

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y

ARTES DE CHIAPAS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN
DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO**

TESIS PROFESIONAL

**CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE
EFECTO INVERNADERO POR LA DISPOSICIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL MUNICIPIO
DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA

CECILIA VÁZQUEZ OVANDO

DIRECTOR DE TESIS

DR. EMMANUEL DIAZ NIGENDA

TUXTLA GUTIÉRREZ CHIAPAS

MAYO 2022



Dedicatorias

A mamá y papá

Por acompañarme hasta el final de cada día, darme su apoyo, consejos y amor, por la educación brindada hasta hoy han sido mi amparo, les amo por siempre.

A Mareli, Eliseo y Ebed

Por ser parte de mi crecimiento personal y educativo, por sus risas y sus llantos, por ser parte de mis motivos para seguir adelante siempre.

A mis familiares

Por los ánimos, el apoyo brindado de una y mil maneras, les guardo en mis pensamientos.

A mí

Porque muchas veces quisiste dejar todo, por lo que no comprendías, por lo que sentías, por el miedo, la incertidumbre, por lo aprendido y vivido en todo este proceso,

Y por sobre todo, a

DIOS

Agradecimiento

Al **Programa para el Desarrollo Profesional Docente** a través de la Convocatoria del Fortalecimiento de Cuerpos académico por el apoyo otorgado.

A la **Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas** por ser mi casa de estudios, por su capacitado cuerpo académico; a cada uno de mis profesores.

A mi director de tesis el **Dr. Emmanuel Díaz Nigenda**, por la oportunidad de colaborar en este proyecto, por su mentoría, consejos y también por su paciencia.

A la **Dra. Andrea Venegas** y el **Dr. Williams Vázquez** por sus observaciones, comentarios y consejos para enriquecer mi trabajo de tesis.

A mis **amigos y compañeros**, por el apoyo fraterno en toda la licenciatura, así como las porras para seguir adelante.

¡GRACIAS!

ÍNDICE GENERAL

I.	Introducción.....	1
II.	Marco conceptual.....	3
II.1.	Cambio climático.....	3
II.2.	Efecto invernadero.....	3
II.2.1.	Balance energético de la Tierra.....	3
II.2.2.	Gases de efecto invernadero.....	6
II.3.	Panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.....	8
II.3.1.	Metodologías del IPCC versión revisada de 1996.....	10
II.3.2.	Desechos.....	12
II.4.	Acciones de mitigación.....	15
III.	Planteamiento del problema.....	18
IV.	Antecedentes.....	20
V.	Justificación.....	22
VI.	Objetivos.....	23
VI.1.	General.....	23
VI.2.	Específicos.....	23
VII.	Materiales y métodos.....	24
VII.1.	Área de estudio.....	24
VII.2.	Método.....	27
VII.2.1.	Proyecciones 2021 a 2030.....	31
VIII.	Resultados.....	32
VIII.1.	Datos de población.....	32
VIII.2.	Resultados de ajuste per cápita y generación de RSU.....	34
VIII.3.	Cálculo de emisiones.....	37

VIII.4. Proyecciones 2021 a 2030.....	39
IX. Conclusiones.....	41
X. Bibliografía	43
XI. Anexos	49
Anexo 1. Emisiones de CH ₄ para el periodo 2000 a 2020.....	49
Anexo 2. Proyecciones de emisiones de CH ₄ de 2021 a 2030.....	50

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Proyecciones de la población para el municipio de Tuxtla Gutiérrez.....</i>	19
Tabla 2. Datos de población total del Municipio de Tuxtla Gutiérrez.....	28
Tabla 3 <i>Datos de generación per cápita del Municipio de Tuxtla Gutiérrez</i>	29
Tabla 4. <i>Valores empleados para el cálculo del carbono orgánico degradable</i>	31
Tabla 5 <i>Tasas de crecimiento de la población del Municipio de Tuxtla Gutiérrez.</i>	32
Tabla 6 <i>Población de Tuxtla Gutiérrez para el periodo 2000-2020</i>	33
Tabla 7 <i>Generación per cápita y toneladas anuales de residuos para el periodo 2000 a 2020.....</i>	36

Lista de figuras

Figura 1. <i>Cálculo del equilibrio anual y mundial. Adaptado por (IPCC) 2007, tomado de Kiehl and Trenberth (1997).</i> -----	5
Figura 2. <i>Mapa de ubicación de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez</i> -----	26
Figura 3. <i>Relación de población y la generación de GPC.</i> -----	35
Figura 4. <i>Emisiones de CH₄ en Gg</i> -----	38
Figura 5. <i>Pronóstico de emisiones para el periodo 2021 a 2030.</i> -----	40

I. Introducción

La generación de residuos para el municipio de Tuxtla Gutiérrez, ha presentado un incremento en los últimos veinte años; la notoriedad de la problemática que representa la mala gestión de los residuos se constata en la medida que incrementa la población, siendo consecuencias contiguas la contribución a la degradación ambiental por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que en el proceso se desprenden.

Los inventarios de GEI, desde su constitución, han sido de mucha ayuda para exponer el cálculo de las emisiones de GEI, en este sentido, dicho cálculo enfocado en la categoría de Desechos realizado para Tuxtla Gutiérrez se efectuó a partir de datos oficiales obtenidos de diferentes dependencias gubernamentales utilizando la metodología expuesta por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), con la finalidad de revalidar la información que se tiene disponible y generar un escenario tendencial con base en la dinámica de crecimiento del municipio.

Con base en ello, el presente trabajo se constituye de nueve capítulos, siendo este el primero y continuando con el segundo que corresponde al marco conceptual, donde se abordan los principales temas y conceptos relacionados con el objeto de estudio, presentándose desde lo general a lo particular. En el capítulo tercero, se presenta el análisis de la problemática. Los antecedentes se muestran dentro del capítulo cuarto, dando pie a la justificación en la que se exponen los motivos para la realización del trabajo en el capítulo quinto; dentro del capítulo sexto se presentan los objetivos por el que se realiza el trabajo, para el capítulo séptimo se desarrolla

la metodología utilizada en la obtención de los datos de población, generación per cápita y cuantificación de las emisiones de desechos sólidos urbanos, de la cual se aplicaron las Directrices del IPCC en su versión revisada para el año 1996.

En el capítulo octavo, se presentan los resultados obtenidos que nos demuestran un incremento en las emisiones de GEI para el periodo 2000 a 2020, por disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, así como las proyecciones hacia el año 2030, las cuales siguen el mismo patrón de incremento; finalmente en el noveno capítulo se abordan las conclusiones del trabajo, en el que se atribuye al crecimiento de la población, los hábitos de consumo y la urbanización al incremento de emisiones, el cual representa un área de trabajo para las dependencias gubernamentales, en la ejecución de políticas públicas del cuidado del ambiente.

II. Marco conceptual

II.1. Cambio climático

La degradación del ambiente se manifiesta con un aumento en el uso y escasez del petróleo y del agua, contaminación de los océanos, la extinción de animales y plantas. A esto se suma además la deforestación, el calentamiento global y el cambio climático. Siendo estos indicadores de una problemática que está afectando a toda la humanidad (Díaz Cordero, 2012). De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se define al cambio climático como el cambio del clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables. Por otra parte, implica una variabilidad de parámetros meteorológicos inducida por forzamientos externos o internos del planeta (por ejemplo, intensidad solar o inestabilidad atmosférica, en orden respectivo) (López López, 2013).

II.2. Efecto invernadero

II.2.1. Balance energético de la Tierra

El motor que mueve a todo el sistema climático es la energía proveniente del sol. El flujo de energía que incide en la Tierra pasa por procesos de absorción, reflexión y difusión (Figura 1). La superficie terrestre absorbe alrededor de la mitad de la radiación solar que incide sobre el planeta. Esta energía se transfiere a la atmósfera mediante el calentamiento del aire en contacto con la superficie (calor sensible) por la evapotranspiración y por la radiación emitida de onda larga que es absorbida por las nubes y los GEI. A su vez, la atmósfera irradia la energía de onda larga de regreso a la Tierra y también al espacio. La energía solar, es el flujo de

energía electromagnética que viene del exterior, principalmente en forma de luz visible, se conoce como constante solar y equivale a $1,370 \text{ W/m}^2$ (Molina *et al.*, 2000). La luz visible esta entre los límites de la luz violeta (400nm) y la roja (750nm) de la radiación solar. Más allá de la longitud de onda máxima visible, recibimos la radiación infrarroja (IR), en la región situada entre los 300nm y 3000nm. Mucha luz ultravioleta (longitudes de onda $<400\text{nm}$) procedente del Sol se infiltra en la estratosfera, calentando el aire en esta zona, en lugar de calentar la superficie terrestre. Del total de la luz que entra y que cubre todas las longitudes de onda incidente en la Tierra, cerca de un 5% alcanza la superficie terrestre y es absorbida por ella. Un 20% de la luz que entra es absorbida por gases y por las gotas de agua en el aire; la luz restante, un 30%, se refleja en las nubes, hielo, nieve, arena y otros cuerpos reflejantes, sin ser absorbida y regresa al espacio (Baird & Cann, 2008).

En este sentido, la energía reflejada y dispersada representa un valor medio global del 30% (Sala Quereda, 2005). Por otro lado, la energía que es absorbida (radiación de onda corta), principalmente en la superficie, la redistribuye por circulaciones atmosféricas y oceánicas para intentar compensar los contrastes térmicos, sobre todo del ecuador a los polos. La energía recibida es reemitida al espacio (radiación de onda larga) para mantener en el largo plazo, un balance entre energía recibida y reemitida. Cualquier proceso que altere tal balance, ya sea por cambios en la radiación recibida o reemitida, o en su distribución en la Tierra, se reflejará como cambios en el clima (Magaña Rueda, 2004).

