

Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del tratamiento de aguas residuales

IGNAIVIS DE LA CARIDAD CASTILLO LEMUS EMAIL: ignaivis@gmail.com

Instituto de Meteorología (INSMET), La Habana, Cuba

ROSEMARY LÓPEZ LEE EMAIL: rosemary.lopez@insmet.cu

Instituto de Meteorología (INSMET), La Habana, Cuba

RESUMEN

El cambio climático es la mayor amenaza medioambiental a la que se enfrenta la humanidad; solo una acción enérgica y duradera en la reducción de las emisiones puede limitar su alcance. El tratamiento y eliminación de aguas residuales constituye una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Esta actividad influye de forma significativa en las emisiones totales de Cuba, por tanto, es una categoría clave del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. En consecuencia, el objetivo de este estudio fue estimar las emisiones producidas por los tratamientos aplicados a las aguas residuales domésticas e industriales de todo el país (serie temporal 1990-2022). Como principal resultado se obtuvo que el valor de las emisiones en 2022 aumentó 1.31% respecto al año base 1990.

PALABRAS Aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales,

CLAVES: metano, óxido nitroso

Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment

ABSTRACT

Climate change is the greatest environmental threat facing humanity; only vigorous and sustained action to reduce emissions can limit its scope. Wastewater treatment and disposal constitute a source of greenhouse gas emissions globally. This activity significantly influences the total emissions of Cuba, making it a key category in the National Inventory of Greenhouse Gases. Consequently, the objective of this study was to estimate the emissions produced by the treatment of domestic and industrial wastewater across the country (time series 1990-2022). The main finding was that the value of emissions in 2022 increased by 1.31% compared to the baseline year of 1990.

KEYWORDS: Domestic wastewater, industrial wastewater, methane, nitrous oxide

01 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es la mayor amenaza medioambiental a la que se enfrenta la humanidad. Sus cambios se producen con una velocidad e intensidad sin precedentes. Este problema es una realidad que tendrá implicaciones inevitables, pero aún se pueden minimizar sus consecuencias más severas. Solo una acción energética y duradera en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) puede limitar su alcance (Organización Meteorológica Mundial [OMM] 2020). Una de las fuentes emisoras de GEI más importantes a nivel mundial es el tratamiento y eliminación de aguas residuales. Estas pueden ser una fuente de metano (CH₄) cuando se les trata o elimina en medios anaerobios; o una fuente de óxido nitroso (N₂O) cuando se le trata en una planta o se descarga en un cuerpo de agua (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] 2006).

Se consideran aguas residuales domésticas a las aguas residuales generadas en los asentamientos poblacionales, escuelas, instalaciones turísticas, edificios públicos y centros comerciales. Las mismas se componen fundamentalmente de desechos de origen humano. Suelen transferirse por medio de alcantarillas abiertas o cerradas, para recibir tratamiento en plantas centralizadas, letrinas de hoyo, sistemas sépticos, o ser eliminadas en lagunas no gestionadas o en vías fluviales. En algunas ciudades costeras, las aguas residuales domésticas se transfieren directamente al océano (IPCC 2006).

Se consideran aguas residuales industriales a aquellas que derivan exclusivamente de las prácticas industriales. La composición de estas aguas y el contenido de materia orgánica degradable varía según el tipo de producción. La estimación del potencial de producción de CH₄ se basa en la concentración de materia orgánica degradable en el agua residual, el volumen de esta y la propensión del sector industrial a tratar sus aguas residuales. Estas aguas pueden tratarse *in situ* o evacuarse hacia los sistemas de alcantarillados domésticos (IPCC 2006).

En Cuba existe la Norma Cubana NC 27:2012 “Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado”. Existe además la Norma Cubana NC 521:2007 “Vertimiento de Aguas Residuales a la Zona Costera y Aguas Marinas”. Estas normas establecen las especificaciones de los vertimientos de aguas residuales a las aguas terrestres, el alcantarillado, las zonas costeras y las aguas marinas, y se aplica a todas las aguas residuales generadas por las actividades sociales y económicas.

En el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de Cuba el tratamiento y eliminación de aguas residuales es una categoría clave. Esto significa que su estimación influye de forma significativa sobre el inventario total en cuanto al nivel absoluto, la tendencia o la incertidumbre de las emisiones (República de Cuba 2020). Si se mejora el procedimiento de recolección de los datos de actividad al aplicar las directrices del IPCC (2006), se pueden estimar las emisiones de GEI con transparencia y exactitud como lo exige el Marco de Transparencia Reforzado (MTR) del acuerdo de París en 2015. En consecuencia, el objetivo de este estudio fue estimar las emisiones de GEI derivadas de los diferentes tratamientos aplicados a las aguas residuales domésticas e industriales de Cuba para la serie temporal 1990-2022.

02 ASPECTOS METODOLÓGICOS

La estimación de las emisiones de GEI de aguas residuales se realizó mediante una metodología de Nivel 1 y factores de emisión por defecto, de acuerdo al Volumen 5, Capítulo 6, Directrices del IPCC (2006). El período de estudio comprendió la serie temporal 1990-2022 y abarcó todo el territorio de Cuba.

Las emisiones de CH₄ de las aguas domésticas fueron calculadas de: las aguas recolectadas tratadas mediante procesos anaeróbicos (lagunas facultativas), las aguas residuales colectadas evacuadas en

un cuerpo de agua (mar), las aguas residuales no recolectadas tratadas *in situ* (fosas sépticas y letrinas) y las aguas residuales no colectadas y evacuadas en un cuerpo de agua (río). Se calcularon además las emisiones indirectas de N₂O derivadas del consumo humano de proteínas para los efluentes descargados en cuerpos de agua.

La estimación de las emisiones de CH₄ de las aguas residuales industriales tienen una metodología similar a la que se usa para las aguas domésticas, sin embargo, esta se basa en la Demanda Química de Oxígeno (COD del inglés Chemistry Oxygen Demand) y no en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD del inglés Biochemical Oxygen Demand). Las emisiones de CH₄ fueron calculadas de: las aguas residuales industriales tratadas *in situ* en cada sector identificado con alto potencial de producción de CH₄. Las Directrices del IPCC (2006) identifica como insignificantes las emisiones de N₂O de las aguas residuales industriales, por lo que no se calcularon en este estudio.

