



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**IMPULSANDO LOS OBJETIVOS INTERNACIONALES DE CERO EMISIONES NETAS
MEDIANTE EL ESTUDIO Y ANÁLISIS DE EMISIONES GLOBALES DE GASES DE
EFECTO INVERNADERO**

TESIS

Presentada por:

I.Q. Yazmin Trejo Jerónimo

**A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química
como requisito parcial para obtener el grado de:**

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.

DIRECTOR: Dr. Luis Fernando Lira Barragán

CO-DIRECTOR: Dr. José María Ponce Ortega

Morelia Michoacán, Agosto del 2025

RESUMEN

Derivado de la crisis climática que actualmente enfrenta la humanidad, gobiernos y organizaciones mundiales, han pactado establecer medidas y políticas hacia una economía libre de carbono, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas principalmente por el sector energético, no dan tregua en el daño causado a la atmósfera de la tierra, lo cual ha generado el cambio climático y en gran medida provocado por acciones de la humanidad.

En este marco, resulta crucial evaluar cuantitativamente la influencia de las actividades antropogénicas en la dinámica del sistema climático. Por consiguiente, este estudio realiza una evaluación detallada de las emisiones de gases de efecto invernadero, considerando su magnitud, distribución temporal y espacial, así como su relación con las actividades antropogénicas de los tres principales GEI: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), de 108 países, durante un periodo de 30 años (1990-2020), utilizando agrupaciones con una métrica de deformación dinámica del tiempo (DTW por sus siglas en inglés), identificando grupos de emisiones altas, medias y bajas en función de las emisiones totales y per cápita.

El CO₂, impulsado por el uso de combustibles fósiles en la energía, la industria y el transporte, domina las emisiones; en este contexto, China y Estados Unidos representan el 44% a nivel mundial. Mientras que los principales emisores del metano procedente de la agricultura y la extracción de combustibles fósiles son India, Brasil y Turkmenistán, el N₂O, vinculado a los fertilizantes a base de nitrógeno, muestra altas contribuciones per cápita de Australia, Nueva Zelanda y algunos países de África. Con todo el análisis desarrollado es fundamental contar con estrategias de mitigación adaptadas que aborden los factores regionales y sectoriales específicos, haciendo hincapié en las transiciones energéticas, la agricultura sostenible y la gestión del uso de la tierra para avanzar hacia el objetivo global de cero emisiones netas. La agrupación proporciona a los responsables de la formulación de políticas un marco para una acción climática específica, alineando los perfiles de emisiones con las soluciones.

Palabras clave: Emisiones de gases de efecto invernadero, Análisis de agrupación en clústeres, CO₂, CH₄, N₂O, Objetivos de cero emisiones netas, Cambio climático, Transición energética, Energías renovables, Calentamiento global.

ABSTRACT

As a result of the climate crisis currently facing humanity, governments and global organizations have agreed to establish measures and policies toward a carbon-free economy. Greenhouse gas (GHG) emissions, generated primarily by the energy sector, continue to increase the damage caused to the Earth's atmosphere. This has generated climate change, largely caused by human actions.

In this context, it is crucial to quantitatively assess the influence of anthropogenic activities on the dynamics of the climate system. Therefore, this study provides a detailed assessment of greenhouse gas emissions, considering their magnitude, temporal and spatial distribution, as well as their relationship with anthropogenic activities of the three main GHGs: carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O), from 108 countries over a 30-year period (1990-2020), using clustering with a dynamic time warping (DTW) metric, identifying high, medium, and low emission groups based on total and per capita emissions.

CO₂, driven by fossil fuel use in energy, industry, and transportation, dominates emissions; in this context, China and the United States account for 44% globally. While the main emitters of methane from agriculture and fossil fuel extraction are India, Brazil, and Turkmenistan, N₂O, linked to nitrogen-based fertilizers, shows high per capita contributions from Australia, New Zealand, and some African countries. With all the analysis developed, tailored mitigation strategies that address specific regional and sectoral drivers, emphasizing energy transitions, sustainable agriculture, and land-use management, are essential to progress toward the global goal of net-zero emissions. The grouping provides policymakers with a framework for targeted climate action, aligning emissions profiles with solutions.

Keywords: Greenhouse gas emissions, Clustering analysis, CO₂, CH₄, N₂O, Net-zero emissions targets, Climate change, Energy transition, Renewable energy, Global warming.

DEDICATORIA

A mis hijos, Alonso y Karla:

Alonso, eres un guerrero incansable, con tu inmensa nobleza y alegría. Para mí, eres mi gran maestro.

Karla, a tu corta edad, con tu inteligencia y perseverancia, iluminas cada día de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi esposo, **Sergio**, por tu apoyo incondicional y tu constante acompañamiento, por ser mi pilar en los momentos de vulnerabilidad. Admiro profundamente tu fortaleza y perseverancia.

A mis padres, **Josefina e Ignacio**, por estar siempre a mi lado de manera incondicional, brindándome amor y apoyo en cada etapa de mi vida.

A mis asesores:

- **Luis Fernando**, por tu respaldo y apoyo constante. Es una satisfacción y un honor trabajar nuevamente contigo, ahora como mi Director, después de haber compartido años como compañeros. Admiro tu nobleza y la gran calidad humana que te caracteriza.
- **Dr. José María**, por sus valiosos conocimientos, su guía, apoyo y respaldo. Admiro su disciplina, compromiso y profesionalismo; usted es una persona que inspira.

A mis compañeros de curso, por su colaboración, compañerismo y apoyo a lo largo de este camino.

Al **comité tutorial**, por todas las aportaciones y sugerencias brindadas para enriquecer este proyecto.

Al **SECIHTI** (antes **CONAHCyT**), por el apoyo financiero otorgado, fundamental para el desarrollo de este trabajo.

A mi **Universidad** por permitirme realizar mis estudios de posgrado.

ÍNDICE

ABSTRACT	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE TABLAS	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	4
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3 HIPÓTESIS	5
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos particulares	6
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTE Y MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 ANTECEDENTES	7
2.2 MARCO TEÓRICO	9
2.2.1 Objetivos de cero emisiones netas	9
2.2.2 Emisiones de gases de efecto invernadero	10
2.2.3 Dióxido de carbono (CO ₂)	11
2.2.4 Metano (CH ₄).....	11
2.2.5 Óxido nitroso (N ₂ O)	11
2.2.6 Cambio climático	12
2.2.7 Calentamiento Global.....	12
2.2.8 Agrupación en clústeres por medio de IA	14
2.2.9 Desarrollo Sostenible o Sustentable	15
2.2.10 Transición Energética	16
2.2.11 Energías Renovables.....	16
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	18
3.1 Conjunto de datos	20
3.2 Preprocesamiento de datos	20
3.3 Algoritmo k-means con medida DTW	21
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24

4.1 EMISIONES GLOBALES DE N ₂ O PER CÁPITA Y TOTALES	24
4.1.1 EMISIONES GLOBALES PER CÁPITA DE N ₂ O	24
4.1.1.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales per cápita altas, medias y bajas de N ₂ O	24
4.1.1.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales per cápita de N ₂ O	29
4.1.1.3 Segmentación global de emisiones de N ₂ O per cápita	32
4.1.2 EMISIONES GLOBALES TOTALES DE N ₂ O	34
4.1.2.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales totales altas, medias y bajas de N ₂ O.....	34
4.1.2.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales totales de N ₂ O	38
4.1.2.3 Segmentación global de emisiones totales de N ₂ O	41
4.2 EMISIONES DE CH ₄ PER CÁPITA y TOTALES	43
4.2.1 EMISIONES GLOBALES PER CÁPITA DE CH ₄	43
4.2.1.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales per cápita altas, medias y bajas de CH ₄	43
4.2.1.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales per cápita de CH ₄	48
4.2.1.3 Segmentación global de emisiones per cápita de CH ₄	51
4.2.2 EMISIONES GLOBALES TOTALES DE CH ₄	55
4.2.2.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales totales altas, medias y bajas de CH ₄	55
4.2.2.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales totales de CH ₄	60
4.2.2.3 Segmentación global de emisiones totales de CH ₄	63
4.3 EMISIONES DE CO ₂ PER CÁPITA Y TOTALES	67
4.3.1 EMISIONES GLOBALES PER CÁPITA DE CO ₂	67
4.3.1.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales per cápita altas, medias y bajas de CO ₂	67
4.3.1.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales per cápita de CO ₂	72
4.3.1.3 Segmentación global de emisiones per cápita de CO ₂	76
4.3.2 EMISIONES GLOBALES TOTALES DE CO ₂	80
4.3.2.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales totales altas, medias y bajas de CO ₂	80
4.3.2.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales totales de CO ₂	87
4.3.2.3 Segmentación global de emisiones totales de CO ₂	91
4.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	96

4.5 EMISIONES AJUSTADAS AL COMERCIO Y RENDICIÓN DE CUENTAS EN LA GENERACIÓN DE GEI	97
4.6 INCORPORACIÓN DE BASES DE DATOS INTERNACIONALES PARA FORTALECER EL ANÁLISIS DE EMISIONES DE GEI.....	101
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
APENDICE A	116
APENDICE B.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Avanzando hacia el cumplimiento de los objetivos climáticos internacionales de cero emisiones netas.....	3
2.1 Tendencia de temperatura de la superficie global de la tierra. (Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA).....	14
3.1 Visión general de la metodología implementada.	19
4.1 Emisiones globales de N ₂ O en tm per cápita; A Grupo de emisiones altas, B Grupo de emisiones medias, C Grupo de emisiones bajas.	28
4.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales de N ₂ O tm per cápita por grupo.	31
4.3 Mapa de las emisiones de N ₂ O tm per cápita por país.	33
4.4. Emisiones globales de N ₂ O en kt totales; A Grupo de emisiones altas, B Grupo de emisiones medias, C Grupo de emisiones bajas.	37
4.5 Trayectoria promedio de las emisiones globales totales de N ₂ O en kt por grupo.....	41
4.6 Mapa de las emisiones globales totales de N ₂ O en kt por país.....	43
4.7 Emisiones globales de CH ₄ en tm per cápita; A Grupo de emisiones altas, B Grupo de emisiones medias, C Grupo de emisiones bajas.	47
4.8 Trayectoria promedio de las emisiones globales de CH ₄ tm per cápita por grupo.....	51
4.9 Mapa de las emisiones per cápita de CH ₄ tm por país.....	54
4.10 Emisiones globales totales de CH ₄ en kt; A Grupo de emisiones altas, B Grupo de emisiones medias, C Grupo de emisiones bajas.	59
4.11 Trayectoria promedio por grupo de las emisiones globales totales de CH ₄ en kt.	63
4.12 Mapa de las emisiones globales totales de CH ₄ en kt por país.....	66
4.13 Emisiones globales per cápita de CO ₂ en tm; A Grupo de emisiones altas, B Grupo de emisiones medias, C Grupo de emisiones bajas.	71
4.14 Trayectoria promedio por grupo de las emisiones globales per cápita de CO ₂ en tm..	76
4.15 Mapa de las emisiones de CO ₂ en tm per cápita por país.....	80

4.16 Emisiones globales totales de CO ₂ en kt; A Grupo de emisiones altas, B Grupo de emisiones medias, C Grupo de emisiones bajas.....	86
4.17 Trayectoria promedio por grupo de las emisiones globales totales de CO ₂ en kt	991
4.18 Mapa de las emisiones totales de CO ₂ en kt por país.....	95

ÍNDICE TABLAS

B1. Posición y contribución porcentual global de cada país según sus emisiones de N ₂ O tanto totales como per cápita.	117
B2. Posición y contribución porcentual global de cada país según sus emisiones de CH ₄ tanto totales como per cápita.	121
B3. Posición y contribución porcentual global de cada país según sus emisiones de CO ₂ tanto totales como per cápita	125
B4.- Análisis de datos por grupo para las emisiones de N ₂ O totales y per cápita con base a su nivel de emisiones alta, media y baja.....	130
B5.- Análisis de datos por grupo para las emisiones de CH ₄ totales y per cápita con base a su nivel de emisiones alta, media y baja.....	131
B6. Análisis de datos por grupo para las emisiones de CO ₂ totales y per cápita con base a su nivel de emisiones alta, media y baja.....	132

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La actual crisis climática es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad (Ripple et al., 2023) gobiernos y organizaciones internacionales han implementado medidas y políticas orientadas a la transición hacia una economía baja en carbono, principalmente para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energético. En 2023, las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) alcanzaron un récord de 36.8 gigatoneladas, lo que representa un aumento del 0.9 % con respecto al año anterior, siendo el sector energético responsable del 75 % de estas emisiones (Glavič et al., 2023).

El Acuerdo de París, firmado durante la COP21 en 2015, estableció el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 °C en comparación con los niveles preindustriales, con la aspiración de limitar el calentamiento a 1,5 °C (Rajamani et al., 2018 Sadia et al., 2022). Sin embargo, sin medidas concretas y urgentes para lograr este objetivo, la Tierra se enfrenta a consecuencias catastróficas e irreversibles. Entre ellas se incluyen el agotamiento de los recursos naturales, la pérdida de biodiversidad y las amenazas a la existencia humana y la salud mundial (Muluneh et al., 2021), la Organización Mundial de la Salud ha identificado el cambio climático como la mayor amenaza a la salud pública mundial, ya que sus efectos exacerbaban las vulnerabilidades existentes y crean nuevos riesgos para la salud (All for Health, consultado en 2024).

Un importante impulsor del calentamiento global es la continua dependencia de los combustibles fósiles, incluidos el carbón, el petróleo y el gas natural, que representan más del 75% de las emisiones globales de GEI y casi el 90% de todas las emisiones de CO₂ (Rahman et al., 2024, Hernández et al., 2022, Khaleel et al., 2024). A pesar del crecimiento significativo en la adopción de energías renovables, los combustibles fósiles todavía suministran más del 80% de la energía mundial, lo que subraya la necesidad urgente de una transición hacia sistemas energéticos más limpios y sostenibles (Abbas et al., 2022).

Esta transición energética implica cambios profundos en la producción y el consumo de energía para reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Adelekan et al., 2024), por lo que surge la necesidad de avanzar hacia un modelo basado en energías renovables, la mejora de la eficiencia energética y la electrificación de sectores clave como el transporte y la industria (Hassan et al., 2024). Lograr emisiones netas cero, es decir, equilibrar las emisiones de GEI producidas con las eliminadas de la atmósfera, se ha convertido en un objetivo fundamental para los esfuerzos globales de sostenibilidad. Abordar este desafío requerirá una acción transformadora a una escala sin precedentes. Estudios recientes

indican que para alcanzar los objetivos climáticos internacionales será necesario triplicar la capacidad instalada de energía renovable y duplicar la eficiencia energética para 2030 (Dadashi et al., 2022, Darby et al., 2024), estas medidas son fundamentales no solo para mitigar las emisiones de GEI, sino también para garantizar un suministro de energía sostenible y seguro para las generaciones futuras.

Además del sector energético, el sector agropecuario constituye un ámbito que requiere una atención prioritaria en las estrategias de mitigación del cambio climático, debido a su contribución significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero. Según datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), la agricultura es responsable de aproximadamente el 12 % de las emisiones globales de GEI. En este contexto, la adopción de prácticas agrícolas y ganaderas más sostenibles resulta esencial para reducir el impacto ambiental y avanzar hacia el cumplimiento de los compromisos climáticos internacionales.