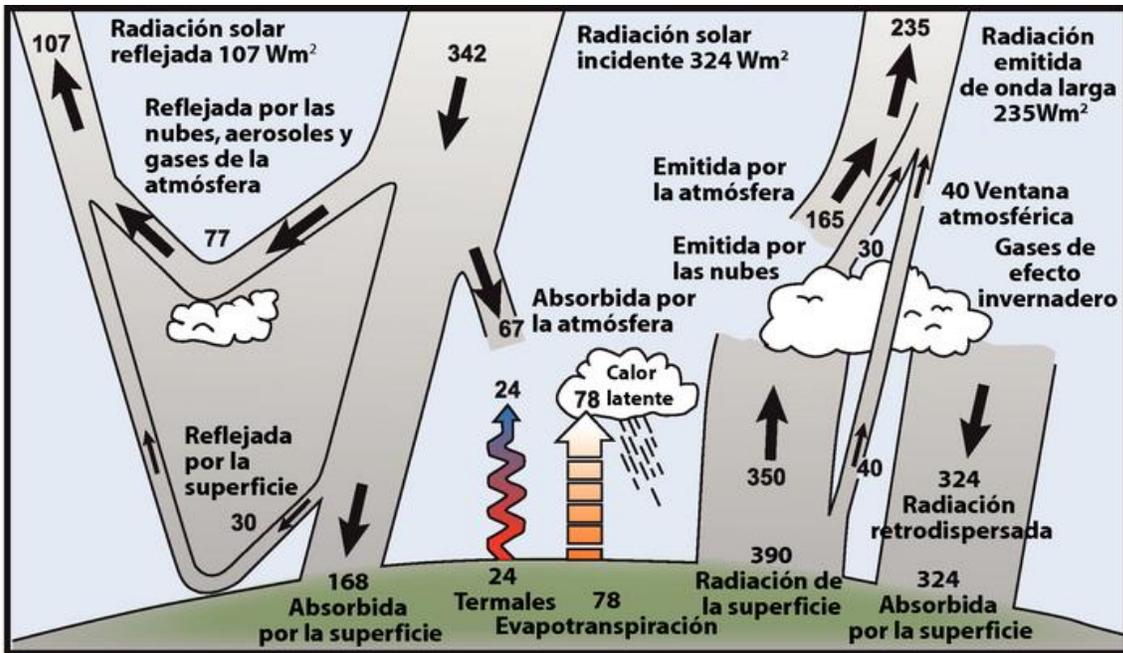


Figura 1. *Cálculo del equilibrio anual y mundial. Adaptado por (IPCC) 2007, tomado de Kiehl and Trenberth (1997).*

La radiación IR generada por el suelo y los océanos escaparía al espacio si no fuera por determinados gases presentes en la atmósfera: dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y otros. Estos gases, absorben la radiación de onda larga y la vuelven a emitir en todas direcciones. Con este efecto, parte de la energía que se escaparía hacia el espacio se queda en la atmósfera. Es el llamado efecto invernadero y es el mismo mecanismo que actúa en un invernadero: el vidrio es transparente a la onda corta de la luz que entra, pero absorbe y no deja pasar la onda larga que emiten la Tierra y la vegetación, de forma que la radiación no puede salir y la temperatura es más alta que en el exterior (Corominas, 2014).

II.2.2. Gases de efecto invernadero

Los GEI se clasifican en directos e indirectos con base en la inducción al forzamiento radiativo, siendo este, una medida de cómo el equilibrio del sistema atmosférico de la Tierra se comporta cuando se alteran los factores que afectan el clima. La palabra radiativo proviene del hecho de que estos factores cambian el equilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente dentro de la atmósfera terrestre. El equilibrio radiativo controla la temperatura de la superficie terrestre. El término forzamiento se utiliza para indicar que el equilibrio radiativo de la Tierra está siendo separado de su estado normal; cuantificándose en 'tasa de cambio de energía por área de unidad del planeta medida en la parte superior de la atmósfera, cuando este es positivo existe el calentamiento, y cuando es negativo existe el enfriamiento (Salomon *et al*, 1990). De acuerdo a Martínez-Prado (2016), los gases directos son aquellos que inducen el calentamiento global y a los cuales se les atribuye el aumento de la temperatura del planeta, así como la variabilidad climática regional: Dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC's), perfluorocarbonos (PFC's) y el hexafluoruro de azufre (SF_6). Por su parte los gases indirectos son aquellos que tienen impacto en la química atmosférica modificando la vida de los GEI directos en la atmósfera: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM). Algunos de los gases directos se describen a continuación:

Dióxido de carbono: El CO_2 se genera a partir de varias fuentes. Es el segundo GEI más frecuente, comprende alrededor del 25 por ciento del efecto invernadero natural. Los seres humanos y los animales exhalan CO_2 ; la vegetación libera CO_2

cuando muere y se descompone; quemar árboles en un incendio forestal o quemarlos durante la deforestación lo libera; La quema de combustibles fósiles (como los gases de escape de los automóviles y los procesos industriales) son fuentes comunes de CO₂ (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007).

Metano: El metano (CH₄) es un gas inflamable, incoloro e inodoro que se forma cuando las plantas se descomponen en un ambiente con muy poco aire. Es el tercer gas de efecto invernadero más común y se crea cuando la materia orgánica se descompone sin la presencia de oxígeno, un proceso llamado descomposición anaeróbica. Una de las fuentes más comunes proviene de los "rumiantes": animales en pastoreo que tienen múltiples estómagos para digerir su comida. El CH₄ también es un subproducto del gas natural y la materia orgánica en descomposición, como los alimentos y la vegetación. También presente en los humedales, se le conoce comúnmente como "gas de pantano". El arroz es un alimento básico importante; actualmente alimenta a un tercio de la población mundial. Debido a que el arroz se cultiva en suelos anegados, como pantanos, liberan CH₄ como subproducto (Encinas Malagón, 2011).

Óxido nitroso: El óxido nitroso (N₂O), se libera del estiércol y los fertilizantes químicos a base de nitrógeno. A medida que el fertilizante se degrada, se libera N₂O a la atmósfera. El óxido nitroso también está contenido en el suelo por bacterias. Cuando los agricultores aran el suelo y alteran la capa superficial, se libera N₂O a la atmósfera. También se libera de los convertidores catalíticos de los automóviles y del océano (FAO & IFA, 2004).

La cuantificación de las emisiones de cada uno de los GEI, se lleva a cabo mediante la aplicación de una serie de metodologías establecidas por el IPCC, las cuales, son las guías utilizadas para la elaboración de los inventarios de emisiones de GEI y permiten identificar las principales fuentes de emisión con la finalidad de orientar los esfuerzos para la mitigación y/o adaptación al cambio climático.

II.3. Panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es el órgano internacional encargado de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático. Fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) para facilitar a las instancias normativas evaluaciones periódicas sobre la base científica del cambio climático, sus repercusiones y futuros riesgos, así como las opciones que existen para adaptarse al mismo y atenuar sus efectos (IPCC, 2013).

El trabajo del IPCC se comparte entre tres grupos de trabajo y un grupo especial. Las actividades de cada Grupo de Trabajo y del Grupo Especial son coordinadas y administradas por una Unidad de Soporte Técnico (TSU). El Grupo de Trabajo I (GT I) evalúa los aspectos científicos físicos del sistema climático y el cambio climático. Los principales temas evaluados por el GT I incluyen: cambios en los gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera; cambios observados en las temperaturas del aire, la Tierra y los océanos, las precipitaciones, los glaciares y capas de hielo, los océanos y el nivel del mar; perspectiva histórica y paleoclimática del cambio climático; biogeoquímica, ciclo del carbono, gases y

aerosoles; datos de satélite y otros datos; modelos climáticos; proyecciones climáticas, causas y atribución del cambio climático.

El Grupo de Trabajo II (GT II) evalúa la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, las consecuencias negativas y positivas del cambio climático y las opciones para adaptarse a él. También toma en consideración la interrelación entre vulnerabilidad, adaptación y desarrollo sostenible. La información evaluada se considera por sectores (recursos hídricos; ecosistemas; alimentos y bosques; sistemas costeros; industria; salud humana) y regiones (África; Asia; Australia y Nueva Zelanda; Europa; América Latina; América del Norte; Regiones polares; Islas pequeñas). El Grupo de trabajo III (GT III) evalúa opciones para mitigar el cambio climático mediante la limitación o prevención de las emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de las actividades que los eliminan de la atmósfera. Se tienen en cuenta los principales sectores económicos, tanto a corto como a largo plazo. Los sectores incluyen energía, transporte, edificios, industria, agricultura, silvicultura, gestión de residuos. El GT III analiza los costos y beneficios de los diferentes enfoques de mitigación, considerando también los instrumentos y medidas de política disponibles. El enfoque está cada vez más orientado a soluciones.

El Grupo Especial sobre Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (TFI) fue establecido para supervisar el Programa Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero del IPCC (IPCC-NGGIP). La actividad principal es desarrollar y perfeccionar una metodología y un software acordados internacionalmente para el cálculo y la presentación de informes de las emisiones y

absorciones de GEI nacionales y fomentar su uso por los países que participan en el IPCC y por las partes de la CMNUCC. El IPCC también estableció y mantiene una base de datos de factores de emisión (IPCC, 2022a; 2022b; 2022c; 2022d).