Tras estimar las emisiones, se reportaron los valores de GEI en forma agregada, expresadas en kilotoneladas (kt) de dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq). Para ello se multiplican las emisiones (en unidades de masa) de cada GEI por su respectivo potencial de calentamiento global (PCG). En Cuba se utilizan, por convenio, los PCG incluidos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014), para un horizonte temporal de cien años (PCGCH₄=28 y PCGN₂O=265).

DATOS DE ACTIVIDAD ESTADÍSTICOS Y PARAMÉTRICOS PARA EL CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE CH₄

En el cálculo de las emisiones de CH₄ de aguas residuales domésticas se consideró tanto las aguas colectadas a través de la red de alcantarillado, como las no colectadas. La variable de actividad empleada fue la cantidad de materia orgánica del agua (TOW, del inglés Total Organic Waste). Para su determinación se utilizó la siguiente ecuación:

$$TOW = P \cdot BOD \cdot 0,001 \cdot I \cdot 365 \quad (1)$$

Donde:

- TOW = Total de materia orgánica en las aguas residuales domésticas del año del inventario, kg de BOD/año
- P = Población del país en el año inventario, personas
- BOD = Demanda Bioquímica de Oxígeno per cápita específico del país en el año correspondiente, g/persona/día
- 0,001 = Factor de conversión de gramos de BOD a kilogramos de BOD
- I = Factor de corrección para BOD industrial que se vierte al alcantarillado junto a las aguas residuales domésticas

Los datos de la población residente anual necesarios para la estimación se obtuvieron de la serie oficial de población proporcionada por la Oficina Nacional de Estadísticas e Información (Tabla 3.5, página 92, ONEI 2023). El BOD que se utilizó en este informe fue el valor por defecto para los países de América Latina de 40,00 g/persona/día (Tabla 6.4, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.14, Directrices IPCC 2006).

Para el factor I se utilizó el valor de 1,25 para las aguas colectadas y el valor de 1,00 para las aguas no colectadas (Ecuación 6.3, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.14, Directrices IPCC 2006). Este factor

de corrección representa el BOD generado por las industrias y los establecimientos (Ej: restaurantes) que se co-descarga al alcantarillado junto con las aguas residuales de origen doméstico.

En el cálculo de las emisiones de CH4 de aguas residuales industriales se utilizó como variable de actividad el TOW para cada sector industrial i . La ecuación empleada para su determinación en este caso fue:

$$TOW_i = P_i \cdot W_i \cdot COD_i \quad (2)$$

Donde:

- TOW_i = Total de materia orgánica en las aguas residuales de la industria i del año del inventario, kg de COD/año
- P_i = Producto industrial total del sector industrial i , t/año
- W_i = aguas residuales generadas, m^3/t producto.
- COD_i = Demanda Química de Oxígeno, kg de COD/ m^3
- i = Sector industrial

Los datos sobre la producción industrial (P_i) para cada sector identificado con alto potencial de producción de CH4 se obtuvieron de la ONEI. La tabla 1 muestra los valores por defecto del IPCC para la generación de residuales por sector (W_i) y la Demanda Química de Oxígeno (COD) (Tabla 6.9, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.25, Directrices IPCC 2006).

Tabla 1. Generación de aguas residuales (W) y Demanda Química de Oxígeno (COD) por tipo de industria

Tipo de industria	W (m^3/t)	COD (kg / m^3)
Conservas de frutas	20,00	5,00
Malta y cerveza	6,30	2,90
Vino	23,00	1,50
Carnes y aves	13,00	4,10
Productos lácteos	7,00	2,70
Refinación de azúcar	11,00	3,20
Procesamiento del pescado	13,00	2,50
Aceites vegetales y grasas	3,10	0,85
Rones	24,00	11,00
Pulpa y papel	162,00	9,00
Detergentes	2,50	0,80
Refinería de petróleo	0,60	1,00
fuente: IPCC (2006)		

FACTORES DE EMISIÓN EMPLEADOS PARA EL CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE CH4

A partir del análisis de la distribución de las aguas residuales domésticas por tipo de vía o sistema de tratamiento y eliminación se pudieron obtener los factores de emisión. A continuación, se muestra la ecuación que se utilizó para el cálculo:

$$EF_j = B_o \cdot MCF_j \quad (3)$$

Donde:

- EF_j = factor de emisión para una vía o sistema de tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas j, kg de CH4/kg de BOD
- B_o = capacidad máxima de producción de CH4, kg de CH4/kg de BOD
- MCF_j = factor corrector para el CH4 para la vía o sistema de tratamiento j

El EF (del inglés emission factor) se calculó con valores por defecto para la capacidad máxima de producción de CH4 (B_o) de 0,60 kg de CH4/kg de BOD (Tabla 6.2, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.12, Directrices IPCC 2006) y el factor corrector para el CH4 (MCF) (Tabla 6.3, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.13, Directrices IPCC 2006). A continuación, se muestran los valores de MCF y los EF empleados para cada sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas (tabla 2).

Tabla 2. Valor de MCF y factor de emisión por sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas

Tipo de vía o sistema de tratamiento	MCF	EF _j
Laguna anaeróbica profunda	0,80	0,48
Fosas sépticas	0,50	0,30
Letrina (clima húmedo)	0,70	0,42
Cuerpo de agua (mar o río)	0,10	0,06

fuente: IPCC (2006)

A partir del análisis de las vías y los sistemas de tratamiento que emplea cada sector industrial se obtuvieron los factores de emisión necesarios. Cada factor de emisión depende de la capacidad máxima de producción de CH4 y el factor corrector para el CH4 promedio ponderado de la industria respectiva. Se utilizó la misma ecuación que en las aguas residuales domésticas (3) con la diferencia de que el BO se expresó en kg de CH4/kg de COD.

Los EF_j se calcularon con valores por defecto para B_o de 0,25 kg de CH4/kg de COD (Capítulo 6, Volumen 5, página 6.23, Directrices IPCC 2006) y MCF (Tabla 6.8, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.23, Directrices IPCC 2006). A continuación, se muestran los valores de MCF, así como los factores de emisión empleados para cada sistema de tratamiento de las aguas residuales domésticas (tabla 3).