Entre los GEI que contribuyen al cambio climático, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) son los más significativos (Wei et al., 2016; Jones et al., 2023). El Potencial de Calentamiento Global (PCG) mide la capacidad de estos gases para atrapar calor en relación con el CO_2 , que tiene un PCG de 1 (Rabbi et al., 2024), el CH_4 es aproximadamente 28 veces más eficaz para atrapar calor durante 100 años, mientras que el N_2O es 298 veces más potente (Nisbet et al., 2021). Sin embargo, el CO_2 sigue siendo el GEI más abundante debido a sus altos volúmenes de emisión y su capacidad de persistir en la atmósfera durante cientos o incluso miles de años (Berry et al., 2021). Reducir las emisiones de estos gases es esencial para frenar el calentamiento global, en particular abordando las fuentes de CH_4 y N_2O en la agricultura, la producción de energía y la gestión de residuos. Las herramientas modernas, como la inteligencia artificial (IA), han surgido como poderosos aliados para analizar y abordar la compleja dinámica de las emisiones de GEI (Qerimi et al., 2022), las técnicas avanzadas, incluidos los algoritmos de agrupamiento como *k-means*, permiten identificar patrones y tendencias en las emisiones en las distintas regiones y sectores (Govender et al., 2020), estas herramientas brindan información valiosa que es fundamental para diseñar estrategias de mitigación eficaces y específicas, lo que ayuda a acelerar el progreso hacia cero emisiones netas.

Este estudio se basa en estas metodologías mediante un análisis exhaustivo de las emisiones globales de CO_2 , CH_4 y N_2O durante un período de 30 años (1990-2020) para 108 países. Mediante la agrupación en clústeres de *k-means*, clasifica a los países en grupos de emisiones bajas, medias y altas, considerando tanto las emisiones totales como las per-

cápita. El enfoque del estudio no solo identifica patrones clave de emisiones, sino que también ofrece información práctica para los responsables de las políticas, ayudándoles a diseñar estrategias de mitigación adaptadas a las características de cada grupo. A diferencia de estudios anteriores, este trabajo proporciona una clasificación detallada que abarca múltiples GEI y regiones globales, ofreciendo una herramienta única para fomentar la cooperación internacional y priorizar acciones basadas en perfiles de emisiones compartidos. Sus contribuciones buscan impulsar los esfuerzos globales para lograr cero emisiones netas y un futuro sostenible.

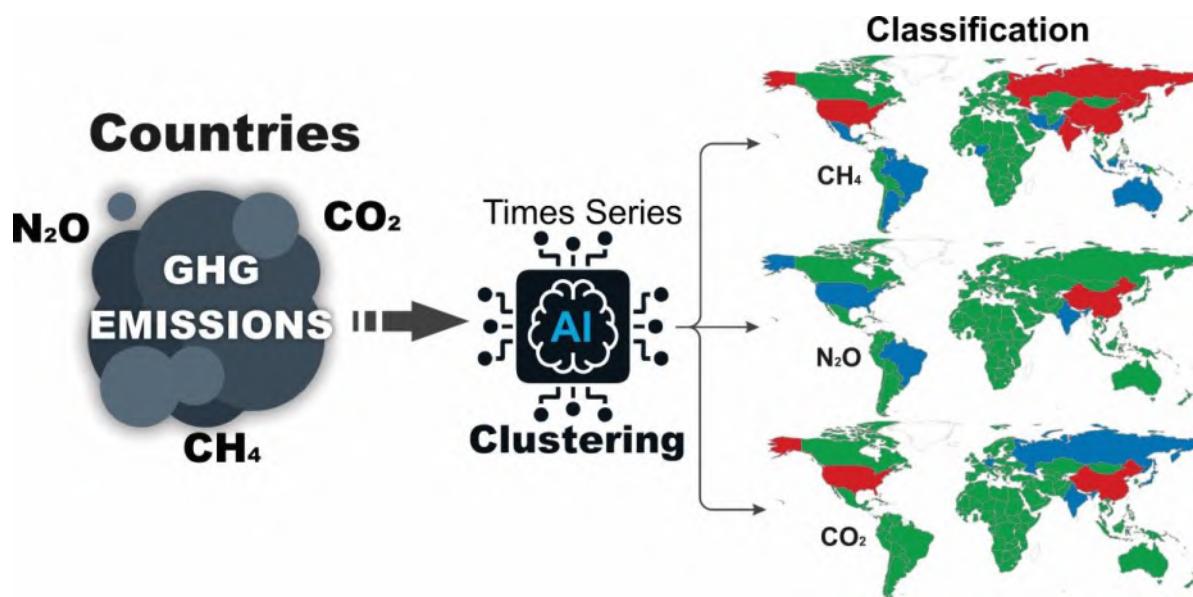


Figura 1.1 Avanzando hacia el cumplimiento de los objetivos climáticos internacionales de cero emisiones netas.

1.1 JUSTIFICACIÓN

El cambio climático representa uno de los mayores retos globales del siglo XXI, y los GEI son los principales responsables del calentamiento global. En este contexto, alcanzar los objetivos de cero emisiones netas se ha convertido en una prioridad para los gobiernos, empresas y organismos internacionales. Sin embargo, para diseñar políticas efectivas y establecer estrategias sostenibles, es fundamental comprender la distribución, intensidad y evolución de las emisiones de GEI a nivel mundial.

El agrupamiento de emisiones globales de GEI por medio de IA mediante el algoritmo *k-means*, usando la métrica DTW basadas en análisis datos, permite identificar patrones comunes, sectores económicos más emisores y regiones con comportamientos similares. Esta metodología facilita la priorización de acciones, la asignación eficiente de recursos y el diseño de políticas climáticas adaptadas a realidades específicas. Asimismo, contribuye a mejorar la transparencia y el seguimiento de los compromisos internacionales, como el Acuerdo de París.

Además, el estudio de los sectores clave y las implicaciones políticas derivadas de estos agrupamientos ofrece una perspectiva integral que conecta el análisis técnico con la toma de decisiones estratégicas. Al entender y analizar cómo se agrupan y comportan las emisiones, se pueden promover transiciones justas, fomentar la innovación tecnológica y apoyar modelos económicos sostenibles.

Por tanto, este tema no solo es relevante, sino también imprescindible para avanzar de manera efectiva hacia la descarbonización global, apoyando los compromisos climáticos y reforzando la acción política basada en evidencia científica y datos actualizados.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A pesar de los esfuerzos internacionales para mitigar el cambio climático, las emisiones globales de gases de efecto invernadero continúan aumentando en muchas regiones del mundo. Esta situación compromete seriamente la posibilidad de alcanzar los objetivos de cero emisiones netas fijados para mediados de siglo. Uno de los principales obstáculos radica en la falta de enfoques integrados y basados en datos que permitan comprender de forma precisa cómo se distribuyen y agrupan las emisiones a nivel global.

La información actual sobre las emisiones suele presentarse de manera fragmentada, sin una visión clara de los sectores claves responsables ni de los patrones comunes entre países o regiones. Esto dificulta la formulación de políticas climáticas eficaces, adaptadas a las necesidades específicas de cada contexto. Asimismo, la falta de un análisis sistemático impide identificar sinergias entre sectores y territorios que podrían facilitar la transición hacia modelos de producción y consumo sostenibles.

En este sentido, el agrupamiento de emisiones globales de GEI por medio de IA mediante el algoritmo *k-means*, usando la métrica DTW basadas en análisis datos, representa una herramienta poderosa para detectar similitudes, diferencias y tendencias entre las emisiones de distintos actores globales. No obstante, aún existen desafíos metodológicos y políticos para integrar estos enfoques en la toma de decisiones, lo que limita su aplicación práctica. Así, surge la necesidad de investigar cómo el análisis de datos y el agrupamiento de emisiones identificando grupos de emisiones altas, medias y bajas en función de las emisiones totales y per cápita pueden ser utilizados de forma estratégica para impulsar políticas efectivas, priorizar intervenciones y facilitar el cumplimiento de los compromisos climáticos internacionales.

1.3 HIPÓTESIS

El agrupamiento de emisiones globales de gases de efecto invernadero por medio de IA mediante el algoritmo *k-means*, usando la métrica DTW basadas en análisis datos, para los principales gases de efecto invernadero; CO₂, CH₄ y N₂O permitirá identificar patrones estructurales comunes entre sectores económicos y regiones geográficas, así como los mayores y menores emisores mundiales de GEI, lo que optimiza la focalización de medidas de mitigación en los sectores clave y la formulación de políticas climáticas eficaces, incrementando la efectividad de las estrategias orientadas a alcanzar el cumplimiento de los objetivos climáticos internacionales de cero emisiones netas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Identificar patrones sectoriales y regionales clave así como los principales emisores globales, a través del agrupamiento en clúster por medio de IA de emisiones globales de gases de efecto invernadero tanto en términos absolutos como per cápita, mediante técnicas de análisis de datos por medio del algoritmo *K-means* usando la métrica DTW, a fin de contribuir al diseño de políticas ambientales eficaces y focalizadas, orientadas al cumplimiento de los objetivos climáticos internacionales de cero emisiones netas.

1.4.2 Objetivos particulares

1. Aplicar métodos de agrupamiento por medio de IA para clasificar las emisiones globales de GEI en tres grupos según su nivel de emisiones, utilizando una escala que distingue entre niveles de emisiones bajos, medios y altos.
2. Identificar los países o regiones clave con mayor contribución a las emisiones globales de GEI y las principales actividades económicas asociadas a sus emisiones.
3. Identificar los sectores clave más relevantes en términos de emisiones globales de GEI y analizar sus patrones comunes dentro de los agrupamientos.
4. Ofrecer información práctica para los responsables de las políticas, que les ayude a diseñar estrategias de mitigación adaptadas a las características de cada grupo.
5. Proponer recomendaciones para la formulación de políticas climáticas orientadas a la reducción de GEI, basadas en los hallazgos obtenidos a través del análisis de agrupamiento como herramienta estratégica.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTE Y MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Varios estudios han aplicado con éxito técnicas de agrupamiento para analizar las emisiones de GEI, demostrando la utilidad de estos métodos para identificar patrones y orientar estrategias de mitigación específicas. Por ejemplo, Gallo et al., 2018 utilizaron el análisis de agrupamiento para evaluar el impacto del Protocolo de Kioto en las emisiones de GEI en los sectores agrícola y forestal. Su estudio destacó cómo las emisiones han cambiado geográficamente tras el Protocolo de Kioto, enfatizando la importancia del diseño y la sincronización de las políticas para superar las barreras a la innovación y mejorar la eficiencia de los recursos.

En el contexto de las emisiones fluviales, Zhang et al. (2021) examinaron los ríos urbanos como focos de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en la cuenca del lago Chaohu, en el este de China. Su análisis identificó una variabilidad espacial significativa en las emisiones de GEI, donde los ríos urbanos exhibieron flujos sustancialmente mayores debido a entornos hipóxicos ricos en nutrientes. De igual manera, Leng et al. (2023) exploraron patrones espaciales y moduladores de las concentraciones de GEI disueltos a lo largo del río Yangtsé, descubriendo un agrupamiento espacial influenciado por los humedales y los niveles de oxígeno. Sus hallazgos subrayaron la necesidad de considerar las contribuciones de los humedales y la gestión de nutrientes en las estrategias de mitigación de GEI para los grandes sistemas fluviales.

En contextos agrícolas, Kolasa et al. (2013) aplicaron la agrupación por k-means para clasificar a los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) según sus emisiones de GEI agrícolas, revelando agrupaciones diferenciadas por geografía e industrialización. De igual manera, Andrzejuk et al. (2018) utilizaron k-means y HDBSCAN (Agrupación Espacial Basada en la Densidad de Aplicaciones con Ruido) para analizar las emisiones agrícolas, que representan entre el 14 % y el 25 % de las emisiones globales, lo que proporcionó información sobre su distribución entre los países de la OCDE. Akilli et al. (2023) exploraron con más detalle el impacto de la COVID-19 en las emisiones de gases de efecto invernadero en los países de la OCDE mediante la agrupación por k-means, destacando los cambios en las emisiones totales, la intensidad de las emisiones y las variaciones de temperatura debido a las medidas relacionadas con la pandemia.

Cachoa y Souza et al. (2021) analizaron los clústeres de países en función de sus perfiles de emisiones de GEI por sector y niveles de ingreso, identificando que las emisiones per cápita más altas ocurren en las naciones industrializadas de altos ingresos, como Qatar e Israel. De manera similar Han et al. (2024) examinaron las emisiones de residuos sólidos urbanos (RSU) en 323 ciudades chinas, aplicando la agrupación *K-means* para agrupar las ciudades en función de la intensidad de las emisiones. Sus hallazgos enfatizaron la influencia de la estructura económica y las políticas de gestión de residuos en las emisiones.

Los modelos de regresión probados en estudios anteriores, como los de Cachola y Souza, mostraron que los modelos jerárquicos y multinomiales superan a la regresión lineal en la previsión de tendencias de emisiones. Mientras que Li et al. (2025) destacaron el doble papel de la agricultura como fuente y sumidero de GEI, de acuerdo con estos autores el aumento en el número de ganado (27%), el uso de fertilizantes nitrogenados inorgánicos (47%) y los residuos de cultivos (49%) han impulsado las emisiones globales de CH₄ y N₂O entre 1990 y 2021.

En su trabajo Chomjinda et al. (2024) analizaron el papel de la logística y el comercio en las emisiones de CO₂ encontrando que países con sistemas logísticos avanzados, como Alemania y Estados Unidos, presentan mayores emisiones de CO₂ relacionadas con el transporte, lo que refuerza la relación entre la eficiencia comercial y el impacto ambiental. Además, revelaron que las naciones industrializadas con altas importaciones de bienes manufacturados (por ejemplo, los países europeos) exhiben emisiones industriales directas menores que los principales países exportadores en las emisiones de CO₂ impulsadas por la logística, lo que indica que las mejoras en la eficiencia del transporte podrían reducir las emisiones en economías con gran comercio.

Cada vez se reconoce más que el papel del comercio en la distribución de las emisiones es un factor crítico en los inventarios nacionales. Por ejemplo, el dominio de China en la manufactura global resulta en emisiones de CO₂ desproporcionadamente altas, lo que coincide con Han et al. (2024), que estudiaron la optimización de los métodos de tratamiento de RSU en China, donde se encontró que los factores económicos son los principales impulsores de las emisiones en la gestión de residuos sólidos urbanos, lo cual demuestra que las intervenciones políticas en la gestión de residuos pueden reducir significativamente la intensidad de las emisiones.