II.3.1. Metodologías del IPCC versión revisada de 1996

Las metodologías del IPCC para la cuantificación de emisiones de GEI en su versión revisada de 1996 considera las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O, compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM), halocarburos (HFC, PFC) hexafluoruro de azufre (SF₆) y dióxido de azufre. Para ello, los cálculos se realizan en seis sectores diferentes: energía; procesos industriales; utilización de solventes y otros productos; agricultura; cambio y uso de la tierra y silvicultura, y los desperdicios.

Energía. Estiman las emisiones de SO₂ y de GEI procedentes de actividades energéticas, se divide en dos categorías: 1. Quema de Combustibles y 2. Emisiones fugitivas.

En la quema de combustibles se calculan las emisiones de CO₂; así como de gases diferentes de CO₂ emitidos por de la quema de combustibles por categoría de fuentes. En el caso de emisiones fugitivas, se calculan las emisiones de metano procedentes de la extracción y manipulación del carbón, así como aquellas originadas de actividades petroleras y gas natural, además de precursores de ozono y SO₂ procedentes de la refinación del petróleo.

Procesos industriales. Las principales fuentes de emisión son los procesos de producción industrial que transforman los materiales por medios físicos o químicos. Las emisiones producidas por los procesos petroquímicos se consideran para esta categoría, así como solventes.

Agricultura. Se consideran cinco fuentes de emisiones de GEI las cuales corresponden al ganado doméstico; cultivo de arroz, quema prescrita de sabanas, quema en el campo de residuos agrícolas y suelos agrícolas.

En función de las fuentes, se cuantifican las emisiones de CH₄ y N₂O procedentes de la fermentación entérica y el manejo del estiércol; el CH₄ a partir de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica de los arrozales; las emisiones de CO₂ principalmente, en conjunto con CH₄, CO, N₂O y NO_x por la quema prescrita de sabanas; emisiones de CH₄, CO, N₂O y NO_x procedentes de los residuos de las cosechas.

Cambio del uso de la tierra y silvicultura. Los cálculos para esta se concentran en tres actividades principales:

- a) Cambios de biomasa en bosque y en otros tipos de vegetación leñosas. se estudian y evalúan las emisiones o remociones de carbono, que obedecen a los cambios en la biomasa de bosques y otros tipos de vegetación leñosa resultado de la actividad humana.
- b) Conversión de bosques y praderas. Evalúa la conversión de bosques y praderas a tierras de cultivo o pastos permanentes, donde la biomasa generada de la deforestación y la quema del mismo, libera CO₂.
- c) Abandono de las tierras cultivadas. Aborda el cálculo de las remociones netas de CO₂ en la acumulación de biomasa procedentes del abandono de tierras cultivadas

Desechos. Se evalúan las emisiones de CH₄ procedentes de vertederos de residuos sólidos, así como del tratamiento de las aguas residuales, y de las de N₂O

originadas de las excretas humanas. De ellas, en el presente estudio se analiza el CH₄ emitido por la disposición de los residuos sólidos urbanos, de ahí que se profundice en el tema en el siguiente apartado.

II.3.2. Desechos

De acuerdo con lo establecido en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos¹ en su Título 1ro, Art.5, se entiende por residuos a todo aquel material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final [...] Por otro lado, se entiende por Residuos Sólidos Urbanos (RSU) a los residuos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; además de aquellos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole.

Se estima que la generación global de residuos para el 2016 alcanzó los 2.010 billones de toneladas, con 0.74 kg Per cápita (kg/hab-día), la cual muestra una discrepancia regional, misma que está determinada por el crecimiento económico y poblacional y los procesos de urbanización (Kasa, Yao, Bhada-Tata, & Van Woerden, 2018). En general la gestión de los residuos consta de las etapas:

¹ https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf

separación, acopio, aprovechamiento, tratamiento y disposición final, de acuerdo con la Ley de Residuos Sólidos para el Estado de Chiapas y sus Municipios², y de acuerdo con el Reglamento de la Ley de Residuos Sólidos para el Estado de Chiapas y sus Municipios³, los RSU se subclasifican de acuerdo a su composición en:

1. Residuos orgánicos:

- a. Desechos de poda de jardín, flores, pasto, árboles, ramas, hojas, putrescibles.
- b. Desperdicio de alimentos, frutas, verduras y legumbres, cáscaras de huevo.
- c. Restos de café y Té, así como filtros de estos.
- d. Cabello y Pelo.
- e. Pan y su bolsa de papel.
- f. Tortillas.
- g. Productos lácteos.
- h. Servilletas con alimento.
- i. Tierra, polvo, ceniza y aserrín.
- j. Huesos y productos cárnicos.
- k. Desechos de rápida degradación

2. Residuos inorgánicos:

- a. Papel y cartón: periódico, revistas, productos de papel.
- b. Vidrio: botellas, frascos y restos de cristal.
- c. Plásticos: bolsas, envolturas, envases, empaques, embalajes.
- d. Envases de Tetrapak.
- e. Metal (ferroso y no ferroso): latas, tapaderas, corcholatas y utensilios.
- f. Textiles.
- g. Maderas procesadas.

² https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/descargas/residuos_solidos/reformaleyambientaldecreto204.pdf

³ <https://www.poderjudicialchiapas.gob.mx/archivos/manager/669breglamento-de-la-ley-de-residuos-solidos-para-el-estado-de-chiapas-y-sus-municipios-19.02.2020.pdf>

- h. Cerámicas.
 - i. Juguetes.
 - j. Calzado.
 - k. Cuero.
3. Residuos sanitarios
- a. Papel sanitario.
 - b. Toallas sanitarias.
 - c. Pañales desechables.
 - d. Algodones y utensilios de curación de uso domiciliario.
 - e. Rastrillos y cartuchos de rasurar.
 - f. Preservativos.
 - g. Jeringas desechables sin aguja.
 - h. Excretas de animales.
 - i. Colillas de cigarro.
 - j. Otros generados en higiene personal.

Un manejo inadecuado de los RSU, así como de su disposición final, genera impactos tanto ambientales como sociales, ejemplo de ello es la contaminación del aire por olores o quema continua de residuos en descomposición, los cuales emiten calor y gases de combustión, el CH₄ es uno de los principales gases generados que al ser liberado contribuye al calentamiento global, así como tampoco se identifican estrategias de manejo y aprovechamiento de la fracción orgánica de RSU (SEMAHN, 2019b).

Los sitios de disposición final de residuos sólidos se dividen en vertederos controlados y no controlados, en ellos, las emisiones de CH₄ se producen por la presencia de bacterias metanogénicas durante el proceso de descomposición en la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas.

En el municipio, se cuenta con un relleno sanitario, que inició operaciones en el año 2008 (PROMACC, 2015).

Considerando que, año con año, la generación de residuos sólidos aumenta debido a los hábitos de consumo por parte de la población, las emisiones de GEI también experimentarían el mismo comportamiento, por ello, la necesidad de implementar medidas de mitigación resulta de gran importancia para afrontar la problemática ambiental en la cual nos encontramos inmersos hoy día.

II.4. Acciones de mitigación

Por mitigación se entiende a las prácticas que permiten reducir las emisiones de GEI antropogénico, ayudando a afrontar el cambio climático (IPCC, 2014). Las estrategias de mitigación tratan básicamente de intervenir en las causas del cambio climático con resultados a largo plazo y de cobertura global (López López, 2013). Fernández-Reyes (2018), menciona que la mitigación es una de las grandes respuestas consensuadas internacionalmente con el fin de enfrentar el reto que representa el cambio climático, lo que lo hace esencial estar expresadas en los documentos de políticas públicas. Las acciones que se desarrollaron fueron la creación de múltiples acuerdos tales como el Protocolo de Kyoto, el cual se basa en los acuerdos de la CMNUCC y tiene como objetivo la reducción de gases de efecto invernadero tales: CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆ y avanzar en el desarrollo de las energías verdes, así como el Acuerdo de Paris, que busca limitar el aumento de la temperatura y aplicar las medidas necesarias de mitigación. En este sentido, para México, de acuerdo a la Ley General de Cambio Climático, se determina que el objetivo de las políticas públicas para la mitigación de GEI en el sector residuos

consiste en promover el aprovechamiento del potencial energético contenido en los residuos, para reducir las emisiones, mencionando que en la elaboración de dichas políticas se deben acrecentar acciones y promover el desarrollo y la instalación de infraestructura para minimizar y valorizar los residuos, así como para reducir y evitar las emisiones de CH₄ provenientes de los residuos sólidos urbanos⁴. De acuerdo a SEMARNAT e INECC (2012), las acciones de mitigación contempladas para el sector residuos a nivel nacional son:

- Impulsar la participación del sector privado en proyectos de reciclaje, separación de basura, reutilización, confinamiento de desechos, y creación de centros de acopio
- Desarrollar mecanismos y regulaciones que hagan corresponsables a las organizaciones del manejo de los residuos que generan
- Corregir los sistemas tarifarios de los servicios de recolección y tratamiento, de forma que se incentive la reinversión en mejoras tecnológicas y logísticas, y se puedan implementar las mejores prácticas a nivel mundial
- Reforzar las campañas educativas e informativas para sensibilizar a la población sobre la importancia de reducir la generación de desechos y el consumo de agua.