Tabla 3. Valor de MCF y factor de emisión por sistema de tratamiento de las aguas residuales industriales

Tipo de vía o sistema de tratamiento	MCF	EF _j
Planta de tratamiento aeróbico bien operada	0,00	0,00
Planta de tratamiento aeróbico mal operada	0,30	0,08
Laguna anaeróbica profunda	0,80	0,20

fuente: IPCC (2006)

La fracción de los efluentes industriales tratados *in situ* en cada sector industrial y el tipo de tratamiento que reciben fue obtenido de cada una de las industrias o ministerios responsables (tabla 4).

Tabla 4. Fracción de las aguas residuales industriales tratadas en Cuba por tipo de tratamiento y sector industrial

Sector Industrial	Tratadas en:		
	Lagunas anaeróbicas	Plantas aeróbicas	Plantas aeróbicas mal operadas
Conservas de frutas ¹	0,38	-	-
Malta y cerveza ¹	0,44	-	-
Vino ¹	0,11	-	-
Carnes y aves ¹	0,44	0,05	-
Productos lácteos ¹	0,34	0,14	-
Refinación de azúcar ²	1,00	-	-
Procesamiento del pescado ¹	0,55	-	-
Aceites vegetales y grasas ¹	0,25	-	-
Rones ¹	0,33	0,16	-
Pulpa y papel ³	-	-	0,33
Detergentes ⁴	-	-	1,00
Refinería de petróleo ⁵	0,75	0,25	-

fuente: 1- OSDE Agroalimentaria y Ministerio de la Industria Alimentaria (MINAL); 2- AZCUBA; 3- Ministerio de Industrias (MINDUS); 4- Suchel Camacho S,A; 5- Unión Cuba Petróleo, Ministerio de Energía y Minas (CUPET, MINEM)

Finalmente, las emisiones de CH₄ estimadas para las aguas residuales domésticas estuvieron constituidas por la sumatoria de los productos de los factores de emisión, las cargas orgánicas y los grados de utilización de cada tipo de tratamiento.

$$\text{Emisiones de CH}_4 = [\sum_{ij} (U_i \cdot T_{ij} \cdot EF_j)] \cdot (TOW - S) - R \quad (4)$$

Donde:

- *Emisiones de CH₄* = Emisiones neta de CH₄, kt de CH₄
- *U_i* = Fracción de la población del grupo de ingresos i en el año de inventario
- *T_{ij}* = Grado de utilización de vía o sistema de tratamiento j, para cada fracción de grupo de ingreso i, en el año del inventario
- *EF_j* = Factor de emisión para la vía o sistema de tratamiento j, kg de CH₄/kg de DBO

- TOW = Total de materia orgánica en las aguas residuales domésticas del año del inventario, kg de BOD/año
- S = Componente orgánico separado como lodos durante el año de inventario, kg BOD/año
- R = Cantidad de CH4 recuperado y/o quemado en antorcha durante el año del inventario, kg de CH4/año

La fracción de la población del grupo de ingresos (Ui) fue calculada a partir de los datos de la población total urbana y rural de las estadísticas nacionales (Tabla 3.5, página 92, ONEI 2023). El grado de utilización (Tij) correspondió a los residentes urbanos y rurales cuyas aguas residuales domésticas fueron tratadas en: lagunas facultativas, fosas sépticas y letrinas o vertidas a un cuerpo de agua (Instituto Nacional de Recursos Hídricos, INRH).

Las emisiones de CH4 estimadas para las aguas residuales industriales estuvieron constituidas por la sumatoria de los productos de la carga orgánica y el factor de emisión para cada sector industrial:

$$\text{Emisiones de } CH_4 = \sum [(TOW_i - S_i) \cdot EF_j - R_i] \quad (5)$$

Donde:

- $Emisiones de CH_4$ = Emisiones de CH4 durante el año de inventario, kg de CH4/año.
- TOW_i = Total de materia orgánica en las aguas residuales de la industria i del año del inventario, kg de COD/año
- S_i = Componente orgánico separado como lodo durante todo el año de inventario para el sector industrial i , kg de COD/año
- R_i = Cantidad de CH4 recuperada durante el año del inventario por el sector industrial i , kg de CH4/año
- EF_j = Factor de emisión para la vía o sistema de tratamiento j , kg de CH4/kg de COD. Si en una industria se utiliza más de un tipo de tratamiento, este factor debe corresponder a un promedio ponderado

No se pudo recolectar información sobre el componente orgánico separado como lodo (S_i) ni de la cantidad de CH4 recuperada (R_i), por lo que se empleó el valor por defecto 0.

EMISIONES INDIRECTAS DE N2O

En Cuba no se lleva a cabo el proceso de nitrificación y desnitrificación en sistemas centralizados de plantas de tratamiento, por lo que las emisiones de N2O se generaron después de la eliminación de los efluentes en vías fluviales, lagos o en el mar. Para la estimación de las emisiones indirectas de N2O se aplicó la ecuación:

$$\text{Emisiones } N_2O = N_{\text{efluentes}} \cdot EF_{\text{efluentes}} \cdot 44/28 \quad (6)$$

Donde:

- $Emisiones N_2O$ = Emisiones de N2O durante el año del inventario, kg de N2O/año

- $N_{efluentes}$ = Nitrógeno en el efluente eliminado en medios acuáticos, kg de N/año
- $EF_{efluentes}$ = Factor de emisión para las emisiones de N₂O provenientes de las descargas de aguas servidas, kg de N₂O-N en kg de N₂O
- El factor 44/28 corresponde a la conversión de kg de N₂O-N en kg de N₂O

La variable de actividad es el factor $N_{efluentes}$ que no es más que la cantidad total anual de nitrógeno en los efluentes de aguas residuales. Para su determinación se empleó la ecuación:

$$N_{efluentes} = (P \cdot \text{Proteína} \cdot F_{NPR} \cdot F_{NON-CON} \cdot F_{IND-COM}) - N_{Lodo} \quad (7)$$

Donde:

- $N_{efluentes}$ = cantidad total anual de nitrógeno en los efluentes de aguas residuales, kg de N₂O/año
- P = población humana
- Proteína = consumo per cápita anual de proteínas, kg/persona/año
- F_{NPR} = fracción de nitrógeno en las proteínas, por defecto = 0,16 kg de N/kg de proteína
- $F_{NON-CON}$ = factor de las proteínas no consumidas añadidas a las aguas residuales (por defecto = 1,10)
- $F_{IND-COM}$ = factor para las proteínas industriales y comerciales co-eliminadas en los sistemas de alcantarillado (por defecto = 1,25)
- N_{Lodo} = nitrógeno separado con el lodo residual (por defecto = 0), kg de N/año