Estos estudios ilustran en conjunto cómo el análisis de agrupación, incluyendo métodos no jerárquicos como *k-means*, puede adaptarse a diversos ámbitos para identificar patrones de

emisiones y priorizar la acción climática. Este enfoque permite a los responsables políticos adaptar las estrategias a los contextos regionales, abordando factores ambientales y socioeconómicos específicos que influyen en las emisiones. En este sentido, resulta imprescindible que dichos enfoques analíticos se integren con una comprensión profunda de las desigualdades estructurales entre regiones. Los esfuerzos de mitigación global deben tener en cuenta las disparidades económicas, ya que los países en desarrollo con altas emisiones a menudo carecen de los recursos tecnológicos y financieros necesarios para implementar estrategias eficaces de reducción. Este estudio confirma que los países con economías de rápido crecimiento, como India y Brasil, han experimentado fuertes aumentos en las emisiones a pesar de los acuerdos climáticos internacionales y en el caso de Brasil, aun cuando la mayor parte de la producción de electricidad se genera de fuentes renovables, por otro lado, países como Nueva Zelanda y Canadá, incluso también con una alta implementación de fuentes renovables, siguen teniendo contribuciones significativas a las emisiones de gases de efecto invernadero debido a sus actividades económicas. Esto demuestra que las energías renovables, por sí solas, no bastan para resolver el problema. Por ello, es necesario adoptar un enfoque integral y sostenible que aborde las emisiones desde múltiples frentes. El fortalecimiento de los mecanismos de apoyo financiero y tecnológico podría facilitar una transición justa hacia modelos económicos de bajas emisiones.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Objetivos de cero emisiones netas

Los objetivos nacionales de cero emisiones netas de CO₂ y gases de efecto invernadero podría reducir el aumento proyectado de la temperatura media global a 2,0-2,4 °C para 2100 y acercar el cumplimiento del Acuerdo de París. En este sentido 131 países han adoptado los objetivos de cero emisiones netas, que en conjunto cubren el 72 % de las emisiones globales. En su totalidad, estos objetivos de cero emisiones netas podrían reducir significativamente el calentamiento global proyectado en comparación con las políticas actualmente implementadas (2,9 a 3,2 °C) o con los compromisos presentados en el Acuerdo de París (2,4 a 2,9 °C). (Höhne et al., 2021)

Los análisis realizados sobre los compromisos y acciones actuales de los países en materia de cambio climático concluyen que estos esfuerzos resultan ampliamente insuficientes para alcanzar el objetivo del Acuerdo de París, que busca limitar el incremento de la temperatura

global a niveles claramente inferiores a los 2 °C, al tiempo que se mantienen los esfuerzos por restringir dicho aumento a un máximo de 1,5 °C

Si bien las políticas específicas destinadas a reducir las emisiones en el marco del Acuerdo de París pueden diferir entre países, existe un principio central de acción colectiva consagrado en el Artículo 4.1 de dicho acuerdo (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC], 2015) el cual establece que las emisiones deben alcanzar su punto máximo lo antes posible y que, en la segunda mitad del siglo, las emisiones antropogénicas deberán ser equilibradas mediante mecanismos de absorción. En consecuencia, se requiere que las emisiones globales lleguen a un nivel de cero emisiones netas. Cabe señalar que la propuesta de incorporar un objetivo global de cero emisiones netas en el Acuerdo de París fue discutida durante el proceso de negociación previo a su adopción en 2015 (Höhne et al., 2021).

2.2.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

Los gases presentes en la atmósfera funcionan de manera similar al cristal de un invernadero: retienen el calor solar y evitan que se escape al espacio, lo que genera el calentamiento global. Este efecto invernadero eleva la temperatura de la superficie terrestre por encima de lo que sería sin la presencia de estos gases, creando condiciones favorables para la vida en el planeta. Aunque muchos gases de efecto invernadero se producen de forma natural, las actividades humanas han incrementado su concentración, intensificando así el calentamiento global. Como resultado, los patrones de nieve y precipitación se modifican, las temperaturas promedio aumentan y fenómenos climáticos extremos, como olas de calor e inundaciones, ocurren con mayor frecuencia.

Existen diversos tipos de gases de efecto invernadero, y su impacto en el calentamiento global varía. Entre ellos, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) se encuentran de forma natural en la atmósfera, pero también son producidos por actividades humanas. Estos gases representan cerca del 98 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero.

Los gases fluorados de efecto invernadero son los más potentes y persistentes entre los gases emitidos por actividades humanas. Su capacidad de generar efecto invernadero puede ser miles de veces mayor que la del dióxido de carbono (CO₂). Entre ellos se incluyen los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), el hexafluoruro de azufre (SF₆) y

el trifluoruro de nitrógeno (NF_3). Aunque representan aproximadamente solo el 2 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, su impacto es significativo. Estos gases se utilizan comúnmente como sustitutos de sustancias que agotan la capa de ozono, compuestos químicos artificiales que, al llegar a la atmósfera superior, dañan la capa protectora de ozono. A diferencia de estas sustancias, los gases fluorados no afectan la capa de ozono. Tanto el Protocolo de Kioto como el Acuerdo de París, acuerdos internacionales para coordinar la acción contra el cambio climático, incluyen siete gases de efecto invernadero, de los cuales se describen los tres principales por su contribución al cambio climático. (Parlamento Europeo, consultado en 2024).

2.2.3 Dióxido de carbono (CO_2)

El dióxido de carbono se genera de forma natural durante la respiración de los animales y la descomposición de materia orgánica. También es liberado a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles y diversas reacciones químicas. Durante la fotosíntesis, las plantas absorben CO_2 para convertir la luz solar en energía, por lo que los bosques juegan un papel clave en la captura de carbono.

2.2.4 Metano (CH_4)

El metano es un gas incoloro que constituye el principal componente del gas natural. Sus emisiones provienen de la producción y transporte de carbón, gas natural y petróleo, así como de la ganadería, otras actividades agrícolas, el uso del suelo y la descomposición de residuos orgánicos en vertederos. En 2021, la mayor parte de las emisiones de metano en la Unión Europea se atribuyeron a la agricultura, la silvicultura y la pesca.

2.2.5 Óxido nitroso (N_2O)

Este gas se produce por la actividad microbiana en el suelo, el uso de fertilizantes nitrogenados, la quema de madera y procesos químicos industriales. Se libera durante actividades agrícolas e industriales, la gestión del suelo, la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos, así como en el tratamiento de aguas residuales. En la UE (Unión

Europea), la agricultura, la silvicultura y la pesca también fueron responsables de las principales emisiones de óxido nitroso en 2021.

2.2.6 Cambio climático

El cambio climático se refiere a las modificaciones a largo plazo en los patrones climáticos promedio que caracterizan los climas locales, regionales y globales de la Tierra. Estos cambios generan una variedad de efectos que se asocian directamente con el término. Para estudiar y monitorear el cambio climático en sus fases pasada, presente y futura, los científicos utilizan observaciones realizadas desde la tierra, la atmósfera y el espacio, complementadas con modelos computacionales. Los registros climáticos ofrecen evidencia de indicadores clave del cambio climático, tales como el aumento de la temperatura global tanto en la tierra como en los océanos; la elevación del nivel del mar; la reducción de las masas de hielo en los polos y glaciares de montaña; la variación en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos como huracanes, olas de calor, incendios forestales, sequías, inundaciones y cambios en las precipitaciones; además de alteraciones en la cobertura de nubes y la vegetación.

2.2.7 Calentamiento Global

El calentamiento global es uno de los principales problemas a los que nos enfrentamos, el efecto invernadero hace que el calor de la Tierra quede atrapado en la atmósfera, lo que provoca el aumento de la temperatura. Esto a su vez tiene un efecto en varias especies que dependen de las leyes básicas de la naturaleza. Una Tierra más cálida también provoca cambios en los patrones de lluvia y, por lo tanto, afecta también a los humanos, las plantas y los animales. Los científicos opinan que un nuevo aumento de los niveles de dióxido de carbono agravará la situación (Muralikrishna et al., 2017).

Desde el período preindustrial, se estima que las actividades humanas han aumentado la temperatura promedio global de la Tierra en aproximadamente 1 grado Celsius (1,8 grados Fahrenheit), una cifra que actualmente aumenta en más de 0,2 grados Celsius (0,36 grados Fahrenheit) por década. La actual tendencia al calentamiento es inequívocamente resultado de la actividad humana desde la década de 1950 y avanza a un ritmo sin precedentes durante milenarios (Cambio climático global, NASA. Consultado en 2023), en la Figura 2 se muestra la Temperatura de la superficie global en relación con las temperaturas promedio de 1951-

1980, con el año 2020 empatando estadísticamente con 2016 como el más caluroso registrado (Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA).

Se espera que el calentamiento global y los cambios asociados en el ciclo hidrológico y el aumento del nivel del mar causen graves impactos negativos en los ecosistemas naturales, la salud humana y la economía. Se predice que el cambio climático alterará los ecosistemas y provocará la pérdida de diversidad de especies, ya que muchas especies no podrán adaptarse a las condiciones ambientales que cambian rápidamente. Es probable que algunos ecosistemas, como los bosques montañas tropicales, los manglares y los ecosistemas árticos, desaparezcan porque el clima más cálido o el aumento del nivel del mar no los sustentarán. En las latitudes altas, el calentamiento provocará la degradación del permafrost y un aumento de la liberación de metano de los humedales y perdida de ellos. Ya que el metano es el siguiente gas de efecto invernadero importante después del CO₂, también amplificará el calentamiento global (Ganopolski et al., 2019).

En particular, las estimaciones muestran que el calentamiento global absoluto podría aumentar el número anual de personas afectadas por tormentas costeras en un factor de 10 ya en el año 2080. Otro impacto potencial del calentamiento global en la salud está relacionado con el aumento de la superficie donde el clima es propicio para la trasmisión de la malaria. Actualmente, la distribución de la malaria se limita a los trópicos, pero el calentamiento global podría extender considerablemente esta zona, lo que conducirá a un aumento del número de personas expuestas a la malaria. Entre los aspectos recientemente reconocidos del aumento de la concentración de CO₂ atmosférico se encuentra la acidificación del océano. Los resultados de las observaciones y los modelos indican que las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la actividad humana ya han provocado una reducción del pH medio del agua de mar superficial de 0,1 unidades y que el pH disminuirá adicionalmente en 0,5 unidades para el año 2100. Esto podría conducir a la extinción masiva de corales y algunas especies de plancton, provocando la alteración de toda la cadena alimentaria marina (Ganopolski et al., 2019).

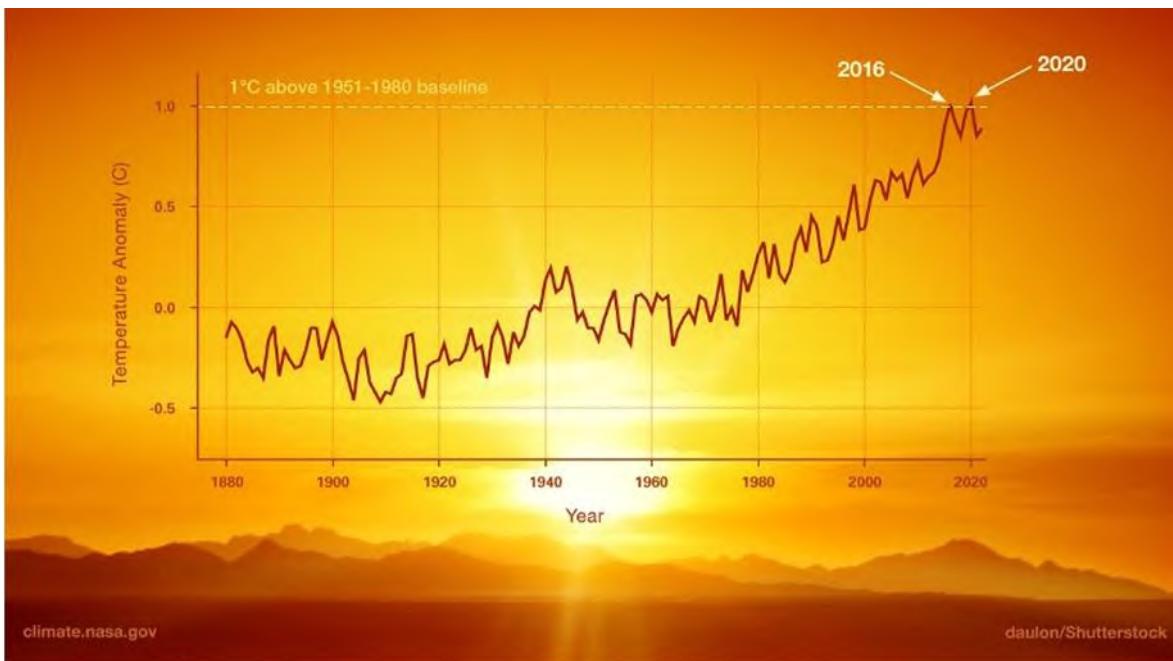


Figura 2.1 Tendencia de temperatura de la superficie global de la tierra. (Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA).

2.2.8 Agrupación en clústeres por medio de IA

En aplicaciones prácticas, donde se deben analizar grandes cantidades de datos, el soporte de decisiones basado en IA generalmente se implementa utilizando algoritmos de aprendizaje automático. Se pueden considerar tres tipos de aprendizaje: aprendizaje supervisado, semisupervisado y no supervisado. El aprendizaje supervisado es un enfoque que utiliza conjuntos de datos etiquetados. El aprendizaje semisupervisado se puede aplicar en el caso de utilizar un conjunto de datos de entrenamiento, con datos etiquetados y no etiquetados. El aprendizaje no supervisado utiliza algoritmos de aprendizaje automático para analizar conjuntos de datos no etiquetados.

La agrupación en clústeres se define como aprendizaje no supervisado donde los objetos se agrupan en función de alguna similitud entre ellos (Symon et al., 2019). De forma que los elementos dentro de cada grupo son más parecidos entre sí que con los de otros grupos. Usado en inteligencia artificial, machine learning y análisis de datos.

El algoritmo no necesita saber de antemano cuántos grupos hay, ni qué características debe buscar. Se basa en criterios como la distancia (euclíadiana, por ejemplo) entre puntos en un espacio de características para encontrar similitudes. Algunos de los métodos más conocidos son:

- *K-means*: Divide los datos en k grupos definidos por centroides.
- *DBSCAN*: Detecta clústeres con densidad de datos similar, formando grupos a partir de puntos que se encuentran muy próximos entre sí en el espacio de datos.
- *Hierarchical clustering*: Crea una estructura tipo árbol para agrupar elementos por niveles.

La agrupación en clúster por IA es una herramienta clave cuando se quiere descubrir estructuras ocultas o patrones en los datos sin intervención humana directa. (Taenyun et al., 2023)

2.2.9 Desarrollo Sostenible o Sustentable

La concepción de “desarrollo sustentable” aparece por primera vez en la Declaración de Estocolmo (1972, Principio 2) significando que es un “proceso por el cual se preservan los recursos naturales en beneficio de las generaciones presentes y futuras”. Posteriormente, se consideró que ya no era solo “la preservación de los recursos naturales” sino también “la conservación y protección del medio ambiente y dentro de este los recursos naturales de manera de no comprometer las expectativas de las generaciones futuras”. El medio ambiente ya no podía más sustentar la vida, se debía buscar otras formas para que las generaciones se beneficien de los recursos. La sustentabilidad debía durar en el tiempo, debía hacerse sostenible.

Es así que, luego de la presentación del Informe Brundtland (1987), el término de “desarrollo sustentable” pasa a otra etapa superior, el de “desarrollo sostenible” capaz de satisfacer las necesidades en un principio, mínimas, del ser humano: la alimentación. Las cosas que dan sustento a la vida deben también durar en el tiempo, deben ser sostenibles.

Entonces, ya en una instancia superior y desde la Declaración de Johannesburgo sobre el desarrollo sostenible (2002); “Desarrollo Sostenible se entiende como el Proceso mediante el cual se satisfacen las necesidades económicas, sociales, de diversidad cultural y de un medio ambiente sano de la actual generación, sin poner en riesgo la satisfacción de las mismas a las generaciones futuras”.