En esta misma línea, en el estado de Chiapas, el Programa de Acción Ante el Cambio Climático (PACCCH, 2011), establece cinco acciones de mitigación en la reducción de CH₄:

⁴ http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_061120.pdf

1. Formar un programa de manejo de aceites y combustibles residuales y centros de acopio en el estado y vincularlo con la producción de biodiesel.
2. Fomentar la cultura de reducción, de re-uso y reciclado de residuos.
3. Fomentar la implementación de sistemas de recolección, separación, reciclaje y aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos adecuados y apropiados a las necesidades de los municipios.
4. Implementar rellenos sanitarios eficientes y sistemas de aprovechamiento de biogás para generar electricidad o quemar el biogás para evitar emisiones de CH₄.
5. Explorar mecanismos de financiamiento para la digestión anaeróbica de los desechos orgánicos sólidos y líquidos en las granjas, rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de agua para reducir y aprovechar emisiones de CH₄.

III. Planteamiento del problema

La inadecuada gestión de los residuos sólidos clasificados como RSU no puede negar la degradación de la calidad ambiental (INE, 1997). El aumento creciente de los Residuos Sólidos (RS) y su mal manejo genera contaminación de aguas, suelos y aire poniendo en riesgo la salud humana, y disminuyendo la biodiversidad, debido a la mortandad de poblaciones animales y la contaminación de especies vegetales de importancia social y económica (Taboada-González, Aguilar-Virgen, & Ojeda-Benitez, 2011); como ejemplos podemos mencionar: deterioro de lugares de recreación, contaminación de acuíferos, contaminación de cuerpos de agua superficiales, salinización de suelos, proliferación de fauna nociva y generación de malos olores, emisiones contaminantes del aire, éstas últimas como consecuencia del desprendimiento de sustancias volátiles contenidas en los residuos; generación de gases como producto de la fermentación de los residuos orgánicos, o como consecuencia del arrastre por el viento de los residuos de distinta índole (Cortinas de Nava, 2001).

De acuerdo a las proyecciones hechas por la CONAPO (Tabla 1), el municipio de Tuxtla Gutiérrez presenta una tendencia en el crecimiento de la población y, como consecuencia, un incremento en la generación de residuos. Para el año de 2019, (SEMAHN, 2019a) estimó que la generación de RSU en Tuxtla Gutiérrez ascendió a 689.21 ton al día. Conforme a SEMARNAT (2016) la generación de residuos está íntimamente ligada al proceso de urbanización. En general se reconoce que éste se acompaña por un mayor incremento del poder adquisitivo de la población que conlleva a estándares de vida con altos niveles de

consumo de bienes y servicios, lo que produce un mayor volumen de residuos. Por el contrario, en las comunidades pequeñas o rurales, los habitantes basan principalmente su consumo en productos menos manufacturados que, por lo general, carecen de materiales que terminan como residuos.

Tabla 1 *Proyecciones de la población para el municipio de Tuxtla Gutiérrez.*

	Año				
	2010	2015	2020	2025	2030
Tuxtla Gutiérrez	699,982	762,738	808,931	844,485	972,637

Fuente: Estimaciones de CONAPO con base en Proyecciones de la población de los municipios de México, 2010 a 2030.

En este sentido, la generación de RSU se convierte en un problema socioambiental, mientras la población crece constantemente, la generación de residuos también lo hace, lo que se expresa en una mayor emisión de gases de efecto invernadero como CH₄.

IV. Antecedentes

En relación a los residuos sólidos, en Chiapas se han realizado diferentes trabajos sobre la caracterización, manejo y disposición final (Esquinca, *et al*, 1996); (Escamirosa, , *et al*, 2001); (Araiza, *et al*, 2015) (Araiza, *et al*, 2017); de manera similar, (Villalobos, 1996), y (Vera Toledo, *et al*, 2013) han caracterizado los RSU en Tuxtla Gutiérrez.

Si bien, el estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero en el estado de Chiapas comienzan hace poco más de una década, se han generados muy pocas investigaciones, dentro de los cuales se expresan como punto de partida el Inventario Estatal de Gases de Efecto Invernadero (PACCCH, 2011), a cargo del Centro de Investigación en Gestión de Riesgo y Cambio Climático (hoy, Instituto de Investigación en Gestión de Riesgo y Cambio Climático) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, bajo tutela de Gobierno del Estado, mediante la Secretaría de Medio Ambiente, Vivienda e Historia Natural, el cual había celebrado un convenio con Conservation International México A. C. y financiado por la Embajada Británica en México. En el inventario se expresan los resultados de GEI de cinco sectores principales: Energía, Procesos industriales, Desechos, Agricultura y las emisiones provenientes a partir del uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura, el que se erigió con las Directrices del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su versión revisada de 1996; en función de los resultados del inventario se estableció el Programa de Acción ante el Cambio Climático del estado (PACCCH), en el cual se instauraron las bases científicas y los componentes generales que dieran pie a integrar, coordinar y

fomentar el desempeño gubernamental en el estado para la reducción de emisiones de GEI, en el que son de observancia para los lineamientos de adaptación para reducir la situación de vulnerabilidad ante el cambio climático así como el desarrollo de las medidas de mitigación que permitiesen la disminución de los GEI. En este sentido el PACCCH (2011) es el primer instrumento en el que se cuantifican las emisiones de GEI generadas por la disposición de RSU en el estado de Chiapas, en el cual se reportan cerca de 862.680 Gg de CO_{2e} en el año 2005

Por otro lado se cuenta con el Inventario de Gases de Efecto Invernadero del municipio de Tuxtla Gutiérrez, el cual establece la línea base para el Programa Municipal ante el Cambio Climático de la ciudad, (PROMACC, 2015) el cual funge como instrumento de política pública que informa la toma de decisiones en la capital de Chiapas para reducir la vulnerabilidad al cambio climático y mitigar las emisiones de GEI, en observancia de la Ley General de Cambio Climático y la Ley para la Adaptación y Mitigación ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas, con vista a mejorar la calidad de vida de la población del municipio en condiciones de Cambio Climático. El PROMACC (2015) es el primer instrumento en el que se cuantifican las emisiones de GEI generados por los RSU en Tuxtla Gutiérrez, en el cual se reportan 248,587 t CO_{2e} por la disposición de 174,697 t de RSU en el año 2010.

V. Justificación

La cuantificación de las emisiones de GEI nace como una necesidad frente al crecimiento de generación de RSU; los patrones de consumo que se observan actualmente atienden a hábitos considerados ostentosos y estos se incrementa con el crecimiento de la urbanización (Diaz Cano & Díaz, 2009), para el año 2020, el municipio de Tuxtla tuvo una generación de 743.41 toneladas de residuos sólidos al día, se estimó que para el año 2010, se tuvo un total de emisiones de 248,586.8 t CO_{2e}, y existió un incremento de 93.2% en las emisiones del año 2005 al 2012 (SEMARNAT, INECC & SEMAHN, 2015). Similar a Tuxtla Gutiérrez, diferentes ciudades han cuantificado las emisiones de GEI por la disposición de residuos como parte de la elaboración de programas municipales; tal es el caso de Villahermosa, Tabasco (PACMUN Villahermosa, 2016) quienes reportaron una emisión de 25,165.61 t CH₄ (528,477 t CO_{2e}) por la disposición de 206,852 t RSU en el año 2013. De igual manera, Xalapa, Veracruz (PACMUN Xalapa, 2013), reportó una emisión de 171,881 t CO_{2e} en el 2010. Al tener como base el Inventario de Gases de Efecto Invernadero del Estado Chiapas (PACCCH, 2011), así como el Inventario Municipal (PROMACC, 2015), resulta necesario analizar el comportamiento de la generación de residuos sólidos en el municipio y generar la actualización del inventario de gases de efecto invernadero, renovar la información preestablecida, con el que se pretende generar el sustento para producir políticas con orientación a la mitigación, con lo que se abren las puertas a la concientización y actuar de la población en general con la difusión del conocimiento generado. A su vez, generar una ventana más amplia sobre el área correspondiente al análisis de emisiones por residuos sólidos en el municipio para posteriores trabajos de investigación.

VI. Objetivos

VI.1. General

- Cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero por la disposición de residuos sólidos en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

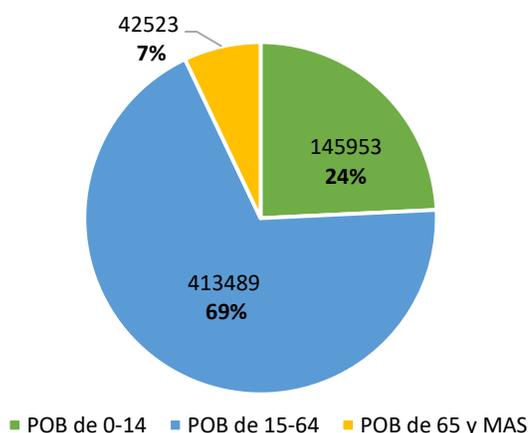
VI.2. Específicos

- Calcular los residuos sólidos generados en Tuxtla Gutiérrez a partir de datos de población y generación per cápita.
- Aplicar las metodologías del IPCC 1996 para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Construir un escenario tendencial con base en la dinámica de crecimiento de la población de Tuxtla Gutiérrez.

VII. Materiales y métodos

VII.1. Área de estudio

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez (Mapa 1), pertenece a la Región socioeconómica 1 Metropolitana, colindando con San Fernando al norte, al este con Chiapa de Corzo, al sur con Suchiapa y al oeste con Ocozocoautla de Espinosa y Berriozábal, se encuentra entre las coordenadas 16°15'11' latitud norte y 93°06'56" longitud oeste (Gobierno del Estado de Chiapas, 2021). De acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2020, el municipio cuenta con una población total de 604,147 habitantes,



Gráfica 1. Distribución de la población del municipio de Tuxtla Gutiérrez

Agricultura de temporal (29.18%), No aplicable (29.09%), Pastizal inducido (3.52%), Pastizal cultivado (1.65%), Bosque de encino (secundaria) (1.43%), Sin vegetación aparente (1.26%), Selva mediana subperennifolia (secundaria) (0.88%) y Selva baja caducifolia (0.71%) (INEGI, 2017).