Los datos de población utilizados fueron los reportados por la ONEI. Se asumió para el consumo anual de proteína per cápita, el valor de suministro de proteínas de la base de datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO del inglés, Food and Agriculture Organization) multiplicado por la fracción de proteínas consumidas para América Latina (0.92) recomendado en el Refinamiento de las Directrices del IPCC (2019). La FAO proporcionó para el periodo 1990-2013 una serie de valores año a año (FAOSTAT 2013). Sin embargo, para el periodo 2014-2018 proporcionó una serie valores estimados para un promedio de tres años (FAOSTAT 2021). A partir de técnicas de extrapolación se completaron los datos para 2019, 2020, 2021 y 2022.

El factor de emisión del N₂O se tomó en base a los datos por defecto para la metodología del N₂O proporcionados en las Directrices del IPCC (2006). Para el caso de los efluentes, el factor corresponde a un valor de 0,005 kg de N₂O-N/kg de N.

03 EMISIONES DE GEI PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

VÍAS Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS IDENTIFICADOS

La figura 1 muestra los sistemas de tratamiento y vías de eliminación identificados en Cuba para las aguas residuales domésticas durante el periodo 1990-2022. En las zonas urbanas, para la fracción

de las aguas colectadas en el alcantarillado que fueron tratadas se utilizó el sistema de lagunas facultativas con profundidad entre 1,5 m y 3 m. El resto de las aguas colectadas en el alcantarillado recibieron un tratamiento primario, donde los sólidos más voluminosos se separan mediante barreras físicas y posteriormente fueron evacuadas en un emisario submarino. Las aguas no colectadas en el alcantarillado fueron tratadas en su mayoría en sistemas sépticos.

En las zonas rurales el tratamiento de las aguas residuales colectadas en el alcantarillado fue prácticamente nulo o limitado y estas fueron vertidas en ríos en su mayoría. Para las aguas no colectadas en el alcantarillado se utilizó principalmente el sistema de tratamiento de fosas sépticas, y en menor grado las letrinas. Existió además una fracción de la población urbana y rural sin acceso a cobertura de saneamiento. En este caso se asumió que sus aguas fueron depositadas en un cuerpo de agua.

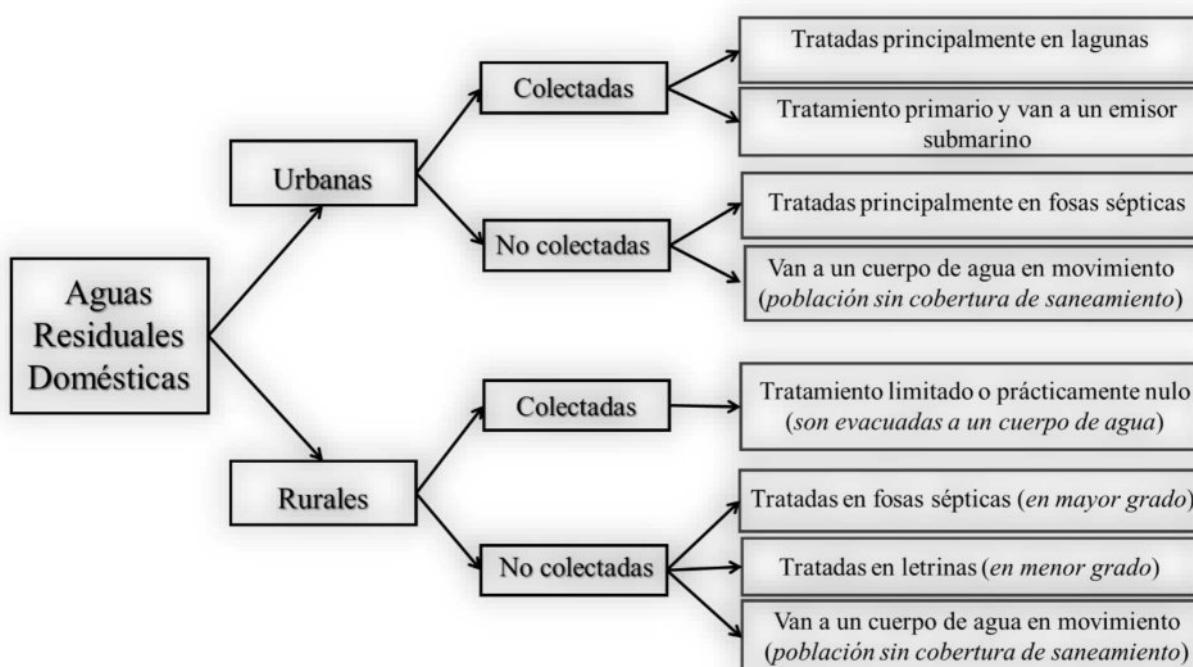


Figura 1. Sistemas de tratamiento y vías de eliminación de las aguas residuales domésticas en Cuba

En la figura 2 se observa el comportamiento de las aguas residuales tratadas en Cuba frente a las no tratadas (serie 1990-2022). Durante los primeros años de la serie el total de aguas residuales tratadas mostró una tendencia ascendente. Entre 1993-1995 se evidenció una disminución en el tratamiento producto a las coyunturas económicas sufridas en el país, aun así, la tendencia continuó en ascenso con pequeñas fluctuaciones interanuales. A partir del 2000 inició en el país un proceso de reorganización del INRH que dio paso a la aparición en 2002 del Grupo Empresarial de Acueducto y Alcantarillado (GEAAL). Como consecuencia, se observó un aumento del total de aguas tratadas.