2.2.10 Transición Energética

La transición del paradigma de los combustibles fósiles al predominio de las energías renovables y limpias está actualmente en marcha en el contexto de la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI) causantes del cambio climático. A este proceso se le conoce como transición energética, un cambio estructural en el sistema de suministro y uso de energía (Barrera et al., 2022); una transformación fundamental, multidimensional y de largo plazo del sector energético en un contexto tecno-institucional específico, que incluye y afecta una amplia gama de tecnologías, así como estructuras organizativas e institucionales. Una transición energética sostenible implica cambios en una amplia gama de comportamientos energéticos, incluida la adopción de fuentes de energía sostenible y tecnología enérgicamente eficiente, inversiones en medida de eficiencia energética en edificios y el cambio de comportamiento directo e indirecto del uso de la energía. En segundo lugar, debemos comprender que factores están detrás de estos tipos de comportamientos energéticos sostenibles (Steg et al., 2015).

Desde otra perspectiva se analiza el significado de “transición energética” distinguiendo entre dos sentidos, interpretaciones o comprensiones de la expresión. El primer sentido se refiere a las estrategias gubernamentales, que apuntan, entre otras cosas, a cambiar la forma en que se organizan los mercados energéticos, tal como se están reformando actualmente en países como Alemania y Francia. El segundo significado, sin embargo, se refiere a un cambio cultural, donde los ciudadanos se sienten responsables y están dispuestos a opinar en la dirección y gestión de la estrategia energética de su área local. Esta reflexión se basa en el supuesto de que el logro de una transición energética depende de la participación de todas las partes interesadas, incluidas las ciudades y los ciudadanos. Sin embargo, dicha participación requiere no sólo una reforma política, sino que, en un nivel más práctico, requiere la creación de nuevas leyes procesales que permitan dicha participación o que se respeten las leyes procesales existentes que permiten esta participación (Guerry et al., 2016).

2.2.11 Energías Renovables

La energía es tanto el núcleo del problema del cambio climático como una pieza clave para su solución. Las fuentes de energía renovable, abundantes en nuestro entorno —como la solar, eólica, hidroeléctrica, la proveniente de residuos o el calor geotérmico— se regeneran de forma natural y generan pocas o ninguna emisión contaminante o de gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, Acción por el clima, consultado en 2023).

Frente a la amenaza que representa el cambio climático global para el planeta, un número creciente de países ha adoptado la “neutralidad de carbono” como objetivo nacional, visualizando un futuro sin emisiones de carbono. Como complemento fundamental a los combustibles fósiles, las energías renovables son la principal herramienta para reducir el consumo de fuentes energéticas con alta huella de carbono y las emisiones de dióxido de carbono, consolidándose como la tendencia en el desarrollo social futuro. Encontrar las fuentes renovables más eficientes resulta esencial para alcanzar las cero emisiones netas (Leng et al., 2024).

La innovación en energías renovables es crucial para lograr una transformación energética sostenible y garantizar el suministro. Aunque estas fuentes enfrentan desafíos como su comercialización limitada, costos elevados de producción y variabilidad en el suministro, los avances tecnológicos son clave para superar estas barreras, mejorando la rentabilidad, eficiencia y capacidad de transmisión (Yi et al., 2024)

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este estudio consta de varios pasos interrelacionados (véase la Figura 3), que describen sistemáticamente el proceso de recopilación, preprocesamiento, agrupamiento y análisis de datos. Los siguientes pasos describen la metodología en detalle:

1. Recopilación de datos: El estudio recopila datos de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O de 108 países durante el período 1990-2020. Estos datos se obtuvieron del Banco de Datos del Banco Mundial (Data Bank, The Word Bank, consultado en 2024), lo que garantiza una alta fiabilidad y una cobertura global. El conjunto de datos incluye tanto las emisiones totales (medidas en toneladas métricas) como las emisiones per cápita (toneladas métricas por persona), lo que permite realizar evaluaciones comparativas en diversos contextos económicos y geográficos. La estructura de este conjunto de datos se muestra en la Figura 3.
2. Preprocesamiento de datos: Antes de aplicar las técnicas de agrupamiento, el conjunto de datos se preprocesó cuidadosamente para mejorar su calidad y comparabilidad. Para garantizar la comparabilidad, se aplicó la normalización de la puntuación z para estandarizar las variables numéricas, transformándolas en una escala común con una media de cero y una desviación estándar de uno. Este paso evita sesgos en el proceso de agrupamiento debido a la variación en la magnitud de los datos de emisión. Los pasos de preprocesamiento se describen en la Figura 3.
3. Análisis de Agrupamiento: Para clasificar a los países según sus patrones de emisiones, se empleó el algoritmo de agrupamiento *k-means* para datos de series temporales (véase la Figura 3). Dada la naturaleza temporal del conjunto de datos, se utilizó la Distorsión Temporal Dinámica (DTW) como métrica de similitud para considerar las variaciones no lineales en las trayectorias de las emisiones a lo largo del tiempo. El proceso de agrupamiento implicó definir el número de conglomerados, estableciendo tres grupos (niveles de emisión bajos, medios y altos) que diferencian a los países según sus emisiones totales y per cápita. DTW se utilizó para medir la similitud entre series temporales, alineando dinámicamente las trayectorias de las emisiones para identificar patrones consistentes. Finalmente, cada país se asignó al conglomerado con el centroide más cercano según las distancias de DTW, iterando hasta la convergencia.
4. Caracterización de los Conglomerados: Una vez formados los conglomerados, se analizaron y caracterizaron según las emisiones totales y per cápita, identificando variaciones en las emisiones absolutas y su relación con el tamaño de la población. Se

examinó la evolución temporal de las emisiones para detectar aumentos, disminuciones o estabilidad a lo largo del tiempo. Además, se evaluaron factores geográficos y socioeconómicos como el Producto Interno Bruto (PIB), el tamaño de la población y las características regionales para comprender los factores subyacentes de las emisiones. La Figura 1 resume este proceso de caracterización.

5. Visualización e interpretación de los resultados: Los resultados se sintetizaron mediante representaciones visuales claras (véase la Figura 3). Se utilizaron gráficos temporales para ilustrar las tendencias de las emisiones dentro de cada clúster, destacando los patrones de crecimiento o reducción. Se generaron mapas geoespaciales para representar la distribución global de los clústeres de emisiones, lo que permitió comprender las disparidades regionales y las implicaciones políticas.

6. Conclusiones y recomendaciones de políticas: Con base en la información obtenida sobre los clústeres, se formularon estrategias de mitigación climática a medida, priorizando las políticas adaptadas a los perfiles de emisiones de cada país. Estas recomendaciones se centran en estrategias sectoriales específicas, como la transición energética, la agricultura sostenible y la descarbonización industrial, en consonancia con los objetivos globales de sostenibilidad.

La Figura 3 ofrece una representación esquemática de la metodología, que resume la secuencia de pasos del estudio.

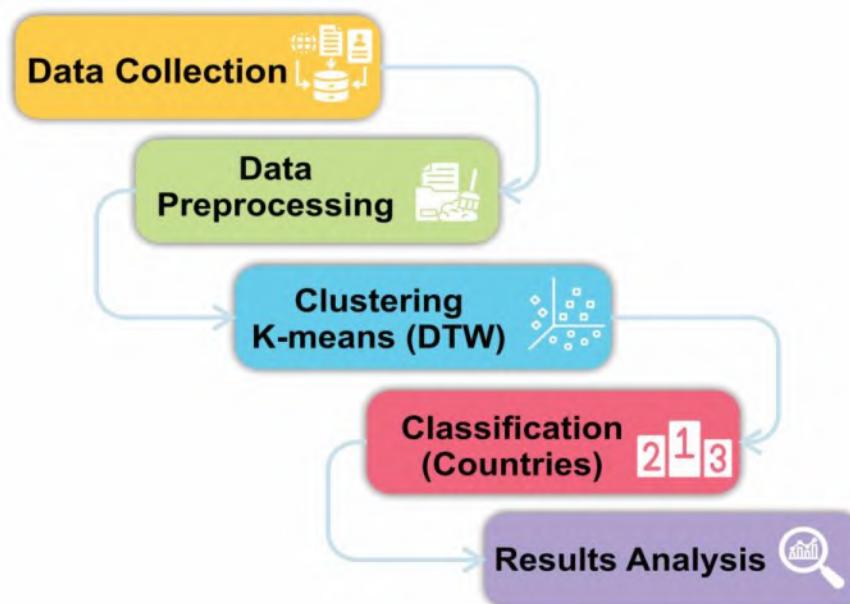


Figura 3.1 Visión general de la metodología implementada.

3.1 Conjunto de datos

El conjunto de datos utilizado en este estudio proporciona un análisis exhaustivo de las emisiones globales de los tres principales GEI (CO_2 , CH_4 y N_2O) durante un período de 30 años (1990-2020), que abarca 108 países de los cinco continentes. Los datos se obtuvieron del Banco de Datos del Banco Mundial, (Data Bank, The Word Bank, consultado en 2024) un repositorio mundialmente reconocido de indicadores económicos y ambientales que recopila información validada y de alta calidad de organizaciones internacionales y agencias nacionales de estadística. La selección de 108 países se basó en la disponibilidad de datos, lo que garantiza un conjunto de datos sólido y consistente, a la vez que minimiza las brechas que podrían afectar la fiabilidad del análisis. Este criterio permite realizar comparaciones significativas entre diferentes regiones y contextos económicos. El conjunto de datos recopilado incluye registros anuales organizados en emisiones totales (medidas en toneladas métricas) y emisiones per cápita (toneladas métricas por persona) para cada país, lo que permite examinar las tendencias tanto absolutas como ajustadas a la población. Este sólido conjunto de datos integra dimensiones temporales, geográficas y comparativas, proporcionando una base confiable y amplia para analizar la dinámica de las emisiones y respaldar hallazgos significativos.

3.2 Preprocesamiento de datos

Para garantizar una agrupación eficaz y un análisis robusto de las emisiones de GEI, el preprocesamiento de datos fue un paso fundamental. La estandarización de las variables numéricas minimizó los errores derivados de discrepancias en la escala y magnitud de los datos, lo que facilitó el rendimiento del modelo y la comparabilidad entre conjuntos de datos. En este estudio, se aplicó la consolidada técnica de estandarización de puntuación Z, transformando los datos para que tuvieran una media de cero y una desviación estándar de uno, mejorando así la precisión y la fiabilidad del proceso de agrupación.

Las ecuaciones (1) a (3) representan las funciones estadísticas utilizadas para esta estandarización. Estas ecuaciones se seleccionaron porque:

1. Eliminan las diferencias de escala entre las variables, lo que permite una comparación justa de las emisiones entre países con diferentes magnitudes.
2. Preservan la distribución relativa de los datos originales, garantizando que la agrupación capture patrones significativos en lugar de valores absolutos.

3. Optimizan el rendimiento de la agrupación, en particular para las medias k con DTW, al garantizar que las métricas de distancia no estén dominadas por variables de alta magnitud.

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (3)$$

Donde z_i es el valor normalizado de x_i , μ es el valor medio de la variable x_i , σ es la desviación estándar de la variable x_i , y N es el número total de muestras.

Al aplicar esta transformación, los datos mantienen su estructura intrínseca y se vuelven más adecuados para la agrupación, lo que garantiza que los países con tendencias de emisiones similares se agrupen eficazmente.

3.3 Algoritmo k-means con medida DTW

El algoritmo k-means es fundamental en el aprendizaje automático no supervisado, valorado por su simplicidad y eficacia en la agrupación de datos basada en la similitud (Bock et al., 2007). Sin embargo, su rendimiento disminuye cuando se aplica a datos de series temporales debido a las limitaciones de la métrica estándar de distancia euclídea, incluyendo la sensibilidad a pequeños desplazamientos temporales y el requisito de series de igual longitud. Estos desafíos se mitigan con la medida DTW, que se destaca en el análisis temporal al alinear de manera óptima las series de tiempo para minimizar las discrepancias en su estructura temporal (Cai et al., 2021).

En el contexto del análisis de series temporales, como las emisiones de GEI de este estudio, la DTW permite identificar patrones dinámicos complejos que las métricas tradicionales suelen pasar por alto. Al buscar la alineación temporal óptima entre dos series, la DTW tiene en cuenta las variaciones en la velocidad o la temporalidad de los eventos. Esto se logra mediante un enfoque de programación dinámica para calcular la distancia de deformación acumulada, lo que garantiza que las discrepancias temporales no introduzcan sesgos en los resultados de la agrupación.

La integración de DTW con k-means mejora la interpretabilidad y escalabilidad del proceso de agrupamiento, lo que lo hace especialmente adecuado para conjuntos de datos ambientales a gran escala y a largo plazo. A diferencia del agrupamiento jerárquico, que requiere un alto volumen computacional para grandes conjuntos de datos, k-means partitiona los datos de forma eficiente, manteniendo agrupaciones significativas basadas en las tendencias de emisiones. Al aprovechar DTW, el método supera la rigidez de la distancia euclíadiana, garantizando que los países con comportamientos de emisiones similares a largo plazo se clasifiquen juntos, independientemente de los cambios en los períodos pico. Este enfoque no solo mejora la precisión de los resultados del agrupamiento, sino que también facilita clasificaciones relevantes para las políticas, permitiendo la identificación de distintos perfiles de emisiones (emisores bajos, medios y altos) que fundamentan las estrategias de mitigación específicas. Además, la robustez de k-means con DTW garantiza que el análisis capture tendencias estructurales en las emisiones en lugar de fluctuaciones transitorias, lo que permite una evaluación comparativa más fiable de las políticas nacionales y los compromisos a largo plazo con los objetivos climáticos. DTW calcula la distancia entre dos series de tiempo $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ y $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, donde la distancia se define de la siguiente manera:

$$D(i, j) = d(x_i, y_j) + \min \{D(x_{i-1}, y_{j-1}), D(x_{i-1}, y_j), D(x_i, y_{j-1})\} \quad (4)$$

$D(i, j)$ es la distancia acumulada al punto (i, j) y $d(x_i, y_j) = (x_i - y_j)^2$ es la distancia euclíadiana entre los puntos x_i y y_j . Los pasos generales del algoritmo K-means con DTW son los siguientes:

Paso 1: Inicialmente, se eligen aleatoriamente k series de tiempo como los “centroídes” iniciales, que representan los centros provisionales de cada grupo o conglomerado.

Paso 2: Para cada serie temporal, su distancia a cada centroide se calcula utilizando la métrica DTW (consulte la Ecuación 4).

Paso 3: Cada serie temporal X se asigna al clúster con el centroide C_i que tiene la distancia DTW más pequeña, asegurando que X esté agrupada con series similares.

$$\text{Cluster}(X) = \min_i \sum_j DTW(X, C_j) \quad (5)$$

Paso 4: Para cada grupo, calcule un nuevo centroide que represente mejor la serie dentro del grupo. El nuevo centroide, C_j es la serie X_p dentro del conglomerado que minimiza la suma de las distancias DTW con respecto a todas las demás series del conglomerado:

$$C_j = \min \sum_p \sum_l DTW(X_p, X_l) \quad (6)$$

En otras palabras, C_j es la serie “más representativa” de ese conglomerado, mientras X_l representa la serie temporal individual dentro del conglomerado asignado.

Paso 5: Los pasos 2 a 4 se repiten hasta que los grupos se estabilicen, mostrando un cambio mínimo entre iteraciones, o se alcance un criterio de parada, como minimizar la distancia total entre las series y sus centroides.