Los climas existentes en el municipio son: Cálido subhúmedo con lluvias de verano, menos húmedo (99.97%), Cálido subhúmedo con lluvias de verano,

compuesta principalmente por una población de entre 15 a 64 años de edad (Gráfico 1) (INEGI, 2021)

La cobertura vegetal y el aprovechamiento del suelo en el municipio se distribuye de la siguiente manera: Selva baja caducifolia (secundaria) (32.28%),

humedad media (0.03%), Semicálido subhúmedo con lluvias de verano y humedad media (0%) (INEGI, 2008)

En los meses de mayo a octubre, las temperaturas mínimas promedio se distribuyen porcentualmente de la siguiente manera: de 15 a 18 °C (7.22%), de 18 a 21 °C (92.46%) y de 21 a 22.5 °C (0.33%). En tanto que las máximas promedio en este periodo son: de 27 a 30 °C (9.16%), de 30 a 33 °C (80.7%) y de 33 a 34.5 °C (10.14%). Durante los meses de noviembre a abril, las temperaturas mínimas promedio se distribuyen porcentualmente de la siguiente manera: de 12 a 15 °C (98.28%) y de 15 a 18 °C (1.72%). Mientras que las máximas promedio en este mismo periodo son: de 24 a 27 °C (6.97%), de 27 a 30 °C (47.24%) y de 30 a 33 °C (45.79%). En los meses de mayo a octubre, la precipitación media es: de 900 a 1000 mm (91.41%) y de 1000 a 1200 mm (8.59%). En los meses de noviembre a abril, la precipitación media es: de 25 a 50 mm (67.65%), de 50 a 75 mm (16.93%), de 75 a 100 mm (7.6%), de 100 a 125 mm (2.36%), de 125 a 150 mm (2.91%) y de 150 a 200 mm (2.55%) (INEGI, 2008)

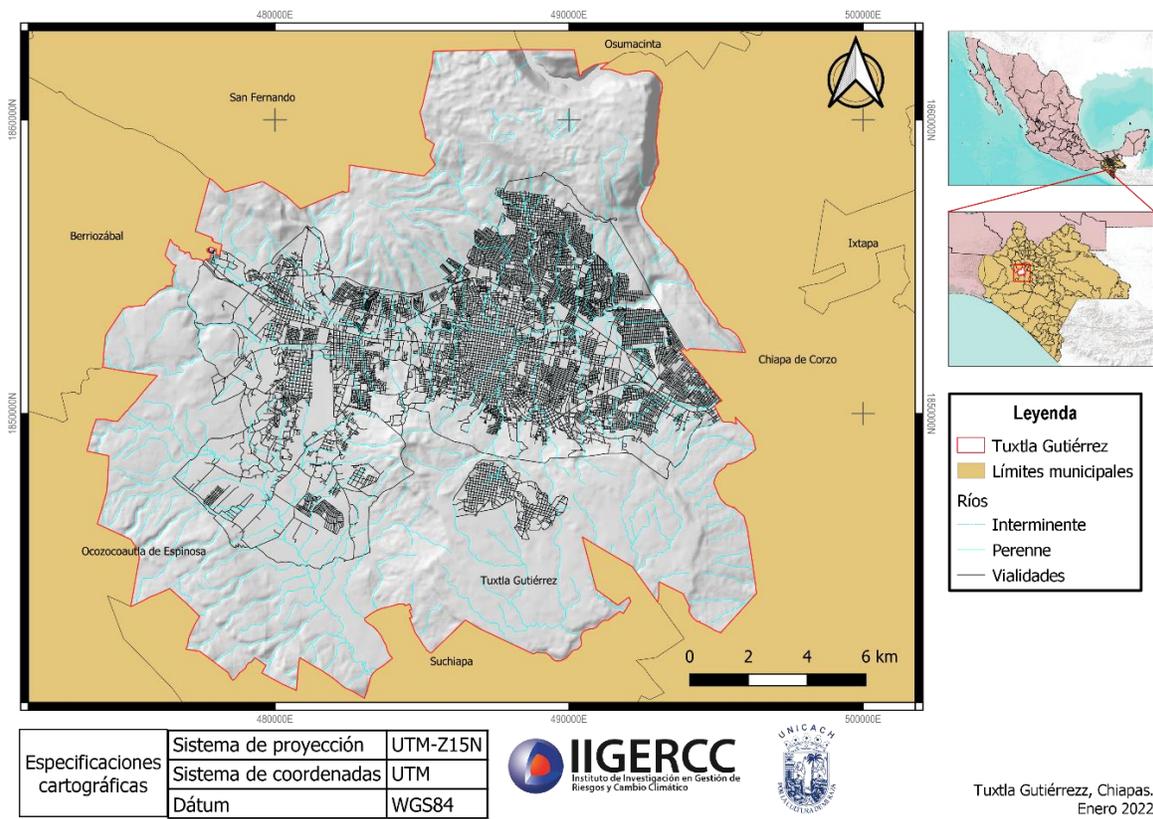


Figura 2. Mapa de ubicación de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez

VII.2. Método

Se consideró la población presente en los años 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020 obtenida de los Censos de Población y Vivienda (INEGI, 2000; 2010; 2020), así como de los Conteos de Población (INEGI, 2005; 2015). Para completar la serie del tamaño de población 2000 a 2020, se calcularon las tasas de crecimiento acorde la información disponible resumida en la Tabla 2 a partir de la aplicación del modelo de crecimiento geométrico expuesto por (Torres-Degró, 2011), que se expresa como:

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

Donde:

r = Tasa de crecimiento anual geométrico

P_{t+n} = Población al momento actual

P_t = Población al momento inicial o población base o población inicial

a = Amplitud o distancia en tiempo entre las dos poblaciones de referencia

Despejando a P_{t+n} se obtiene la expresión para el cálculo de la población actual o del año que se requiera:

$$P^{t+n} = P^t(1 + r)^a \quad (2)$$

Los datos referentes a la generación per cápita (GPC), fueron tomados de los cálculos realizados por el Instituto de Nacional de Ecología y Cambio Climático

(INECC & SEMARNAT, 2007); dichos cálculos fueron realizados para aquellas localidades que no cuentan con estudios o información fidedigna, los cuales son estimaciones mediante inferencia estadística para lo cual tomaron en cuenta el clima, las actividades preponderantes y la zona o la región de interés. Por otro lado, se consideró el dato publicado por la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural (SEMAHN, 2019b) en su “*Guía para el manejo adecuado de los RSU y RME*”, misma que presenta información general sobre los RSU, su creación funge como material informativo y apoyo para entidades de Gobierno en la toma de decisiones. Los valores de GPC empleados se muestran en la Tabla 3. A partir de ello, para completar la serie de GPC 2000 a 2020, se realizó el mismo procedimiento empleado en el apartado anterior a partir del uso del modelo geométrico (ecuación 1) expuesto por Torres-Degro (2011), mismo que se adecuó a este nuevo contexto; siendo para la población inicial, el valor de GPC inicial; la población al momento actual a el valor de GPC actual; siendo que amplitud y tasa de crecimiento representan los mismos conceptos, y para obtener la serie ajustada de datos GPC, se usó la ecuación 2.

Tabla 2. Datos de población total del Municipio de Tuxtla Gutiérrez

Año	2000	2005	2010	2015	2020
Población Total	434,143	503,320	553,374	598,710	604,147

Fuente: (INEGI, 2000; 2005; 2010; 2015; 2021)

Tabla 3 Datos de generación per cápita del Municipio de Tuxtla Gutiérrez

		Año			
		2000	2005	2010	2018
Generación Per	cápita (kg/hab-d)	0.8750	0.9427	1.0155	1.100

Una vez completada la serie de GPC, el cálculo de la generación de RSU en toneladas por año, se obtuvo del producto de datos de población y datos de GPC del año 2000-2020 a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Generación de residuos} \left(\text{ton} \frac{\text{RSU}}{\text{año}} \right) = \frac{((\text{Población anual}) (\text{Generación Per cápita})(365 \text{ días}))}{1000\text{Kg}} \quad (3)$$

La metodología aplicada para el cálculo de emisiones de GEI, en la categoría desechos enfocado a RSU, está basada en las directrices del IPCC en su versión revisada de 1996, para ello se requirió la cantidad anual de RSU del municipio de Tuxtla Gutiérrez, la tasa de generación de RSU (per cápita) y la composición de los desechos, además se consideró que la totalidad de residuos se acumula en el sitio de disposición final. El cálculo de emisiones está determinado por la Ecuación 4

$$\text{Emisiones de } CH_4 \left(\frac{\text{Gg}}{\text{año}} \right) = (\text{RSU}_T \times \text{RSU}_F \times \text{FCM} \times \text{COD}_F \times F \times 16/12 - R) \times (1 - \text{OX}) \quad (4)$$

Dónde:

RSU_T= Total de RSU generados en Gg/año

RSU_F= fracción de los RSU eliminados en los vertederos de residuos sólidos

FCM= factor de corrección para el CH₄ (fracción)

COD= carbono orgánico degradable (fracción)