La explotación prolongada de la infraestructura de saneamiento sin el mantenimiento adecuado y necesario, provocó que en 2009 disminuyera el tratamiento de aguas residuales. A partir de la aprobación de los lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, se elaboró la Política Nacional del Agua, aprobada por el Consejo de Ministros en diciembre del 2012. Esta política encausó el camino del agua en Cuba y ya en 2013 se observaron las mejoras respecto al total de aguas tratadas. En 2019, como parte del proceso de perfeccionamiento empresarial y mediante la Resolución 138-2019 del Ministerio de Economía y Planificación cambió la denominación

de GEAAL por Grupo Empresarial de Agua y Saneamiento. Desde entonces la cobertura de saneamiento ha ido en aumento constante en el país. En 2022 el OSDE contaba con 29 empresas encargadas de: la colección y el tratamiento de aguas residuales; la desobstrucción, reparación y sustitución de sistemas sépticos; el saneamiento de arroyos y cañadas; y la evacuación de aguas residuales.

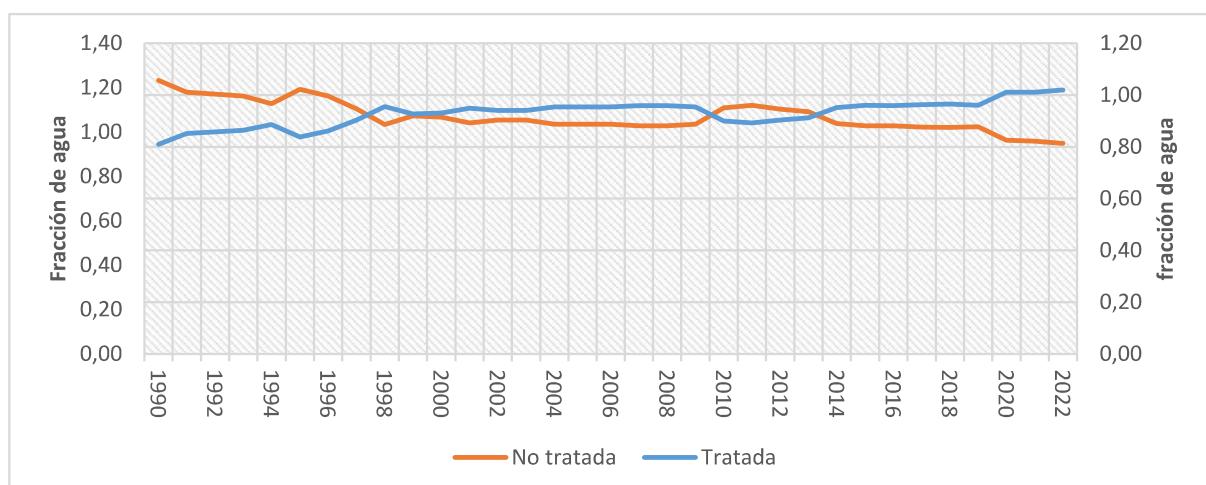


Figura 2. Evolución de las aguas residuales domésticas tratadas y no tratadas en Cuba. Serie 1990 – 2022

SECTORES INDUSTRIALES Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES IDENTIFICADOS

Fueron identificados los sectores industriales con flujos de aguas residuales industriales que contienen cargas de carbono y que se trataron bajo condiciones anaeróbicas para los cuales las Directrices del IPCC (2006) proporciona valores por defecto:

- Producción de bebidas alcohólicas (incluye: producción de rones, producción de maltas y cervezas y producción de vinos).
- Producción de alimentos (incluye: productos lácteos con excepción del helado y las mantequillas, procesamiento de carnes incluidas las aves, procesamiento de pescados incluidos los mariscos y producción de aceites vegetales y grasas animales).
- Refinación del azúcar.
- Producción de pulpa y papel.
- Refinación del petróleo (incluye: todos los derivados).
- Producción de detergentes.

En general, solo una parte de las aguas residuales industriales recibieron tratamiento en sistemas de gestión en el período estudiado (1990-2022). Los sistemas de tratamiento y eliminación fueron básicamente las lagunas anaeróbicas profundas y algunas plantas de tratamiento que operaron en cada año evaluado. El resto de las aguas reciben un pretratamiento mediante barreras físicas para separar las grasas y/o los sólidos más voluminosos y posteriormente fueron a un cuerpo de agua en movimiento. La información sobre la fracción de aguas residuales tratadas, así como el tipo de

tratamiento para cada sector industrial se obtuvo de cada una de las industrias correspondientes (figura 3).

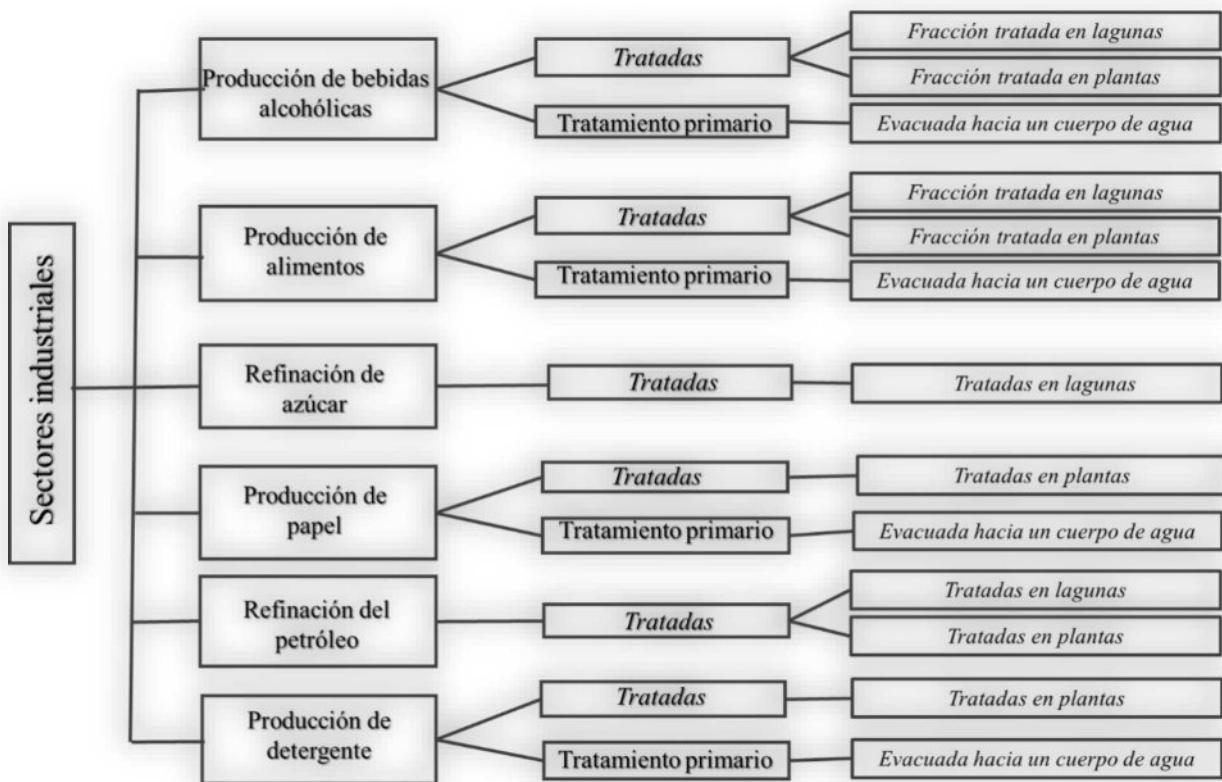


Figura 3. Sectores industriales y sistemas de gestión de sus aguas residuales colectadas