Aunque la DTW requiere un mayor esfuerzo computacional que la distancia euclídea, su capacidad para preservar la estructura intrínseca de las trayectorias de emisión justifica su selección. Esta combinación de k-medias con la DTW garantiza que los resultados de la agrupación reflejen con precisión los patrones de emisiones a lo largo del tiempo, lo que mejora la contribución del estudio a la política climática y la planificación de la sostenibilidad.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología empleada clasifica a los 108 países en tres grupos según sus niveles de emisiones, utilizando una escala que distingue entre niveles bajos, medios y altos. Esta clasificación se aplica a cada uno de los tres principales GEI, tanto en términos de emisiones totales como de emisiones per cápita.

4.1 EMISIONES GLOBALES DE N₂O PER CÁPITA Y TOTALES

4.1.1 EMISIONES GLOBALES PER CÁPITA DE N₂O

4.1.1.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales per cápita altas, medias y bajas de N₂O

La Figura 4 presenta los resultados del análisis de agrupamiento de los países en tres grupos relacionados con las emisiones globales de óxido nitroso (N₂O) per cápita en toneladas, durante el período estudiado.

En particular la Figura 4A muestra el grupo de países con las emisiones más altas, estas emisiones varían desde 0.45 toneladas emitidas por Camerún hasta 5.6 toneladas emitidas por Australia. Este grupo está conformado por 10 países que en conjunto generan las mayores emisiones de N₂O per cápita durante el período de estudio. Los principales contribuyentes son Mongolia quien lidera este grupo aportando un 14.16% de las emisiones per cápita del grupo, este alto porcentaje se debe principalmente a su actividad minera y su baja población, de apenas 3.5 millones de habitantes, ya que, en términos de emisiones totales de este GEI, Mongolia ocupa el puesto 46, lo que resalta el impacto desproporcionado de su población reducida. Australia aporta un 13.14% de las emisiones del grupo, sus principales actividades emisoras incluyen la producción agrícola y el sector ganadero, además de ser un país destacado en la minería, es de los principales emisores de N₂O ocupando el lugar 5 en emisiones totales, Nueva Zelanda representa un 12.8% de las emisiones, con un perfil económico similar al de Australia, destacándose su sector agropecuario mientras que Camerún genera un 10.94% de las emisiones aunque su contribución total es menor en comparación con Australia y Nueva Zelanda, Camerún ha registrado el mayor incremento en sus emisiones de N₂O durante el período de 30 años, con un aumento del 968.73%, este crecimiento se debe principalmente al drástico incremento entre 1993 y 1994 cuando las emisiones aumentaron un 1046.33%, este incremento coincide

con la guerra entre Camerún y Nigeria, que provocó indirectamente un aumento de las emisiones debido a la destrucción de bosques y tierras agrícolas, incendios y el uso de explosivos durante el conflicto. Otros países destacados son Uruguay que aporta un 7.94% de las emisiones del grupo, derivadas principalmente de su sector agropecuario que es la base de su economía, Botsuana representa el 7.86% de las emisiones del grupo, este país experimentó un incremento significativo en sus emisiones con un aumento del 303.11% durante todo el período de estudio, este crecimiento se explica principalmente por el drástico incremento registrado entre 2008 y 2010, periodo en el que el país se enfrentó a una de sus mayores crisis económicas por la caída de la demanda mundial de diamantes en esos años debido a que su economía depende en gran medida de la minería de diamantes, lo que obligó al país a buscar alternativas para diversificar su economía. Entre estas alternativas destacó el desarrollo del sector ganadero, lo que también contribuyó al aumento de las emisiones. Además, su baja población de apenas 2.6 millones de habitantes, amplifica el impacto de las actividades económicas en las emisiones per cápita de N₂O. Namibia y República Centroafricana también integran el grupo, entre sus principales actividades económicas destaca la minería y el sector agropecuario.

El análisis de las emisiones de N₂O per cápita revela que Mongolia lidera el grupo debido a su baja densidad de población y su economía minera. Sin embargo, Camerún y Botsuana se destacan por ser los países con los mayores incrementos porcentuales en sus emisiones a lo largo de los 30 años estudiados, con factores como conflictos bélicos y actividades ganaderas como las principales causas. Australia, aunque no lidera en crecimiento porcentual, se posiciona como el mayor emisor global entre los países de este grupo.

La Figura 4B representa el grupo de países con emisiones de N₂O a nivel medio, compuesto por 25 países y con un rango de emisiones entre 4.49 y 3.12 toneladas per cápita. Paraguay registró el pico más alto del grupo en 1990 seguido de una reducción significativa del 75,03% entre 1990 y 1995, este período coincide con una transición política importante, pasando de una dictadura de más de 30 años a un sistema democrático debido a este cambio en su sistema político, hubo un crecimiento en la agricultura extensiva, pero también se comenzó a aplicar algunas regulaciones ambientales que influyeron en la reducción del uso de fertilizantes nitrogenados, una de las principales fuentes de N₂O. En este contexto, el país comenzó a participar más en acuerdos internacionales sobre medio ambiente, destacando su adhesión a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1992, lo que incentivó la adopción de mejores prácticas agrícolas y de gestión de suelos.

(Embassy of Paraguay, Encyclopaedia Britanica Paraguay). Desde 1995 sus emisiones han mostrado un comportamiento más estable, por su baja población de 6,8 millones de habitantes aunado a su relevante actividad en el sector agrícola y ganadero, tiene una posición importante en este grupo, ocupando el segundo lugar y contribuyendo con un 6,56%, sin embargo, a nivel de emisiones totales ocupa el lugar 51. Lituania también con una población reducida de 2.8 millones de habitantes, lidera el grupo con un aporte del 6.66% en emisiones y un incremento bajo de 2.08% durante el período de estudio, sin embargo, a nivel global ocupa el puesto 69 en emisiones globales, aunque su principal actividad económica es la industria y la manufactura, la agricultura también desempeña un papel importante en su economía, siendo una de las principales fuentes de estas emisiones. Chad y Canadá contribuyen al grupo un 5.89% y 5.5% respectivamente destacándose Canadá por sus actividades agrícolas y productos forestales, aunque sus emisiones disminuyeron un 19.56, este descenso está relacionado con un aumento progresivo de su población, que pasó de 27.6 millones en 1990 a 38 millones en 2020. Otros países que destacan en este grupo son Estados Unidos contribuyendo un 3.61% debido a su importante actividad agrícola ocupando el lugar 12, el incremento progresivo de su densidad poblacional explica una disminución del 19.84% de emisiones entre 1990 al 2020, ya que en emisiones globales de este GEI es el segundo país que mayores emisiones genera, por otro lado Brasil representa un 3.26%, ocupando el lugar 17 del grupo, durante el periodo de estudio sus emisiones aumentaron un 26.16% derivadas de su sector agrícola, esto justifica que en emisiones globales ocupa el cuarto lugar.

En las emisiones N₂O per cápita Paraguay y Lituania lideran por su aportación agrícola y su baja población. Canadá, Brasil y Estados Unidos muestran cómo el crecimiento poblacional y las actividades económicas afectan las emisiones.

En la Figura 4C se agrupan 73 de los 108 países estudiados, representando las emisiones más bajas de N₂O en toneladas per cápita con un rango que oscila entre 0.05 y 1.03 toneladas. Las contribuciones de estos países son pequeñas y con diferencias mínimas variando entre el 0.168% y el 2.68%. Este grupo incluye países de diversas regiones del mundo. En América Latina destacan México ocupando el lugar 28 en el grupo, Chile (26), Venezuela (15) y Colombia (16), en Europa figuran Alemania, Grecia y España, ocupando los lugares 4, 7 y 12 respectivamente, de Asia sobresalen China (37), India (64) y Rusia (17), por su parte, en África están Argelia, Libia, Egipto, Sudáfrica, Kenia, Somalia y Nigeria, estos últimos con las menores contribuciones porcentuales dentro del grupo, entre ellos Somalia

destaca por liderar este grupo con una aportación del 2.68%, derivada principalmente de su agricultura y ganadería que constituye una gran parte de su economía, aunque su población es de apenas 1.8 millones de habitantes, a nivel global ocupa el lugar 62 en emisiones. En contraste, países como China, India y Rusia por su elevada densidad de población, presentan niveles de emisión per cápita muy bajos dentro del grupo. Sin embargo, son grandes contribuyentes globales de N₂O debido a su alta actividad agrícola y ganadera para satisfacer su gran demanda alimentaria. En este sentido, China ha registrado un incremento en sus emisiones de N₂O per cápita de 38% y la India un 18%, impulsados por el crecimiento de sus poblaciones y economías.

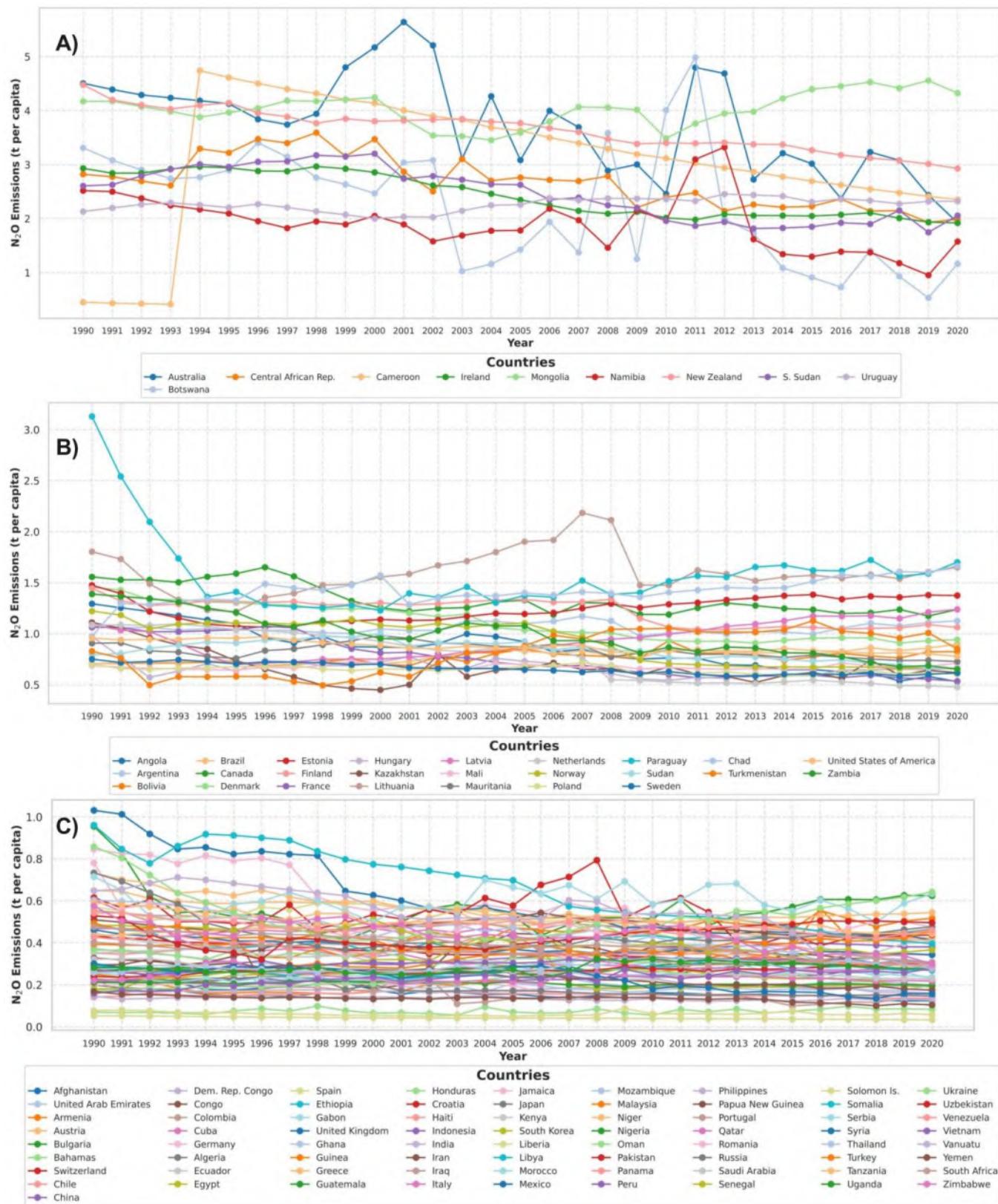


Figura 4.1 Emisiones globales de N₂O en tm per cápita; **A** Grupo de emisiones altas, **B** Grupo de emisiones medias, **C** Grupo de emisiones bajas.

4.1.1.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales per cápita de N₂O

La Figura 5 muestra la tendencia promedio de las trayectorias seguidas por cada grupo de emisiones de N₂O per cápita en toneladas. Los tres clústeres se diferencian por colores: el Clúster 1: representa las emisiones altas con una línea roja, el Clúster 2: representa las emisiones medias con una línea azul y el Clúster 0: Representa las emisiones bajas con una línea verde.

El Clúster 1, N₂O per cápita: Refleja la tendencia promedio del grupo de emisiones altas, en el cual se encuentran el 9.25% de los países considerados para este estudio, presenta una tendencia fluctuante a lo largo del período analizado, entre 1994 y 2020 se registraron las emisiones más altas alcanzando su pico máximo en el año 2000 con un total de 33.4 toneladas, en contraste, el período con las emisiones más bajas ocurrió entre 2013 y 2020, el punto más bajo registrado fue en 2019 con 21.83 toneladas, la reducción en las emisiones de este grupo durante todo el período estudiado fue de 21.74% y de 24.61% del año 2020 respecto a 1990, lo anterior coincide con el crecimiento poblacional que fue más lento entre 1994 y 2000, pero más acelerado entre 2013 y 2020 en países como Mongolia, Uruguay y Australia. A lo largo de los 30 años de estudio este grupo generó un total de 882.9 toneladas, lo que equivale al 36.86% de las emisiones globales de N₂O per cápita, durante este período el promedio de emisiones por persona fue de 88.29 toneladas mientras que el promedio anual por persona en los países de este grupo se situó en 2,94 toneladas. Este grupo también se caracteriza por sectores como minería, ganadería y agricultura.

El Clúster 2, N₂O per cápita: Muestra el comportamiento de emisiones promedio del grupo con los niveles medios, conformado por el 23.14% de los países considerados para este estudio, muestra una tendencia promedio casi lineal durante el período de estudio (1990-2020), sin embargo, se identifican variaciones específicas en algunos períodos, presentando su pico máximo en 1990 con emisiones totales de 29.17 toneladas ese año y un promedio anual por persona de 1.16 toneladas, seguida de una disminución entre 1990-1995 donde se observa una tendencia descendente en las emisiones. A partir de 1995, las emisiones per cápita se estabilizan en torno a 0.98 toneladas anuales por persona, manteniéndose constantes hasta 2008 y presentando una nueva caída entre 2009-2020, durante este período se presenta otra ligera disminución en las emisiones, en promedio por persona se registra un valor de 0.90 toneladas, detectándose el pico más bajo en 2009. Todas las emisiones de los países de este grupo ese año fue de 22.23 toneladas y 0.88 toneladas

anuales por persona. En general, las emisiones muestran una trayectoria estable sin grandes picos o fluctuaciones marcadas, identificándose tres períodos principales caracterizados por caídas en las emisiones seguidas de fases de estabilización, el primer periodo con una disminución inicial (1990-1995), segundo período de estabilidad (1995-2008) y tercer período con caída moderada y estabilización posterior (2009-2020). Los cambios en la tendencia de emisiones coinciden con el crecimiento más lento de la población en los dos primeros períodos y aceleración del crecimiento poblacional en el último período, esto explica la disminución total del 23.69% en las emisiones del grupo durante los 30 años de estudio y un 21.84% de reducción en 2020 respecto a 1990. El total de emisiones generadas del grupo entre 1990-2020 fueron 745.70 toneladas, con una contribución a las emisiones totales de N₂O per cápita de 31.13%, un promedio por persona de 29.2 toneladas y un promedio anual por persona de 0.99 toneladas. La agricultura y la ganadería son actividades económicas en los países que conforman este grupo, contribuyendo significativamente a las emisiones de N₂O per cápita.