COD_F= fracción de carbono orgánico degradable asimilado

F= fracción de CH₄ en el gas de vertedero (el valor por defecto es de 0.5)

R = CH₄ recuperado (Gg/año)

OX= factor de oxidación (el valor por defecto es 0)

Se consideró al sitio de disposición final como un tipo de vertedero controlado, por lo que se utilizó el valor por defecto de 0.6 para FCM recomendado por las Directrices del IPCC. Para el COD, se emplearon los valores referidos a la caracterización de los residuos sólidos que se muestran en la Tabla 4 y para su cálculo se usó la Ecuación 5.

$$\text{Porcentaje de COD (por peso)} = 0.4(A) + 0.17(B) + 15(C) + 0.30(D) \quad (5)$$

Dónde:

A= porcentaje de los RSU que corresponde a papel y los textiles

B= porcentaje de los RSU que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos de los alimentos)

C= porcentaje de los RSU que corresponden a los restos de alimentos

D= porcentaje de los RSU que corresponde a madera y paja

Tabla 4. Valores empleados para el cálculo del carbono orgánico degradable

Tipo de desechos		Porcentaje (por peso)
	Cartón	3.2 ^b
A. Papeles y textiles ^a	Papel impresión	0.79 ^b
	Papel periódico	1.14 ^b
	Papel sanitario	6.77 ^b
B. Desechos de jardines y parques y otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos) ^a		12.14 ^b
C. Restos de alimentos ^a	Residuos de alimentos	42.44 ^b
D. Desechos de madera y paja ^a	Madera	0.3 ^b

Nota: Adaptado de ^a *Directrices del IPCC para inventarios nacionales de GEI, (1996, p. 10)*. ^b Araiza Aguilar, Chávez Moreno, & Moreno Pérez, (2017, p. 697)

Con respecto al COD_F y F, se usaron los valores por defecto: 0.77 y 0.5, respectivamente. No se cuenta con información sobre la recuperación anual de CH₄ (R=0). Al tener todos los parámetros, estos fueron sustituidos en la Ecuación 4 para calcular las emisiones de CH₄ anual para toda la serie de tiempo.

VII.2.1. Proyecciones 2021 a 2030.

Una vez que las emisiones del periodo 2000 a 2020 fueron obtenidas, mediante la función pronóstico de Microsoft Excel se realizó el cálculo de las tendencias hasta el año 2030, la cual utiliza el método de regresión lineal para pronosticar el cálculo de un valor futuro a partir de los rangos de valores conocidos, para este caso el comportamiento entre los años y la generación de las emisiones.

VIII. Resultados

VIII.1. Datos de población

Al aplicar la Ecuación 1 a partir de los datos de la Tabla 2, se obtuvieron las tasas de crecimiento para los intervalos de interés en el periodo 2000 a 2020, los cuales tienen una amplitud de 5 años y se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Tasas de crecimiento de la población del Municipio de Tuxtla Gutiérrez.

		Periodo			
		2000 a 2005	2005 a 2010	2010 a 2015	2015 a 2020
Tasa	de	0.030012	0.019142	0.015873	0.001810
crecimiento					

Posterior a la obtención de las tasas de crecimiento, se calculó el tamaño de población anual para el periodo de interés (2000 a 2020), en la Tabla 6 se presenta la serie de datos de la población para el municipio en la cual se observa una tendencia de aumento, la cual presenta un crecimiento más lento hacia al final del período.

Tabla 6 Población de Tuxtla Gutiérrez para el periodo 2000-2020

Año	Población
2000	434,143
2001	447,172
2002	460,593
2003	474,416
2004	488,655
2005	503,320
2006	512,955
2007	522,774
2008	532,781
2009	542,980
2010	553,374
2011	562,158
2012	571,081
2013	580,146
2014	589,355
2015	598,710
2016	599,793
2017	600,879
2018	601,966
2019	603,056
2020	604,147

VIII.2. Resultados de ajuste per cápita y generación de RSU

Los resultados que se presentan en la Tabla 7 corresponden a la generación per cápita; se aprecia en primera instancia un incremento de los datos en el periodo estudiado, siendo para el año 2000 de 0.875, pasando a 1.127 para 2020, lo que equivale a un incremento de 28.8%; la Figura 3, permite constatar la relación existente entre el tamaño de la población y la GPC, aunque se puede observar una disminución en el incremento de la población para los años 2015 a 2020, la GPC sigue la tendencia de aumento. Para explicar lo anterior hay que tomar en cuenta los patrones de consumo, que se convierte potencialmente en una problemática social, debido a las consecuencias que provoca la generación de residuos; deterioro del ambiente, enfermedades, etc., de manera que su gestión debe de ser de carácter prioritario.

La GPC está relacionada principalmente con el desarrollo económico, los patrones de consumo, la urbanización, y la cantidad de población existente, como muestra de ello en el Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 2010 (AIDIS, OPS/OMS, BID, 2010), se presentó una relación directamente proporcional entre la generación de residuos y el PIB per cápita, lo cual exige que a un mayor crecimiento económico se mejoren los servicios de manejo de los residuos sólidos, afirmando esta premisa, es así que SEMARNAT (2016), constata que el crecimiento de la generación de residuos para el periodo 2003 a 2015 fue de la mano con el PIB, y a nivel estatal: quienes contribuyen más al PIB, son quienes también contribuyen más en la generación de RSU.

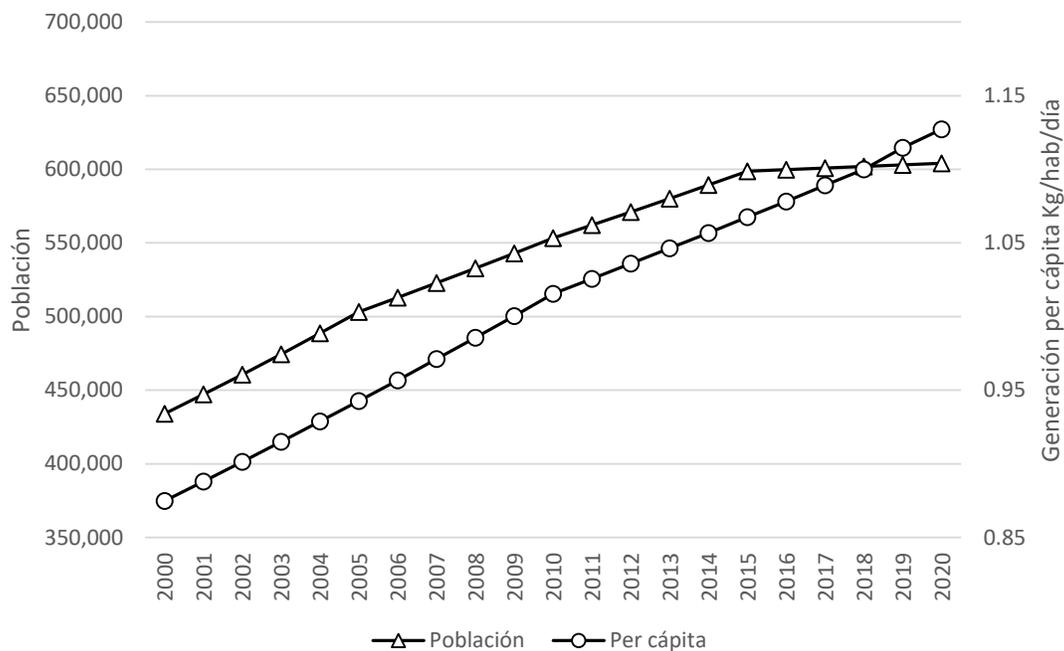


Figura 3. Relación de población y la generación de GPC.

A partir de los valores anuales de generación per cápita y el tamaño de población fue posible calcular las toneladas de residuos generadas anualmente mediante la aplicación de la ecuación 3, los resultados presentan también un incremento a lo largo del periodo.

Tabla 7 .Generación per cápita y toneladas anuales de residuos para el periodo 2000 a 2020.

Año	Generación Per cápita	Ton RSU/año
2000	0.8750	138,654.4
2001	0.8881	144,960.3
2002	0.9015	151,553.0
2003	0.9150	158,445.5
2004	0.9288	165,651.4
2005	0.9427	173,185.1
2006	0.9568	179,145.9
2007	0.9712	185,311.7
2008	0.9857	191,689.9
2009	1.0005	198,287.5
2010	1.0155	205,112.2
2011	1.0257	210,460.3
2012	1.0360	215,947.8
2013	1.0464	221,578.4
2014	1.0569	227,355.8
2015	1.0675	233,283.9
2016	1.0782	236,052.8
2017	1.0891	238,854.5
2018	1.1000	241,689.5
2019	1.1147	245,355.2
2020	1.1273	248,576.8

VIII.3. Cálculo de emisiones

A partir de los valores de la Tabla 7 se procedió a calcular las emisiones de CH₄, en el Anexo 1 se exponen los resultados totales de CH₄. En la Figura 4, se presentan los resultados para la categoría de desechos enfocado en residuos sólidos municipales; para el año 2000 fueron generadas 138,654.4 t de RSU a partir de las cuales se emitieron 5.6713 Gg CH₄ mientras que para el año 2020 se generaron 248,576.8 t de RSU, lo que se traduce en una emisión de 10.167 Gg CH₄. En este sentido, durante el período 2000 a 2020 se generó un aumento de 4,496.09 t CH₄ (94,41.84 t CO_{2e}). Este incremento de emisiones a través del tiempo se atribuye al crecimiento de la población tuxtleca, así como a los hábitos de consumo considerados para una población urbanizada. El municipio representa el 10.9% (604,147 personas) de la población estatal.