La figura 4 muestra el comportamiento del total de la materia orgánica degradable de las aguas residuales industriales en Cuba, agrupadas en los procesos industriales que contienen mayor carga orgánica en sus residuales. En la década del 90 se observan notables reducciones del TOW debido a la crisis económica que enfrentó el país. Esta crisis propició una depresión de la industria y una reducción en las producciones.

En lo adelante la carga contaminante generada continuó su variación en respuesta a las condiciones adversas que enfrenta la industria cubana. En el quinquenio 1999-2003 el TOW disminuyó y en los años posteriores aumentó de forma gradual. La producción industrial volvió a decaer en el año 2021 debido a las reducciones económicas derivadas de las medidas para contener la pandemia de COVID-19.

Si se analiza por industrias se puede observar que la producción de bebidas alcohólicas es el sector que genera las aguas residuales con mayor contenido de materia orgánica degradable. Durante toda la serie este sector ha mostrado una tendencia al aumento del TOW derivado al incremento de las producciones de rones, cervezas y vinos.

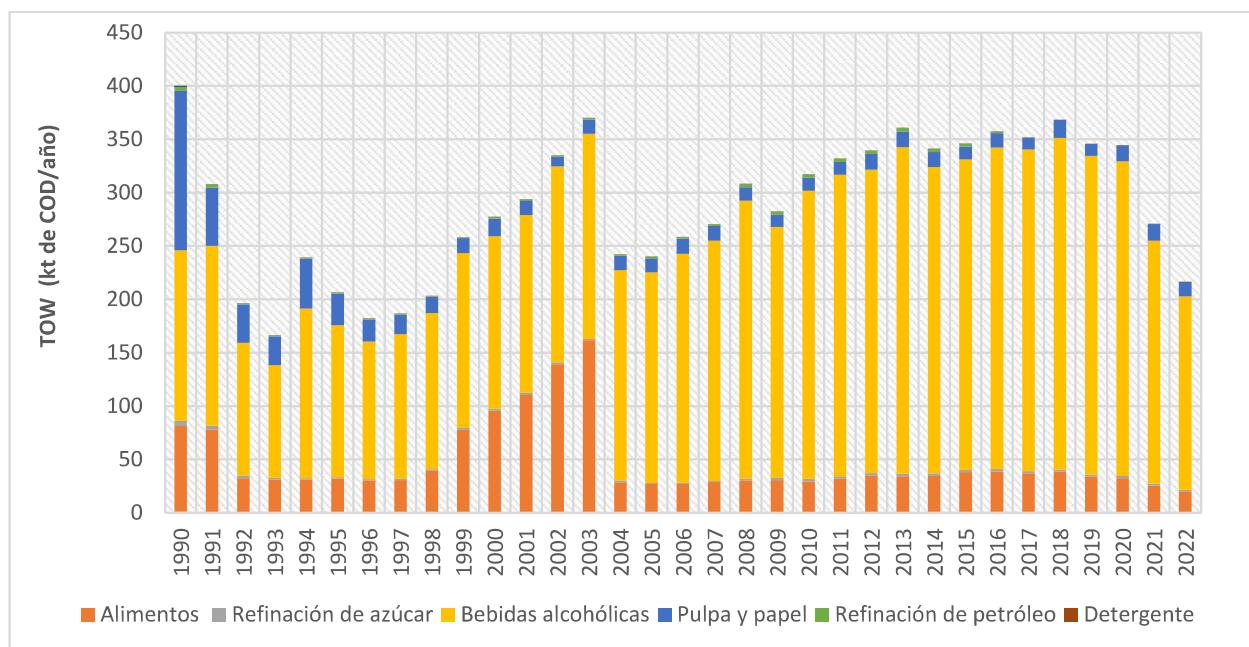


Figura 4. Total de la materia orgánica degradable (TOW) de las aguas residuales industriales generadas en Cuba. Serie 1990-2022

EMISIONES TOTALES DE GEI PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

En la figura 5 se muestran las emisiones derivadas del tratamiento y eliminación de aguas residuales en Cuba durante el período 1990-2022. Entre 1992 y 1997 la serie mantuvo una tendencia a la disminución con fluctuaciones pequeñas. Esta tendencia se debió sobre todo a la disminución de las aguas residuales industriales tratadas. Entre 1998 y 2002 se observó una tendencia ascendente en respuesta al aumento del volumen de aguas residuales industriales tratadas.

En 2004 disminuyeron las producciones industriales en el país y con ello la generación de aguas residuales, lo que derivó en la disminución de las emisiones. A partir de aquí se observó un aumento gradual, con pequeñas variaciones, que se vinculó con cambios en la generación de aguas residuales industriales y en menor medida con el tratamiento de las domésticas. A partir de 2020 mejoró la cobertura de saneamiento en el país y aumentaron las emisiones derivadas de aguas domésticas, pero la disminución de las producciones industriales provocó que disminuyeran las emisiones en 2021 y 2022. Aun así, las emisiones de GEI en 2022 contabilizaron un total de 1936.59 kt de CO₂-eq; valor que representó un aumento de 1.31% respecto a 1990.