El Clúster o, N₂O per cápita: Exhibe la trayectoria promedio del grupo de las emisiones bajas, integrado por el 67.61% de los países considerados para este estudio, presenta una tendencia lineal sin fluctuaciones ni períodos marcados, mostrando una disminución desde el inicio del periodo hasta su culminación. El pico más alto de emisiones totales del grupo se registró en 1990, con 24.44 toneladas y 0.40 toneladas anuales por persona, en contraste, el punto más bajo se alcanzó en 2018 con 22.52 toneladas y 0.30 toneladas anuales por persona, a partir de este año, se inicia un período de estabilización, manteniéndose las emisiones en torno a ese rango hasta 2020. Esta tendencia descendente coincide con el crecimiento sostenido de la población mundial, lo que explica parcialmente el comportamiento del grupo, al ser este clúster el más numeroso, agrupando al 67% de los países considerados en el estudio, las contribuciones individuales de cada uno son pequeñas y presentan diferencias mínimas, lo que refuerza la tendencia descendente y casi lineal del grupo. En total las emisiones generadas por este grupo a lo largo de los 30 años de estudio alcanzaron las 766.57 toneladas, lo que representa un 32.00% de las emisiones totales de N₂O per cápita, el promedio por persona a lo largo del período fue de 10.50 toneladas, con un promedio anual de 0.35 toneladas por persona, siendo el grupo que menos emisiones per cápita genera. Además, se registró una disminución del 26.00% en las emisiones totales y del 23.18% en las emisiones per cápita en 2020 con respecto a 1990. Cabe destacar que en este grupo se encuentran países con altos niveles de población, cuya elevada demanda

alimentaria requiere una gestión intensiva de los sectores agropecuarios y agroindustriales, lo que influye significativamente en los niveles de emisiones de N₂O.

El análisis de las emisiones totales per cápita revela importantes diferencias en el impacto ambiental entre los tres grupos, aunque el grupo 1 (emisiones altas) incluye solo al 9.25% de los países estudiados, genera el 36,86% de las emisiones globales de N₂O, con un promedio anual de 2.94 toneladas por persona, esto refleja un impacto per cápita desproporcionado ya que sus emisiones individuales son 2.97 veces mayores que las del grupo 2 y 8.40 veces superiores a las del grupo 0. Por otro lado, el Clúster 2 (emisiones medias) aporta el 31.13% de las emisiones totales, con un promedio anual por persona de 0.99 toneladas, lo que lo posiciona como un grupo de contribución intermedia tanto en emisiones totales como en impacto por persona, las emisiones por persona de este grupo son aproximadamente 2.83 veces mayores que las del grupo 0. Grupo 0 (emisiones bajas), a pesar de agrupar al 67% de los países estudiados, solo genera el 32.00% de las emisiones globales, con un promedio anual de 0.35 toneladas por persona, esto evidencia que, aunque representa la mayoría de los países, su impacto total es moderado debido a las bajas emisiones per cápita. Las diferencias porcentuales en las emisiones per cápita resaltan cómo un pequeño grupo de países (Clúster 1) contribuye de manera desproporcionada al total de emisiones globales, mientras que los grupos de emisiones medias y bajas (Clúster 2 y 0) tienen un impacto menor per cápita, aunque su contribución total sea significativa debido a su mayor número de integrantes.

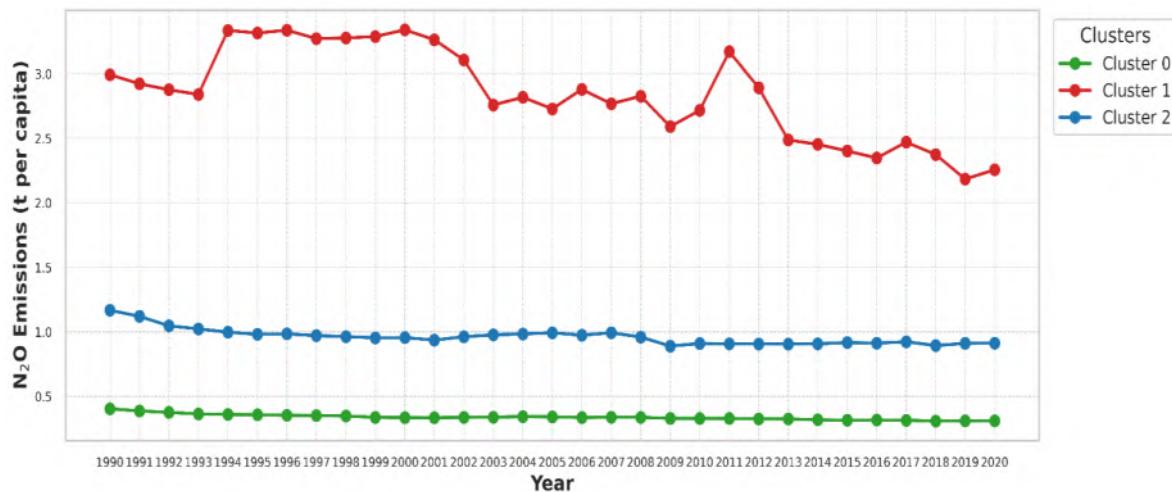


Figura 4.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales de N₂O tm per cápita por grupo.

4.1.1.3 Segmentación global de emisiones de N₂O per cápita

La Figura 6 presenta la segmentación de los países del mundo según sus emisiones per cápita de N₂O. De forma gráfica se muestra en el mapa tres grupos de países representados por colores: los países con emisiones altas, pintados en color rojo, forman el Cluster 1; aquellos con emisiones medias en color azul integran el Cluster 2; y los países con emisiones bajas en color verde corresponden al Cluster 0. Este mapa permite visualizar el comportamiento de las diferentes regiones del mundo en relación con las emisiones de este gas de efecto invernadero. En América Latina, la mayoría de los países pertenecen a los grupos de emisiones medias y bajas con 4 y 9 países respectivamente, solo Uruguay se encuentra en el grupo de emisiones altas, principalmente debido a su baja población y la relevancia del sector agropecuario en su economía, esto refleja que América Latina tiene una mayor representación en grupos con contribuciones globales moderadas, sin embargo, las diferencias en actividades económicas, tamaño poblacional y patrones de consumo son significativas dentro de la región. En América del Norte predominan países con emisiones medias de N₂O per cápita, como Estados Unidos y Canadá, este patrón responde a factores como el tamaño de la población, el nivel de desarrollo tecnológico y económico, sin embargo, a escala global, ambos países se encuentran entre los principales emisores de este gas de efecto invernadero.

En la Unión Europea, hay una distribución equilibrada entre los países de emisiones medias y bajas, con una proporción similar en cada grupo, solo Irlanda se encuentra en el grupo de emisiones altas, debido a su baja población (5.2 millones de habitantes) y la relevancia del sector agropecuario dentro de sus actividades económicas, especialmente la producción de lácteos y carne.

En Asia, predominan los países del grupo de emisiones bajas, con solo dos países en el grupo de emisiones medias (Kazajistán y Turkmenistán) y dos en el grupo de emisiones altas (Mongolia y Australia), en esta región la estructura poblacional tiene un impacto significativo: países como China , India y Rusia , aunque están en el grupo de emisiones bajas, son los principales contribuyentes globales de N₂O debido a su alta demanda alimentaria y a la actividad de otros sectores como la industria y el transporte generadores de estas emisiones.

En África, predominan los países del grupo de emisiones bajas, con 21 países, aunque hay una representación notable en los grupos de emisiones medias (6 países) y altas (5 países).

Los países del grupo de emisiones altas se caracterizan por incrementos drásticos en sus emisiones durante el periodo de estudio, principalmente debido a conflictos bélicos, crisis y actividades económicas predominantes como la minería y la agricultura.

Las emisiones totales de los 108 países que integran los tres grupos (emisiones altas, medias y bajas) ascienden a 2,395.18 toneladas de N₂O per cápita. Entre los tres principales gases de efecto invernadero (GEI) —N₂O, CH₄ y CO₂—, el óxido nitroso es el que registra menores emisiones en términos per cápita. Este gas contribuye con solo el 9.55% de las emisiones totales de N₂O, CH₄ y CO₂ combinados. A lo largo del período de estudio, las emisiones per cápita de los 108 países mostraron una disminución significativa del 25.28%, lo que refleja una tendencia general hacia la reducción de emisiones debido al crecimiento de la población mundial. El promedio anual global por persona durante este período fue de 0.73 toneladas de N₂O. En términos generales se observa una reducción de las emisiones de N₂O per cápita, sin embargo esta disminución no ocurre a nivel de emisiones globales, ya que el impacto del crecimiento de la población juega un papel crucial, al dividir las emisiones totales de este gas entre el número de habitantes de cada país o región, el resultado muestra un descenso per cápita, esto indica que la población ha crecido a un ritmo mayor que las emisiones de N₂O, lo que explica la percepción de una reducción en términos per cápita.

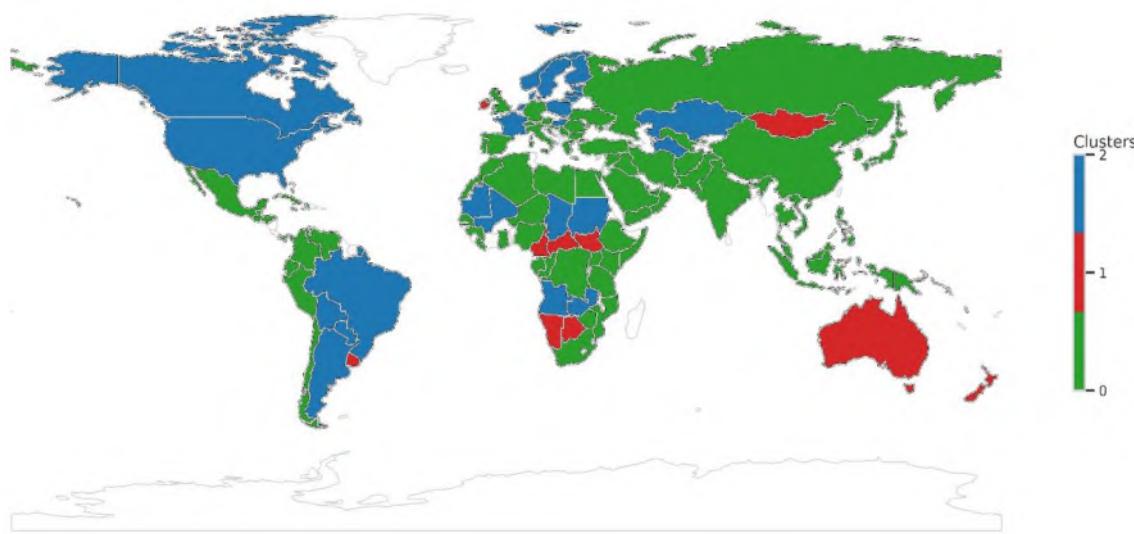


Figura 4.3 Mapa de las emisiones de N₂O tm per cápita por país.

4.1.2 EMISIONES GLOBALES TOTALES DE N₂O

4.1.2.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales totales altas, medias y bajas de N₂O

La Figura 7 muestra los resultados del análisis de agrupamiento de los países en tres grupos, según sus emisiones totales de óxido nitroso (N₂O) en kilotoneladas (kt) durante el período analizado.

En particular la Figura 7.A exhibe el grupo de emisiones altas de N₂O, que varían entre 295,990.80 kt y 551,682.72 kt. En este grupo, China es el único país representándolo, lo que resalta su papel como el mayor emisor global de este gas en términos totales, este hecho refleja el impacto de su alta población, por ello al analizar las emisiones de N₂O per cápita China ocupa el puesto 72, posicionándose entre los últimos lugares en este segmento, sin embargo, en términos absolutos, no solo lidera el grupo, sino que debido a la gran diferencia en emisiones con respecto al segundo país se mantiene como único integrante de este grupo. China incrementó su población de 1.1 mil millones en 1990 a 1.4 mil millones en 2020, un crecimiento del 21.82% durante este periodo, sin embargo, el aumento en sus emisiones totales de N₂O durante el mismo lapso fue de un 61.86%, casi tres veces superior al crecimiento de su población, esto indica que el aumento de su población no justifica por sí solo el incremento excesivo en sus emisiones globales totales de N₂O. Entre los factores determinantes se encuentra el uso excesivo de fertilizantes químicos para satisfacer su gran demanda alimentaria, lo que contribuye significativamente a la generación de este gas de efecto invernadero, no obstante este factor no es la única causa, China también lidera la producción mundial de productos químicos, incluidos fertilizantes que generan N₂O como subproducto, además su empeño por mantener un crecimiento económico sostenido, su rápida industrialización y urbanización agravan el problema. Aunque el N₂O no es el principal gas emitido por la industria energética, actividades asociadas, como la quema de biomasa y el manejo inadecuado de aguas residuales, también contribuyen significativamente a sus emisiones totales.

La Figura 7.B representa el grupo de países con emisiones totales de N₂O a nivel medio, que abarcan un rango entre las 106,201.45 kt emitidas por Brasil en 1990 y 279,003.79 kt emitidas por India en 2020. Este grupo está integrado por tres países, liderado por Estados Unidos que contribuye con el 41 % de las emisiones, principalmente debido a la agricultura intensiva y el uso masivo de fertilizantes nitrogenados, los cuales liberan N₂O de manera

significativa, al igual que otros países Estados Unidos también genera emisiones relevantes a partir de la ganadería, especialmente del ganado vacuno, que constituye una fuente importante de este gas, a pesar de ser el mayor emisor dentro del grupo, Estados Unidos ha mantenido una tendencia más estable en el tiempo, con un incremento de solo el 8.47 % en sus emisiones durante el período analizado, esto se debe al uso de tecnologías agrícolas más eficientes, la implementación de regulaciones ambientales para mitigar los gases de efecto invernadero, incluido el N₂O, y un crecimiento demográfico más controlado. India, que ocupa el segundo lugar en el grupo con una contribución del 34.14 %, refleja un panorama distinto, como el país más poblado del mundo, la presión sobre el sector agropecuario es importante ya que su población creció de 870.45 millones en 1990 a 1,396.38 millones en 2020, un aumento del 47.65 %, lo que intensificó la demanda de alimentos, lo anterior justifica un incremento en sus emisiones de N₂O en un 66.9 % durante el mismo periodo, a este incremento también contribuye que India es un importante productor de fertilizantes a nivel mundial aunque su impacto es menor comparado con la agricultura. Por su parte, Brasil, con una contribución del 24.02 %, cierra el grupo, las emisiones en este país están estrechamente relacionadas con el sector agrícola, la deforestación y la expansión de tierras para uso agropecuario, como líder mundial en la producción de biocombustibles, particularmente de etanol derivado de la caña de azúcar, Brasil ha experimentado un aumento significativo en la producción de este cultivo, donde se emplean fertilizantes nitrogenados que generan N₂O como subproducto, a lo largo del período analizado, las emisiones brasileñas crecieron un 61.34 %, un aumento desproporcionado en comparación con el crecimiento de su población, que fue del 34.90 %. y

En general, mientras Estados Unidos ha logrado estabilizar el crecimiento de sus emisiones gracias a la tecnología, regulaciones ambientales y un menor crecimiento poblacional, India y Brasil han mostrado un incremento más acelerado de sus emisiones debido al crecimiento demográfico, la intensificación de la agricultura y el uso de fertilizantes nitrogenados. Estas diferencias subrayan la influencia de factores específicos en la evolución de las emisiones de N₂O en cada país.