De acuerdo a los datos emitidos en PROMACC (2015), para los años 2008 a 2012 las emisiones promedio fueron de 274,093 t CO_{2e}, mientras que para los resultados aquí mostrados el promedio para el mismo periodo asciende a 175,483.175 t CO_{2e}, mostrando una diferencia entre ambos estudios de 98,609.83 t CO_{2e}, tales diferencias se deberían a las técnicas realizadas en cada estudio, mientras que para la elaboración de los resultados de PROMACC se utilizaron datos proporcionados por las dependencias gubernamentales, en el presente estudio se utilizaron estadísticas demográficas y estimaciones a través de modelos de crecimiento de población. Así mismo, para el año de referencia que este define (2010), se emitieron 248,587 t CO_{2e} (11.83 Gg CH₄) lo cual representa una diferencia de 72,405.4 t CO_{2e} (3.44 Gg CH₄), respecto a los resultados que aquí se presentan.

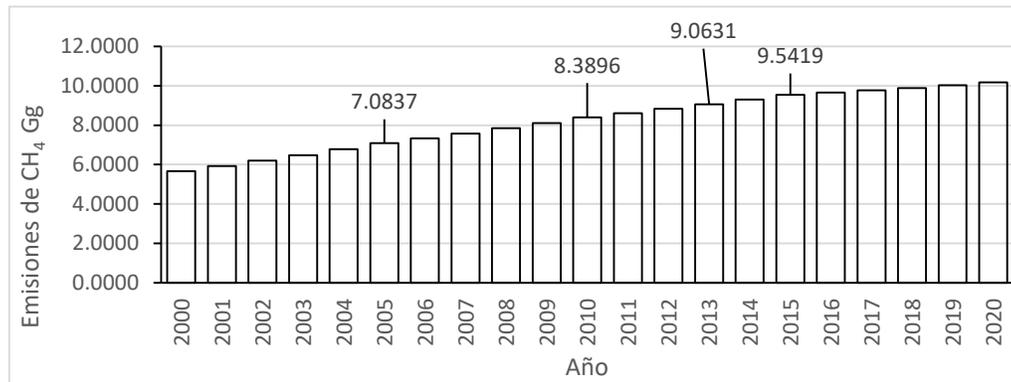


Figura 4. Emisiones de CH₄ en Gg

En contraste con otros estudios de emisiones municipales realizados, las emisiones obtenidas para Cintalapa de Figueroa fueron de 1,976.19 t CH₄ (41,500 t CO₂e) para el año 2005, en tanto que Tuxtla Gutiérrez presenta una generación para ese mismo año de 7,083.69 t CH₄ (190,324.88 t CO₂e), 3.6 veces más que Cintalapa de Figueroa, lo cual es el resultado de una menor generación de residuos al poseer una menor población, representando este el 1.72% de la población estatal (73,668 habitantes en el municipio para ese año).

En cambio, las emisiones obtenidas para Tuxtla Gutiérrez en el año 2010 (176,181 t CO₂e) son mayores a aquellas reportadas para Xalapa, Veracruz (PACMUN Xalapa, 2013), (171, 881 t CO₂e), como consecuencia de una mayor generación de residuos.

En el año de 2013 la ciudad de Villahermosa, Tabasco (PACMUN Villahermosa, 2016), presentó una emisión de 25,165.61 t CH₄, (528,477 t CO₂e) mientras que

para ese mismo año Tuxtla Gutiérrez emitió 9,063.09 t CH₄ (190,324.88 t CO_{2e}); 2.7 veces menos que la ciudad de Villahermosa, esta diferencia puede ser debido a un cambio en la fracción orgánica de residuos, la cual es mayor para esa ciudad.

A partir de los resultados aquí descritos, puede observarse que la problemática de los RSU requiere atención inmediata, ya que la generación y por consecuencia, las emisiones, crece año con año, por lo que el establecimiento de políticas enfocadas al manejo de los residuos, así como a la mitigación de emisiones es evidente.

VIII.4. Proyecciones 2021 a 2030.

Como resultado de los datos proyectados para el periodo 2021 a 2030, se observa una tendencia ascendente, por lo que se evidencia la influencia del aumento de GPC, en relación con el aumento de población, los cuales proyectan escenarios de crecimiento. Se presenta un crecimiento anual de 2.16% de los años 2021 a 2030, por lo que, para el 2030 se tiene un estimado de 269,786.48 t CO_{2e}.

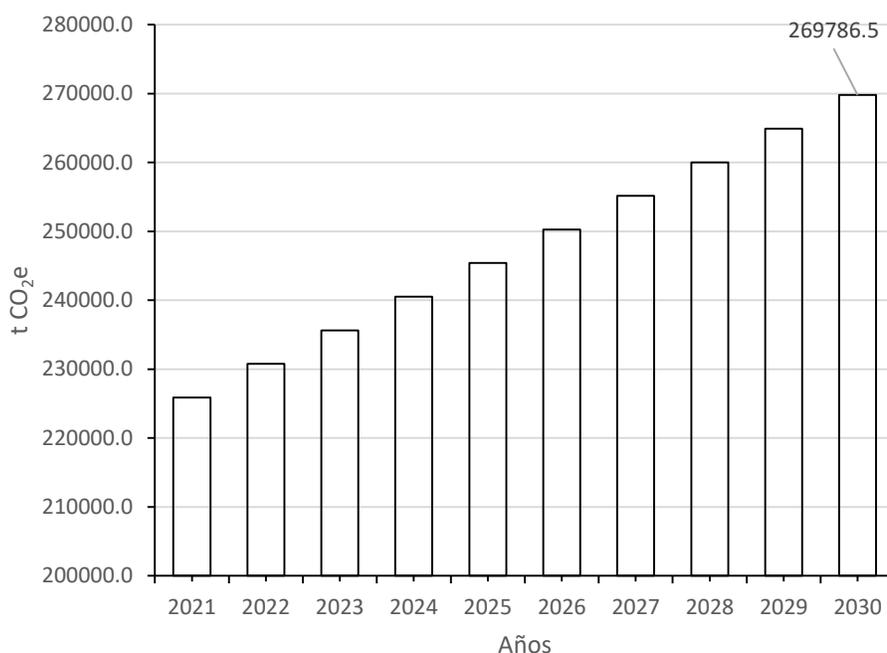


Figura 5. Pronóstico de emisiones para el periodo 2021 a 2030.

De acuerdo con el PROMACC, las emisiones estimadas serian de 248,578 t CO₂e para el año 2015 y 572,579 t CO₂e para 2030; mientras que en el presente estudio se obtuvo una emisión de 200,379.9 t CO₂e para el 2015 y se proyectan 269,786.5 t CO₂e para el 2030. Del mismo modo que con los resultados del cálculo de emisiones, se tiene una diferencia respecto al PROMACC (2015) de 48,198.7 t CO₂e para 2015 y una elevada diferencia con respecto a la proyección para el año 2030 de 302,792.5 t CO₂e, lo cual podría ser atribuido a la diferencia en las técnicas empleadas en ambos estudios.

IX. Conclusiones

Se cuantificaron las emisiones de GEI por la disposición de los RSU en Tuxtla Gutiérrez mediante la metodología descrita anteriormente, los resultados permiten dimensionar la problemática asociada al manejo y disposición de los desechos en la localidad, ya que se logra identificar un crecimiento anual en la generación de RSU y, por consiguiente, la cantidad de CH₄ emitido. A partir de la información generada, fue posible realizar una comparación con aquella que se expone en el PROMACC (2015) en la misma categoría.

Los resultados aquí descritos, permean las áreas de oportunidad en las que es necesario trabajar para mitigar las emisiones de GEI's. Estos comprueban que las emisiones de GEI's para la categoría de desechos, se acrecientan en función del crecimiento del tamaño de población y dependen de los hábitos de consumo que están íntimamente ligados a procesos de urbanización y crecimiento económico, en este aspecto es de carácter importante reconocer las características sociodemográficas-económicas del municipio, debido a la complejidad topográfica, el proceso de gestión de residuos implica un reto municipal.

A seis años desde la publicación del PROMACC, en el que se expresaba que no existía una recuperación del CH₄ emitido que se desprende por la disposición final de los residuos en el relleno sanitario, aún no se tienen datos de implementación sobre algún método de recuperación; como se pudo observar, las emisiones de CH₄ tienen una tendencia ascendente, por ello es preciso atender esta área de oportunidad, con el que se podría mitigar un porcentaje de las emisiones en la categoría de RSU.

El aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, es un área poco explorada, siendo uno de los elementos que más contribuyen a la generación de emisiones de GEI en el municipio al estar confinadas en condiciones anaeróbicas, por lo que, al considerar el alto contenido de materia orgánica en los residuos, el compostaje es una opción viable para el tratamiento de dichos residuos. Asimismo, no se han implementado acciones de política pública en torno a la recolección selectiva, para fomentar un mayor aprovechamiento de los residuos.

Por otra parte, los recolectores de residuos, o bien llamados *pepenadores*, deberían ser un sector involucrado en la gestión integral de residuos, siendo esta una actividad que es visible en el Municipio, por lo que podría ser de utilidad al momento de la recuperación de costes y la implementación de acciones en coordinación con las dependencias municipales. El aprovechamiento de los residuos, sería un apoyo en función de la gestión financiera municipal.