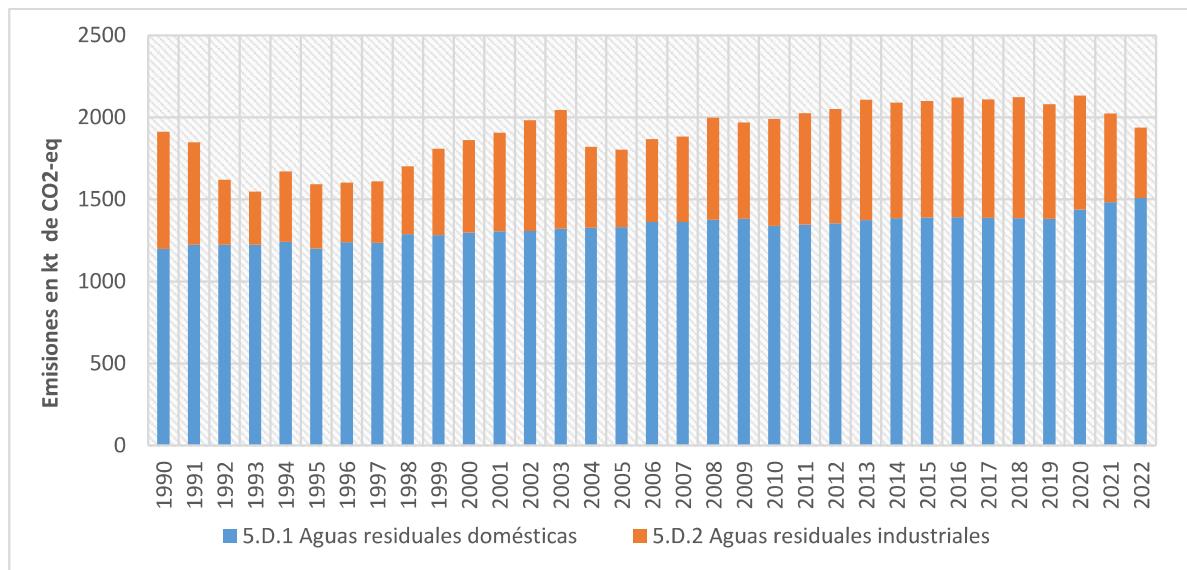


Figura 5. Emisiones de GEI (kt de CO₂-eq) procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales. Serie 1990-2022

Si se compara con el año base 1990 se observa que en 2022 las emisiones de aguas residuales industriales habían disminuido mientras que las emisiones de aguas residuales domésticas habían aumentado (figura 6). La disminución identificada se debió al limitado desarrollo industrial, la caída de las producciones en cada uno de los sectores y la consecuente disminución de la generación de aguas residuales industriales. Por otra parte, el incremento en las emisiones de GEI de las aguas residuales domésticas se debió al aumento de la cobertura de saneamiento en el país.

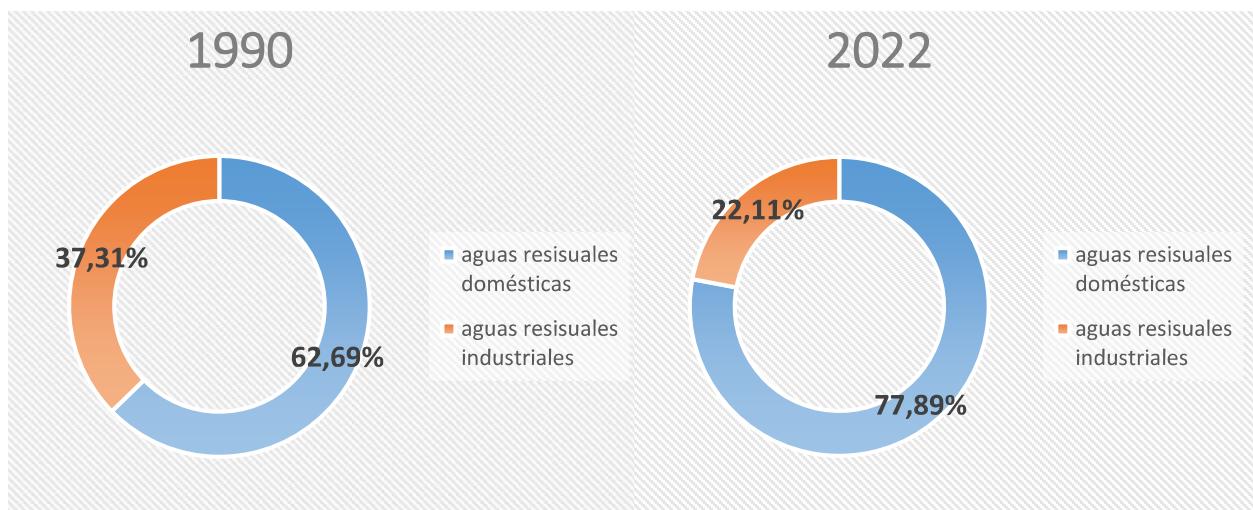


Figura 6. Emisiones de GEI (kt de CO₂-eq) procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas e industriales en el año base (1990) y en el año inventariado (2022)

Al analizar el comportamiento de las emisiones por tipo de gas se encontró que durante toda la serie temporal el CH₄ fue el GEI que más emitió el tratamiento y eliminación de aguas residuales (figura 7). Esto se debe a que las emisiones de N₂O cuantificadas solo se producen cuando los efluentes de aguas residuales domésticas son vertidos a lagunas, lagos, estuarios o el mar; mientras que las emisiones de CH₄ se producen en todos los tipos de tratamiento o vías de eliminación inventariados.