La Figura 7.C incluye a los países que generan las menores emisiones totales de N₂O, agrupa a la mayoría de los países analizados en este estudio, con 104 de los 108 países considerados. Con un rango que va desde 17.58 kt emitidas por Bahamas en 1994 hasta 108,556.14 kt emitidas por Rusia en 1990. Las contribuciones de los países dentro de este grupo se organizan según el nivel de sus emisiones. Los primeros 14 países aportan entre el 5.43% y

el 2.12% de las emisiones totales del grupo, Australia ocupa el primer lugar, con una contribución del 5.43%, derivada principalmente de su sector agropecuario y su actividad minera, seguida por Rusia que aporta el 4.63% y Camerún se posiciona en el tercer lugar con un 3.90% estos dos últimos debido principalmente a su actividad agrícola, continua Indonesia (3.81%), Alemania (3.44%), Francia (3.40%), Pakistán (3.34%), Canadá (3.07%), Argentina (2.95%) y México, en el décimo lugar, con un 2.81%. Del puesto 15 al 31, se encuentra otro bloque de países que contribuyen con porcentajes entre el 1.98% y el 1.06%, en este grupo destacan Turquía (15), Ucrania (16), Polonia (18), Japón (19), Italia (20), España (21), Colombia (23) y Sudáfrica (26). El siguiente bloque incluye a países del puesto 32 al 91, cuyas contribuciones oscilan entre el 0.97% y el 0.10%, en este bloque se encuentra, la República del Congo (32), seguida de Kenia (33), Venezuela (34), Países Bajos (35), Corea del Sur (36) y Filipinas (38). Finalmente, el último bloque comprende los países ubicados entre los puestos 92 y 108, con contribuciones que van del 0.098% al 0.001%, entre ellos destacan Haití (92), Congo (93), Emiratos Árabes Unidos (94), Panamá (95), Omán (97) y Catar (100).

A pesar de que este grupo genera las menores emisiones totales de N₂O, existen diferencias significativas entre los bloques de países en cuanto a la cantidad emitida y su contribución al grupo. Los primeros 14 países generan el 46.24% de las emisiones del grupo, el segundo bloque aporta el 25.13%, el tercero el 28.03%, y el último bloque tan solo el 0.58%. Estas variaciones reflejan la influencia de factores como las actividades económicas predominantes, el tamaño de la población, y los niveles de desarrollo económico y tecnológico en las emisiones totales de N₂O.

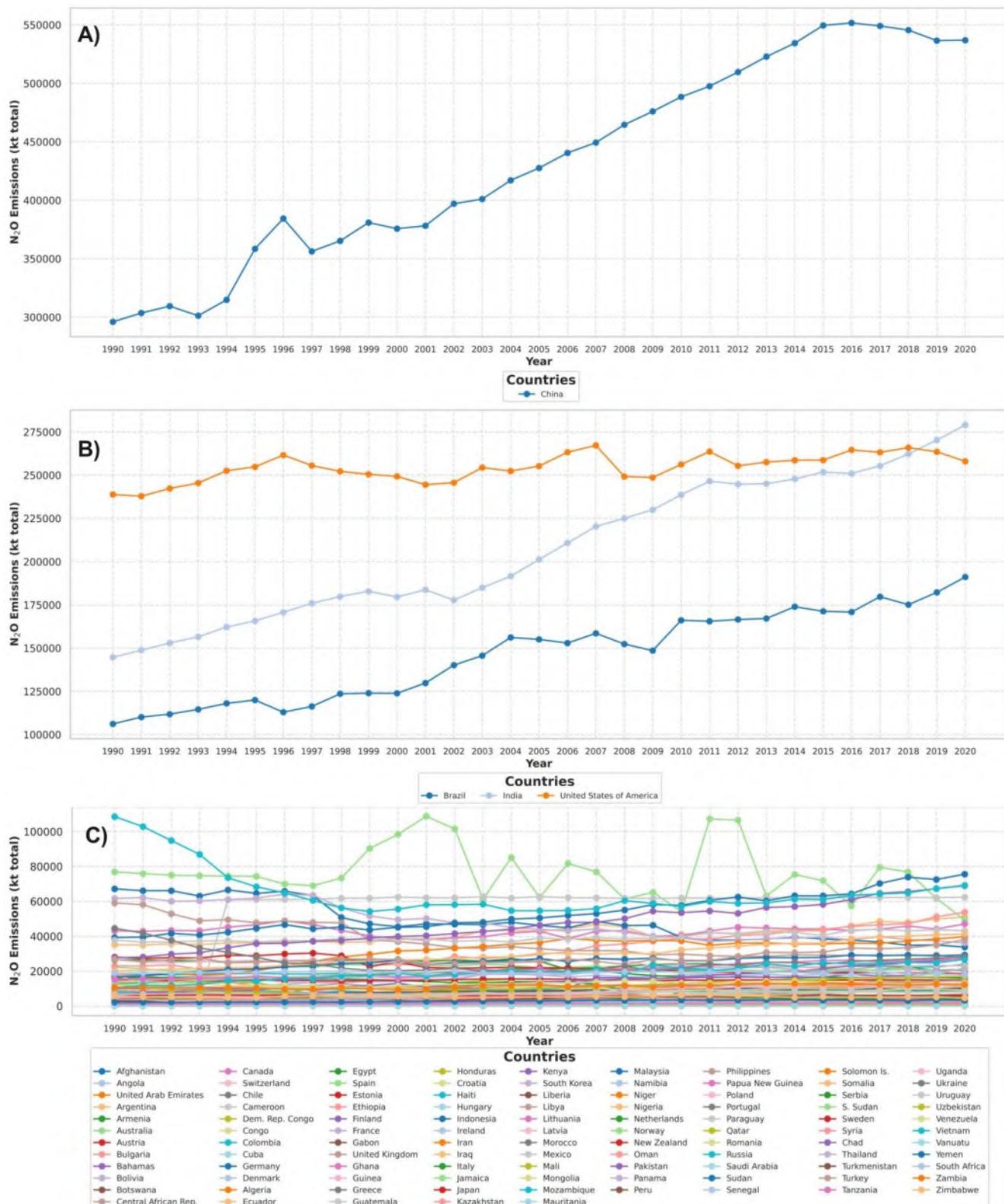


Figura 4.4. Emisiones globales de N₂O en kt totales; **A** Grupo de emisiones altas, **B** Grupo de emisiones medias, **C** Grupo de emisiones bajas.

4.1.2.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales totales de N₂O

En la Figura 8, describe el comportamiento de la tendencia de las trayectorias promedios que siguen cada uno de los grupos de emisiones totales de N₂O en kt. Los tres clústeres se diferencian por colores: el Clúster 1: representa las emisiones altas con una línea roja, el Clúster 2: representa las emisiones medias con una línea azul y el Clúster 0: Representa las emisiones bajas con una línea verde.

En el clúster 2, N₂O total, revela la tendencia promedio del grupo de emisiones altas, se encuentra representado exclusivamente por un único país: China, que concentra el 100% de las emisiones de este grupo y se posiciona como el mayor emisor de N₂O en el mundo. Por tanto, la trayectoria de este clúster está determinada exclusivamente por el comportamiento de las emisiones registradas por China. Entre 1990 y 2003, las emisiones de N₂O mostraron una tendencia fluctuante, con los niveles más bajos registrados durante todo el periodo de estudio, el punto más bajo se alcanzó en 1990, con emisiones de 295,990.80 kt, este descenso coincide con los ajustes económicos que China experimentó en la década de los 90 (World Bank, IMF, consultado en 2024), cuando se implementaron cambios en sus políticas agrícolas y mejoras en la eficiencia de los sistemas de producción, en contraste, el periodo de emisiones más altas ocurrió entre 2004 y 2016 alcanzando un pico máximo en 2016 con 555,682.72 kt, posteriormente, entre 2017 y 2019 se observó una ligera caída en las emisiones aunque en 2020 se revirtió esta tendencia con un leve aumento. El crecimiento de las emisiones durante el segundo y tercer periodo estuvo relacionado principalmente con el acelerado desarrollo económico de China, factores como la expansión de la agricultura intensiva, con un mayor uso de fertilizantes nitrogenados priorizando la productividad sobre la sostenibilidad, contribuyeron significativamente, además, la industrialización masiva particularmente en la producción de ácido nítrico que libera N₂O como subproducto, y la expansión ganadera responsable de emisiones por el manejo de estiércol y las tierras de pastoreo, fueron determinantes. Estos factores explican el incremento del 61.86% en las emisiones de N₂O a lo largo del periodo de estudio, un contraste notable con la disminución del 21.74% en las emisiones per cápita del grupo de altas emisiones durante el mismo tiempo. En total durante los 30 años analizados este clúster emitió 13,419,151.74 kt de N₂O, lo que representa el 17.73% de las emisiones globales de este gas, al tratarse de un único país en el clúster, el promedio de emisiones totales por país coincide con las del grupo completo, mientras que las emisiones anuales promedio fueron de 447,305.05 kt.

El clúster 1, N₂O total, muestra la trayectoria promedio correspondiente al grupo de emisiones medias, está compuesto por el 2.88% de los países analizados en este estudio. Este grupo presenta una tendencia ascendente casi lineal, con fluctuaciones menores en algunos años, el crecimiento de las emisiones está determinado principalmente por India y Brasil, cuyos trayectos individuales muestran un incremento constante a lo largo del periodo, sin embargo, las fluctuaciones observadas en las emisiones del grupo se explican principalmente por el comportamiento de Estados Unidos, que aunque es el mayor contribuyente tuvo el menor incremento en sus emisiones en comparación con India y Brasil, pero exhibió mayores variaciones a lo largo del tiempo. Lo anterior justifica que este grupo haya registrado un incremento del 40.29% en las emisiones de N₂O durante los 30 años de estudio, mientras que el incremento del año 2020 con respecto a 1990 fue de 48.70%. Durante el periodo de estudio, el nivel más bajo de emisiones totales de N₂O se registró en 1990, con 489,648.33 kt, lo que equivale a un promedio de 163,216.11 kt por país ese año, por otro lado, el pico más alto del grupo se alcanzó en 2020, con emisiones totales de 728,109.39 kt y un promedio de 242,703.13 kt por país. En total este grupo emitió 18,854,175.57 kt de N₂O durante los 30 años analizados, representando el 24.92% de las emisiones globales de este gas, el promedio de emisiones totales por país fue de 6,284,725.18 kt durante todo el periodo, mientras que las emisiones anuales promedio por país se situaron en 209,490.84 kt. Los países de este grupo se caracterizan por una intensa actividad en el sector agropecuario, así como en industrias que generan N₂O como subproducto, además enfrentan una creciente demanda alimentaria impulsada por el crecimiento poblacional, particularmente en el caso de India, lo que contribuye significativamente a sus emisiones.

El clúster 0, N₂O total, representa el comportamiento de las emisiones promedio del grupo de países con los niveles más bajos, está compuesto por el 96.29% de los países analizados. Este grupo presenta una tendencia lineal con un ligero ascenso y sin fluctuaciones importantes, a lo largo del periodo estudiado, se distinguen dos fases principales. El primer periodo abarca de 1990 a 1993, años en los que se registró la menor cantidad de emisiones del grupo, con una tendencia decreciente. En 1990, las emisiones alcanzaron 1,337,783.5 kt, llegando a su punto más bajo en 1993 con 1,273,747.24 kt, lo que representó una disminución del 4.86%. El segundo periodo, que abarca de 1994 a 2020, muestra un crecimiento continuo en las emisiones. Entre 1993 y 1994, estas aumentaron un 4.54%, marcando el inicio de una tendencia ascendente que persistió hasta 2020, año en el que se alcanzó el pico más alto del grupo con 1,548,654.47 kt. A lo largo de este periodo, las

emisiones del clúster crecieron un 19.97%. Estos cambios entre periodos no son particularmente significativos, al ser el clúster más numeroso, integra a más del 95% de los países estudiados, por lo que la mayoría de las contribuciones individuales de cada país son pequeñas y presentan variaciones mínimas, lo que refuerza la tendencia ascendente casi lineal del grupo. En total este grupo generó 43,371,657.77 kt de N₂O a lo largo de los 30 años estudiados, representando el 57% de las emisiones globales de este gas, el promedio de emisiones generadas por país durante todo el periodo fue de 417,035.17 kt, mientras que el promedio anual por país fue de 13,901.17 kt. A pesar de ser el grupo que más emisiones acumuló debido al gran número de países que lo integran, este clúster registró el menor incremento porcentual en sus emisiones, con un aumento total del 15.10% en el periodo analizado, este crecimiento es 2.6 veces menor que el del grupo de emisiones medias y 4 veces menor que el del grupo de altas emisiones.

El análisis de los clústeres de emisiones globales totales de N₂O revela dinámicas diferenciadas impulsadas por factores económicos y productivos. China del clúster 2 único integrante del grupo de altas emisiones, concentra el 17.73% de las emisiones globales con un promedio anual de 447,305.05 kt, siendo el mayor emisor debido a su intensificación agrícola e industrialización, por otro lado el clúster 1 compuesto por India, Brasil y EE. UU., aporta el 24.92% de las emisiones globales con un promedio anual de 209,490.83 kt por país; su tendencia ascendente refleja la expansión agropecuaria e industrial y el clúster 0, que agrupa al 96.29% de los países, genera el 57% de las emisiones globales, pero con un promedio anual por país significativamente menor de 13,901.17 kt mostrando una tendencia lineal de bajo crecimiento. Además, un país del grupo de altas emisiones genera anualmente 2.14 veces más emisiones que uno del grupo de emisiones medias y 32.18 veces más que uno del grupo de bajas emisiones, por su parte un país del grupo de emisiones medias genera 15.07 veces más emisiones que uno del grupo de bajas emisiones.

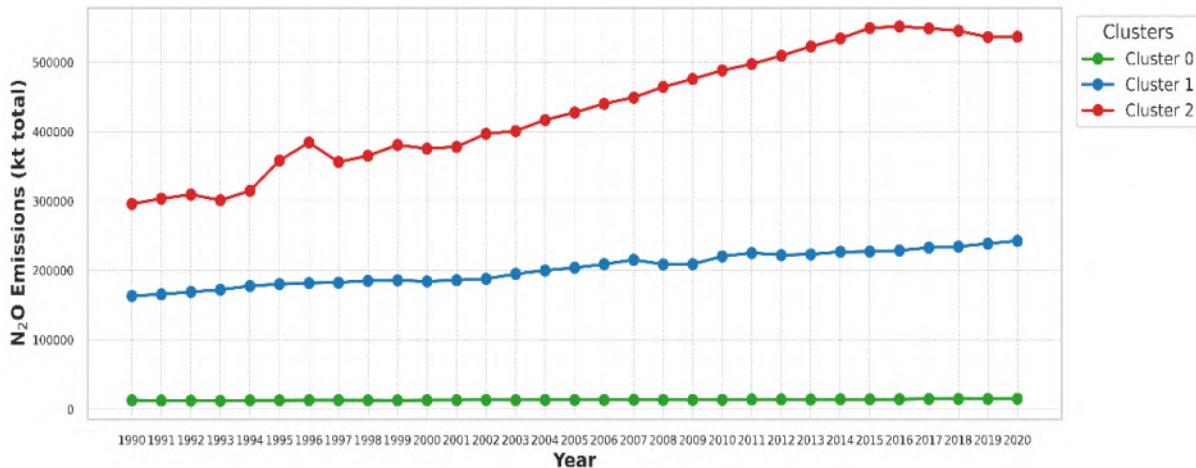


Figura 4.5 Trayectoria promedio de las emisiones globales totales de N₂O en kt por grupo.

