-biol). Valor entre 0.3 y 0.5 kgSV/kgDBOrem.
- Convertir P-SV lodo-biol a P-DBO lodo biol con el factor 1kg SV lodo = 0.7 kg DBO lodo. **Msec**
- Calcular la masa de lodo (DBO) removido del proceso de tratamiento: **Mtot = Mprim + Msec**

b) lodos activados en aeración extendida (sin sedimentador primario)

- Calcular masa diaria de DBO entrante (Mi) y de salida (Me)
- Calcular masa diaria de DBO removida (Mrem)
- Calcular producción de lodo (SV) en reactor biológico, usando la correspondiente Yobs (P-SV lodo). Valor entre 0.2 y 0.3 kgSV/kgDBOrem.
- Convertir P-SV lodo a P-DBO lodo con el factor 1kg SV lodo = 0.6 kg DBO lodo.
- Calcular la masa de lodo (DBO) removido del proceso de tratamiento: **Mtot = Mprim + Msec**

Nota: Para el cálculo de la DBO del lodo, a partir de células (sólidos volátiles, SV), se aplican los siguientes factores de conversión:

1kg SV = 1.42kg DQO

1kgDBO = 2.4kg DQO para aeración extendida

1kgDBO = 2 kg DQO para lodos activados convencionales

Ambos factores en combinación resultan en:

Aeración extendida: 1kg SV = 0.6kg DBO

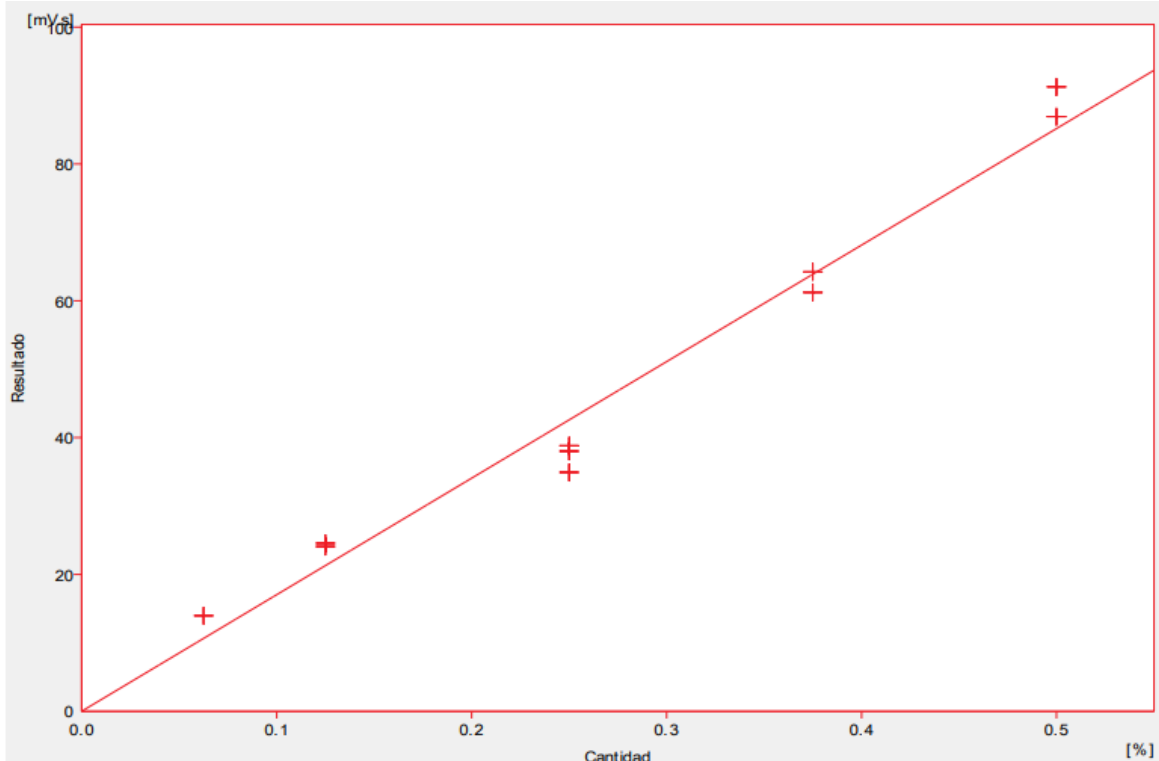
Lodos activados convencionales: 1kg SV = 0.7kg DBO

III CURVA DE CALIBRACIÓN PARA METANO DISUELTO.

Para poder cuantificar las concentraciones de metano disuelto fue necesario elaborar previamente una curva de calibración. El procedimiento fue el siguiente.

1. Usar el Manifold (rampa de Gaseo) y seleccionar el gas a cuantificar (Metano al 99%)
2. Introducir la manguera de salida dentro de un recipiente con agua para regular la salida de gas.
3. Abrir la llave general verificando que no se eleve la presión a más de 1.5 psi de presión.
4. Abrir lentamente la llave de paso hasta obtener un pequeño y constante burbujeo.
5. Introducir en una botella serológica sellada la jeringa para obtener una muestra de metano al 99%
6. Preparar mezclas de metano-aire a diferentes concentraciones (0.5%, 0.375%, 0.25%, 0.125%, y 0.0625%) en botellas serológicas selladas.
7. Con ayuda de la jeringa Hamilton (Pressure Lock) inyectar por duplicado 1ml cada una de las concentraciones al cromatógrafo. (hacer un purgado de la jeringa entre cada inyección).

Medir la respuesta en área del software Clarity



IV Plantas de tratamiento Visitadas.

Acueducto de Guadalupe



Abasolo



Bosques de las lomas



Cerro de la estrella



Ciudad deportiva



Coyoacán



Chapultepec.



El Rosario



Parres



Pemex Picacho



Iztacalco



Reclusorio Sur



R. Magdalena



San Andrés Mixquic



San Lorenzo Tezonco



San Nicolás Tetelco



Santa Fe.



San Miguel Xicalco



Tlatelolco