X. Bibliografía

- AIDIS, OPS/OMS, BID. (2010). *Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en ALC 2010*. América Latina y el Caribe: Inter-American; Inter-American.
- Araiza Aguilar, J., Chávez Moreno, J., & Moreno Pérez, J. (2017). Cuantificación de residuos sólidos urbanos generados en la cabecera municipal de Berriozabal, Chiapas México. *Revsista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(4), 691-699.
- Araiza, J., López, C., & Ramírez, N. (2015). Manejo de residuos sólidos urbanos: caso de estudio en Las Margaritas, Chiapas. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica.*, 8(3), 299-311.
- Baird, C., & Cann, M. (2008). *Environmental Chemistry*. University of Western Ontario: W. H. Freeman.
- Benavides Ballesteros, H. O., & León Aristizabal, G. E. (2007). *Infomación técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Colombia: IDEAM.
- Corominas, J. (2014). Los primeros minutos del efecto invernadero. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 11(1), 100-107. Recuperado el 6 de Diciembre de 2020, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92029560010>
- Cortinas de Nava, C. (2001). *Hacia un México sin basura. Bases e implicaciones de las legislaciones sobre residuos*. México, DF: Talleres Gráficos de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Díaz Cano, M., & Díaz, C. E. (2009). El lado oscuro de la sociedad actual: los residuos. *Barataria. Revista Castellano-Manchega de Ciencias sociales*(10), 123-140. Recuperado el 15 de Agosto de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/3221/322127620008.pdf>

- Díaz Cordero, G. (abril-junio de 2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad.*, XXXVIII(2), 227-240. Recuperado el 3 de Diciembre de 2020, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024179004>
- Encinas Malagón, M. D. (2011). *Medio ambiente y contaminación. Principios básicos*. España: Encinas Malagón, Dolores.
- Escamirosa, L., Del Carpio, C., Castañeda, G., & Quintal, C. (2001). *Manejo de los residuos sólidos domiciliarios en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Ciudad de México: Plaza y Valdés Editores.
- Esquinca, F., Escobar, J., Hernández, A., & Villalobos, J. (3 al 7 de Noviembre de 1996). Caracterización y generación de los residuos sólidos de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Memorias. XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Ciudad de México.
- FAO & IFA. (2004). *Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH₃, NO Y N₂O provenientes de las Tierras agrícolas*. Roma: FAO .
- Fernández-Reyes, R. (2018). La comunicación de la mitigación y de la reducción de emisiones. En R. Fernández-Reyes, & D. Rodrigo-Cano, *La comunicación de la mitigación y la adaptación al Cambio Climático* (págs. 59-75). Sevilla: Egregius.
- Gobierno del Estado de Chiapas. (2021). *Perfiles municipales*. CEIEG. Recuperado el 10 de Enero de 2021, de Perfiles municipales. CEIEG: <https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/perfiles/Inicio>
- INE. (1997). *Estadísticas e indicadores de inversión sobre residuos sólidos municipales en los principales centros urbanos de México*. México: Talleres de Desarrollo Gráfico Editorial S.A. de C.V.
- INECC & SEMARNAT. (27 de Agosto de 2007). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Obtenido de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/128/cap3.html>

- INEGI. (2000). Censo de población y Vivienda 2000. México, Estados Unidos Mexicanos.
- INEGI. (2005). Censos de Población. México, Estados Unidos Mexicanos.
- INEGI. (2008). Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas. Estados Unidos Mexicanos.
- INEGI. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. México, Estados Unidos Mexicanos.
- INEGI. (2015). Censos de Población 2015. México, Estados Unidos Mexicanos.
- INEGI. (2017). Marco Geoestadístico Nacional 2017. México.
- INEGI. (2020). *Presentación de resultados. Chiapas*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía : <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825197780>
- INEGI. (30 de Agosto de 2021). Censo de Población y Vivienda 2020. México, Estados Unidos Mexicanos.
- IPCC. (2007). *Informe del Grupo de Trabajo I. Base de las Ciencias Físicas*. Obtenido de IPCC: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-1-1-figure-1.html
- IPCC. (30 de Agosto de 2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado el 06 de Diciembre de 2020, de Intergovernmental Panel on Climate Change: https://archive.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc_es.pdf
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: IPCC.

- IPCC. (2022a). *Working Group I The Physical Science Basis*. Obtenido de IPCC: <https://www.ipcc.ch/working-group/wg1/>
- IPCC. (2022b). *Working Group II Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Obtenido de IPCC: [ipcc.ch/working-group/wg2/](https://www.ipcc.ch/working-group/wg2/)
- IPCC. (2022c). *Working Group III Mitigation of Climate Change*. Obtenido de IPCC: <https://www.ipcc.ch/working-group/wg3/>
- IPCC. (2022d). *The Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI)*. Obtenido de IPCC: <https://www.ipcc.ch/working-group/tfi/>
- Kasa, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank. Recuperado el 05 de Abril de 2022
- Kiehl, J. K., & Trenberth, K. E. (Febrero de 1997). Earth's Annual Global Mean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2), 197-208. Recuperado el 10 de Enero de 2022, de http://climateknowledge.org/figures/Rood_Climate_Change_AOSS480_Documents/Kiehl_Trenberth_Radiative_Balance_BAMS_1997.pdf
- López López, V. (2013). *Cambio Climático y Calentamiento Global* (Segunda ed.). México: Trillas.
- Magaña Rueda, V. O. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. En J. Martínez, & A. Fernández Bremauntz, *Cambio climático: una visión desde México* (págs. 15-25). México: Instituto Nacional de Ecología.
- Martinez-Prado, M. A. (2016). Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero para el estado de Durango, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(2), 575-601.
- Molina, M., Sarukhán, J., & Carabias, J. (2000). *El cambio climático. Causas, efectos y soluciones*. México: Fondo de Cultura Económica.

PACMUN Villahermosa. (2016). *Plan de Acción Climática Municipal*. Recuperado el 20 de febrero de 2022, de <http://transparencia.villahermosa.gob.mx/doctos/concluido/2020/acuerdo0246-20-21-R.pdf>.

PACMUN Xalapa. (2013). *Plan de Acción Climática Municipal de Xalapa de Enríquez, Veracruz*. Recuperado el 20 de febrero de 2022, de <http://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/pacmun/>

PROMACC. (2015). *Programa Municipal Ante el Cambio Climático de Tuxtla Gutiérrez*. Obtenido de Programa Municipal Ante el Cambio Climático de Tuxtla Gutiérrez: <http://www.cecropia.org/humana/tuxtla/data/proyectos/promacc/PROMACC.pdf>.

Sala Querada, J. (2005). *Curso de Climatología General*. Castelló de la Plana, España: Pulicacions de la Universitats Jaume I.

Salomon, S., Quin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., . . . Miller, L. H. (1990). *Informe del Grupo de Trabajo I: Base de las Ciencias Físicas*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: IPCC.

SEMAHN. (2011). *Programa de Acción Ante el Cambio Climático*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: SEMAHN.

SEMAHN. (2019a). *Generación de residuos sólidos urbanos por municipio en Chiapas*. Obtenido de SEMAHN: https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/medio_ambiente/residuos

SEMAHN. (2019b). *Guía para el manejo adecuado de los RSU Y RME*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.: Unidad de Difusión de la SEMAHN.

SEMARNAT & INECC. (2012). *México, Quinta comunicacion Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: Grupo Comunicare, S.C.

- SEMARNAT. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- SEMARNAT, INECC & SEMAHN. (2015). *Programa municipal ante el Cambio Climático de Tuxtla Gutiérrez*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Cecropia.
- Taboada-González, P. A., Aguilar-Virgen, Q., & Ojeda-Benitez, S. (2011). Análisis estadístico de los residuos sólidos domésticos en un municipio fronterizo. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(1), 9-20. Recuperado el 10 de abril de 2021, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323627681002>
- Torres-Degró, A. (abril de 2011). Tasas de crecimiento poblacional (r): Una mirada desde el modelo matemático lineal, geométrico y exponencial. *Revista Electrónica CIDE digital*, 2(1), 143-162.
- Vera Toledo, P., Villalobos Maldonado, J., & Mendoza Castañeda, M. A. (2013). *Manejo y disposición de los residuos sólidos no peligrosos en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Chiapas, México: UNICACH.
- Villalobos, J. (1996). *Manejo y disposición final de los residuos sólidos municipales en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.esis de Maestría. Facultad de Ingeniería Civil*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León.

XI. Anexos

Anexo 1. Emisiones de CH₄ para el periodo 2000 a 2020

Año	Emisiones Gg CH₄	CO₂e
2000	5.67	119,097.27
2001	5.92	124,513.71
2002	6.19	130,176.49
2003	6.48	136,096.80
2004	6.77	142,286.36
2005	7.08	148,757.42
2006	7.32	153,877.40
2007	7.57	159,173.60
2008	7.84	164,652.09
2009	8.11	170,319.13
2010	8.38	176,181.23
2011	8.60	180,774.96
2012	8.83	185,488.47
2013	9.06	190,324.88
2014	9.29	195,287.40
2015	9.54	200,379.30
2016	9.65	202,757.62
2017	9.76	205,164.16
2018	9.88	207,599.27
2019	10.03	210,747.97
2020	10.16	213,515.11

Anexo 2. Proyecciones de emisiones de CH₄ de 2021 a 2030.

Año	Emisiones (Gg CH₄)	CO₂e
2021	10.75	225,893.36
2022	10.98	230,770.37
2023	11.22	235,647.39
2024	11.45	240,524.40
2025	11.68	245,401.41
2026	11.91	250,278.42
2027	12.15	255,155.44
2028	12.38	260,032.45
2029	12.61	264,909.46
2030	12.84	269,786.48