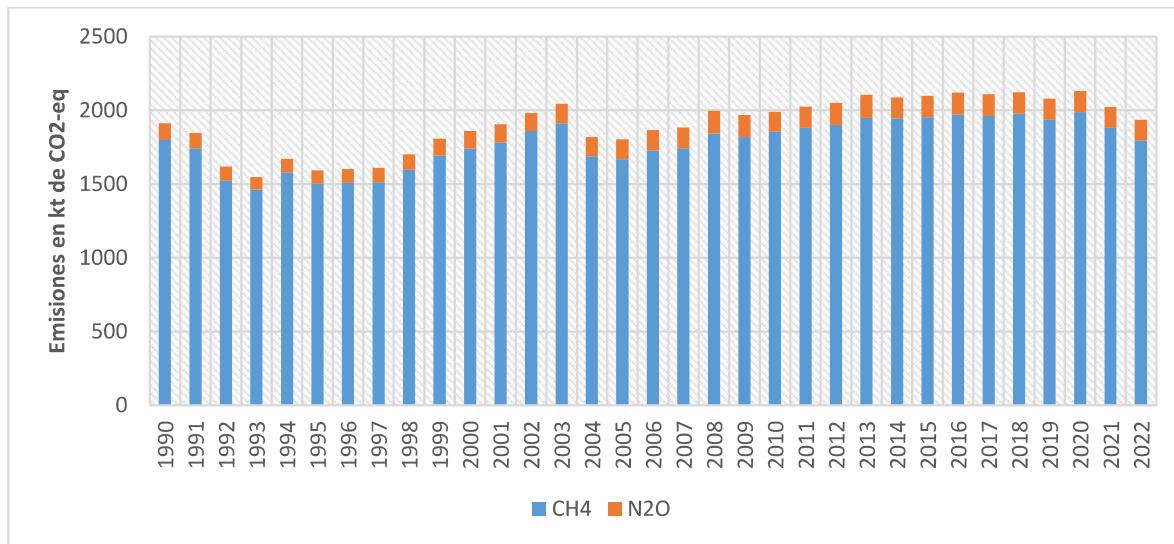


Figura 7. Emisiones por tipo de GEI (kt de CO₂-eq) procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales. Serie 1990-2022

Aun así, al comparar con el año base se encontró un incremento en 2022 de las emisiones de N₂O en torno a un 2% (figura 8) debido al aumento del total de aguas residuales domésticas colectadas en alcantarillado y vertidas a cuerpos de agua.

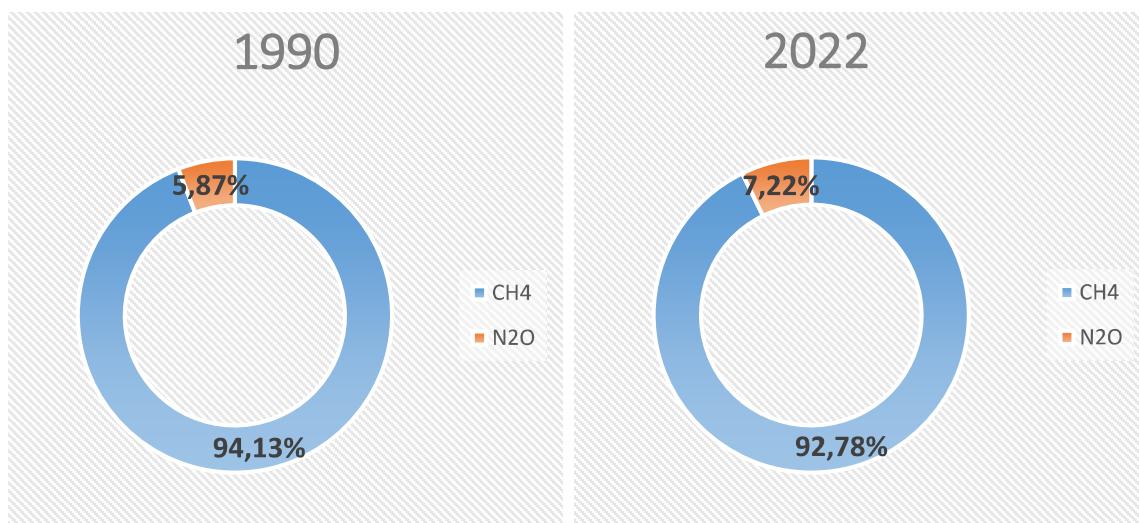


Figura 8. Emisiones por tipo de GEI (kt de CO₂-eq) procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas e industriales en el año base (1990) y en el año inventariado (2022)

05 CONCLUSIONES

- Aunque ha aumentado la cobertura de saneamiento a nivel nacional, se hace necesario incrementar y potenciar el uso de sistemas de tratamiento de agua residuales, tanto domésticas como industriales, más amigables con el planeta.
- Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales en Cuba hasta 2022 habían aumentado respecto al año base 1990.

- La mayor parte de las emisiones procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales en Cuba corresponden al metano, segundo gas con mayor contribución al cambio climático.
- Si bien es cierto que las emisiones de GEI en Cuba difieren de las alarmantes cifras mundiales, es necesario entender que cualquier aporte a la mitigación, por pequeño que sea, resultará en la disminución de las consecuencias y el impacto del cambio climático.

06 REFERENCIAS

- FAOSTAT** (2013). "Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food Balances. 2013". URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBSH>
- FAOSTAT** (2021). "Food and Agriculture Organization of the United Nations. Avarage protein supply. 2021". URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#country/49>
- IPCC** (2006). "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste". Pipatti, R., Svardal, P., Silvana, J.W., Gao, Q., López, C., Mareckova, K., Oonk, H., Scheehle, E., Sharma, Ch., Smith, A., Yamada, M., Sabin, G.H., Koch, M., Svardal, P., Manso, S.M. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan.
- IPCC** (2014). "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change" Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- ONEI** (2023). "Oficina Nacional de Estadísticas e Información. Anuario Estadístico 2022". URL: <http://www.onei.gob.cu>
- ONN** (2007). "Oficina Nacional de Normalización. Norma Cubana NC 521:2007. Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas". La Habana, oct. 2007.
- ONN** (2012). "Oficina Nacional de Normalización. Norma Cubana NC 27:2012. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado". La Habana, oct. 2012.
- OMM** (2020). "Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero". ISSN 2078-0796, extraído de: http://library.wmo.int/%3Flvl%3Dnotice_display%26id%3D21819&ved
- República de Cuba** (2020). "Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático". Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, República de Cuba.

Conflicto de intereses

Las autoras declaran que no existen conflictos de intereses en la realización de esta investigación.

Contribución de los autores

Ambas autoras contribuyeron a la realización del artículo y aprobaron la versión final.

Ignávis de la Caridad Castillo Lemus <https://orcid.org/0009-0009-3984-823X>

Se encargó del procesamiento de los datos, su análisis y e interpretación. Llevó a cabo la investigación, la redacción y la edición del documento final.

Rosemary López Lee <https://orcid.org/0000-0002-6144-7709>

Fue responsable de la conceptualización y supervisión de la investigación. Realizó contribuciones al análisis de los resultados y detalló la metodología escogida para facilitar su aplicación.