4.1.2.3 Segmentación global de emisiones totales de N₂O

La Figura 9 muestra la segmentación de países en el mundo según sus emisiones totales de óxido nitroso (N₂O). En el mapa se presenta una representación esquemática de la distribución de países por regiones o continentes, agrupados en tres clústeres diferenciados por colores: los países con emisiones altas, pintados en rojo, corresponden al Clúster 1; aquellos con emisiones medias, en azul, forman el Clúster 2; y los países con emisiones bajas, en verde, integran el Clúster 0. Esta clasificación permite visualizar el comportamiento global en relación con las emisiones totales de N₂O.

En el continente americano, se observa que solo dos países están en el grupo de emisiones altas, Estados Unidos contribuye con el 10.42% de las emisiones globales totales, ocupando el segundo lugar mundial, por su parte, Brasil aporta el 5.98%, situándose en el cuarto lugar global, ambos países reflejan la influencia de factores como el tamaño de su población, el nivel de desarrollo económico y tecnológico, y las actividades económicas predominantes, como la agricultura y la ganadería que contribuyen a sus emisiones de este GEI. El resto de los países del continente americano pertenece al grupo de emisiones bajas, aunque algunos ocupan posiciones relevantes en el ranking global: Canadá (puesto 12, 1.76%), Argentina (puesto 13, 1.69%), México (puesto 14, 1.61%), Venezuela (puesto 38), y Colombia (puesto 27), en estos países, la agricultura y la ganadería son actividades económicas clave, además Canadá al tener suelos ricos en materia orgánica liberan mayores cantidades de N₂O al ser

alterados por actividades agrícolas, mientras que en México, la práctica de la quema de rastrojos y otros residuos agrícolas contribuye significativamente a sus emisiones.

En el continente africano, todos los países están clasificados en el grupo de emisiones bajas, lo que explica que el mapa pinte esta región completamente en verde, en cambio en emisiones per cápita se observa una distribución más proporcional, con países en los tres grupos: bajas, medias y altas, debido a la baja población de muchos países africanos que eleva las emisiones per cápita al dividir las emisiones totales entre su número reducido de habitantes. A nivel global, los países africanos ocupan posiciones intermedias y bajas en el ranking de emisiones totales de N₂O: Sudáfrica (puesto 30), Zambia (puesto 39), Botswana (puesto 80), Libia (puesto 91) y Nigeria (puesto 14). Un caso destacado es Camerún, a pesar de tener una población de 28 millones de habitantes, ocupa el séptimo lugar global con una contribución del 2.23% a las emisiones totales, debido la importancia del sector agropecuario en su economía, junto con una falta de regulación adecuada que agrava el problema. En Europa todos los países están clasificados en el grupo de emisiones bajas, ocupando posiciones intermedias en el ranking global, entre los países destacados están Alemania (puesto 9, contribución 1.97%), Francia (puesto 10, contribución 1.95%), España (puesto 20, contribución 1.53%) e Italia (puesto 24, contribución 0.89%), este comportamiento refleja un mejor manejo de emisiones gracias a tecnologías avanzadas y políticas ambientales reguladas en la región. En Asia se observa la mayor diversidad en los grupos de emisiones, este continente tiene representación en los tres clústeres: altas, medias y bajas. China, como único país asiático en el grupo de emisiones altas, lidera el ranking global con el 17.73% de las emisiones totales de N₂O. India en el grupo de emisiones medias, ocupa el tercer lugar mundial con una contribución del 8.51%, por otro lado, Rusia, también en el grupo de emisiones medias, aporta el 2.66% de las emisiones globales. En conjunto, China, India y Rusia representan el 28.9% de las emisiones globales de N₂O, lo que equivale a casi una tercera parte de las emisiones totales mundiales.

Las emisiones globales totales de los 108 países que integran los tres grupos (emisiones altas, medias y bajas) ascienden a 75,644,985.09 kt de N₂O totales. Entre los tres principales gases de efecto invernadero —N₂O, CH₄ y CO₂—, el óxido nitroso es el que registra menores emisiones, este gas contribuye con solo el 6.89% de las emisiones totales de N₂O, CH₄ y CO₂ combinados. A lo largo del período de estudio las emisiones de los 108 países mostraron un incremento del 28.53%, en contraste con la reducción global que se registró en términos per cápita del 25.28%. Lo anterior muestra una tendencia hacia el incremento en las emisiones

globales de N₂O, a causa del uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, crecimiento en la ganadería, deforestación y cambio de uso de suelo, quema de biomasa, crecimiento de la población y demanda de alimentos, así como los cambios climáticos y ciclos naturales, que generan un círculo vicioso ya que este gas contribuye al calentamiento global y este calentamiento intensifica los procesos biológicos de los suelos, aumentando la producción de N₂O en ambientes naturales y agrícolas, además los cambios en los patrones de lluvia y temperatura afectan los ciclos de nitrógeno, lo cual puede generar más emisiones de N₂O.

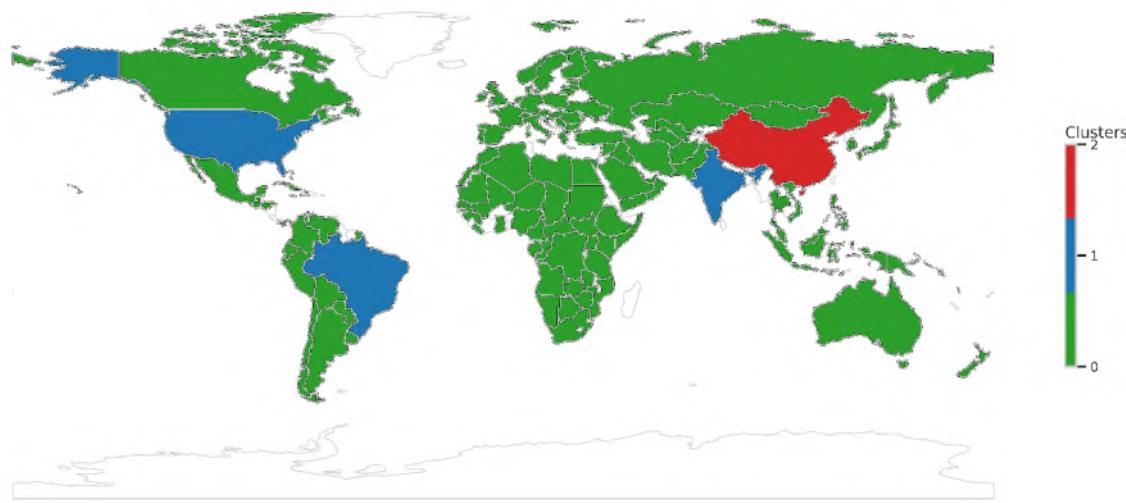


Figura 4.6 Mapa de las emisiones globales totales de N₂O en kt por país.

4.2 EMISIONES DE CH₄ PER CÁPITA y TOTALES

4.2.1 EMISIONES GLOBALES PER CÁPITA DE CH₄

4.2.1.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales per cápita altas, medias y bajas de CH₄

La Figura 10 muestra los resultados del análisis de agrupamiento de los países en tres grupos relacionados con las emisiones globales per cápita de metano (CH₄) en toneladas, durante el período de estudio de 1990 a 2020.

La Figura 10.A representa un grupo reducido de países con las emisiones per cápita de CH₄ más altas. Este grupo está compuesto únicamente por Turkmenistán y Catar, con un rango

de emisiones de 28.4 toneladas de CH₄ generadas por Turkmenistán en 1990 y 8,07 toneladas por Catar ese mismo año. Turkmenistán lidera el grupo contribuyendo con 57.85%, seguido de Catar con 42.11%, ambos países muestran tendencias individuales caracterizadas por fluctuaciones marcadas. En el caso de Catar, las fluctuaciones en las emisiones per cápita están relacionadas con el crecimiento acelerado y fluctuante de su población durante el mismo período, la cual creció el 192.39%, sin embargo, sus emisiones per cápita de CH₄ a lo largo del periodo incrementaron el 44.34%, el aumento poblacional generó caídas puntuales en las emisiones per cápita lo que contribuyó a disminuir el impacto de las emisiones por persona. La posición de Catar como segundo lugar en este grupo se justifica por su modelo económico, basado en la producción y exportación de gas natural licuado y petróleo, siendo el país con las tercera mayores reservas de gas natural del mundo y de los tres mayores exportadores de gas natural licuado (GNL), sin embargo en términos de emisiones totales, Catar se posiciona en el lugar 58, al ser una país con una economía intensiva en recursos fósiles y tener una población pequeña de 2.7 millones de habitantes lo coloca en una posición importante en términos de emisiones per cápita de CH₄. Por su parte Turkmenistán lidera este grupo debido a que su economía también depende de la producción y exportación de gas natural, este país posee las cuartas mayores reservas de gas natural del mundo y más del 80% de sus exportaciones están vinculadas a este recurso. Las fluctuaciones en las emisiones de Turkmenistán son particularmente notables con caídas pronunciadas en los años 1997 y 1998, coincidiendo con una crisis económica derivada de disputas sobre gasoductos con Rusia que condujo a la disminución de la producción de gas natural, la otra caída en 2009 concuerda con la explosión de un gasoducto que forzó la interrupción del flujo de gas durante varios meses, lo que también contribuyó a una reducción temporal en sus emisiones.

La Figura 10.B exhibe el grupo de países con emisiones medias de CH₄ per cápita, integrado por 16 países y con un rango de emisiones entre 12.8 toneladas emitidas por Libia en 1995 y 2.1 toneladas emitidas por Kazajistán en 1998. Sus principales contribuyentes son Libia encabezando el grupo y contribuyendo con un 10.60% de las emisiones, este país es un importante productor de petróleo y gas natural, se encuentra entre los mayores productores de África, las emisiones de metano se generan principalmente de la extracción de estos dos recursos fósiles, aunado a la falta de infraestructura adecuada por su inestabilidad económica y política del país desde hace varias décadas, lo anterior justifica un incremento en sus emisiones de 37.77% durante todo el periodo. El segundo puesto lo ocupa Venezuela

aunque gran parte de la fuente de generación de su electricidad es la hidroeléctrica, su contribución al este grupo es de 9.42% dado a que su economía está dominada por el sector de los hidrocarburos, este país cuenta con las mayores reservas de petróleo en el mundo, sin embargo presenta emisiones con una tendencia fluctuante en descenso, registrando una disminución de 83.71% durante el periodo, esta importante caída a causa la crisis económica que ha enfrenta el país desde hace varios años generando una disminución en la producción petrolera y deterioro de su infraestructura petrolera, por otro lado, Nueva Zelanda ocupa el tercer lugar en el grupo, con una contribución del 9.13% a las emisiones, a pesar de ser un país con una destacada participación en fuentes de energía renovables, especialmente hidroeléctrica y geotérmica, que son claves para su producción eléctrica, sin embargo, su principal actividad económica es el sector agropecuario, particularmente la ganadería destinada a la producción de carne y productos lácteos, como uno de los mayores exportadores de lácteos del mundo, este sector genera una gran cantidad de emisiones de metano, derivadas principalmente de la fermentación entérica del ganado y el manejo de desechos. Estas características explican y justifican su posición en el grupo a pesar de sus avances en el uso de energías limpias, no obstante, este país ha registrado durante el periodo de estudio una reducción de sus emisiones per cápita de CH₄ del 43.97% gracias a sus políticas y regulación que impulsan los avances tecnológicos que permiten la reducción de GEI incluido el metano ya que es signataria del acuerdo de Paris. Emiratos Árabes Unidos ocupan el cuarto lugar, contribuyendo con el 8.86% de las emisiones del grupo y una reducción del 56.49% debido al incremento de su población, aunque los Emiratos Árabes Unidos cuentan con una economía diversificada, más del 90% de su electricidad se genera a partir del gas natural, lo que incrementa sus emisiones per cápita de CH₄. Por su parte, Australia se posiciona en quinto lugar contribuyendo significativamente a las emisiones con 8.11% como resultado de su intensa actividad ganadera, aunque a nivel de emisiones globales totales de metano, Australia se encuentra en una posición mucho más alta que los Emiratos Árabes Unidos, esto se explica en parte por la diferencia por el tamaño de la población: Australia tiene 2.8 veces más habitantes que los Emiratos Árabes Unidos, lo que amplifica su impacto en términos per cápita. Con menores contribuciones per cápita participan en este grupo Paraguay con 4.81% en el lugar 9, Rusia con 4.25% en lugar 13, y Argentina en el lugar 16 aportando 3.56 % a las emisiones del grupo. En el caso de Argentina y Paraguay a causa de su sectores agrícola y ganadero, estos sectores son particularmente relevantes en Argentina ya que el país es uno de los mayores productores de carne y lácteos, inclusive en emisiones totales de CH₄, Argentina se posiciona en el lugar 12, mientras que

las emisiones de Rusia provienen de su gran industria energética especialmente en la extracción, procesamiento y transporte de gas natural y petróleo.

La Figura 10.C agrupa a los países con bajas emisiones de CH₄ en toneladas per cápita, incluyendo 90 de los 108 países analizados en este estudio. Dentro de este grupo, las emisiones varían desde 5.22 toneladas registradas por Botsuana en 2011 hasta 0.06 toneladas reportadas por Liberia en 2005. Liberia además de tener las emisiones per cápita más bajas, contribuye únicamente con el 0.07% a las emisiones totales del grupo, y al estar compuesto mayoritariamente por países con bajas emisiones per cápita, las aportaciones individuales son pequeñas, oscilando entre el 2.70% y el 0.07%. Entre los países destacados del grupo se encuentran China en la posición 68, con una contribución del 0.69%, Estados Unidos en el lugar 7, aportando un 2.19%, e India, en la posición 79, con el 0.52%. No obstante, en términos de emisiones totales de CH₄, estos tres países ocupan los primeros lugares a nivel mundial, lo que evidencia el impacto de la población en sus emisiones per cápita. China e India, al contar con grandes poblaciones presentan bajas emisiones per cápita, mientras que Estados Unidos con una población menor refleja mayores emisiones por persona y se posiciona en los primeros lugares dentro del grupo. A pesar de eso, durante el período analizado China incrementó sus emisiones per cápita de CH₄ en un 23%, en cambio, Estados Unidos e India lograron reducirlas en un 16.89% y un 19.20%, respectivamente, en el caso de India, esta reducción se debe principalmente al crecimiento acelerado de su población, que aumentó un 47.65% en el mismo período, lo que diluyó sus emisiones per cápita, mientras que Estados Unidos mantiene una tendencia más estable en sus emisiones globales totales de CH₄. Otros países relevantes que destacan por su participación en este grupo son Japón en el lugar 107, contribuyendo 0.24% y Alemania en el lugar 57 aportando 0.80% a las emisiones del grupo, sin embargo, ambos países ocupan lugares intermedios a nivel de emisiones totales globales de CH₄, Japón en el lugar 42 y Alemania en el lugar 21, lo anterior refleja el impacto de su población en relación con emisiones per cápita de CH₄.

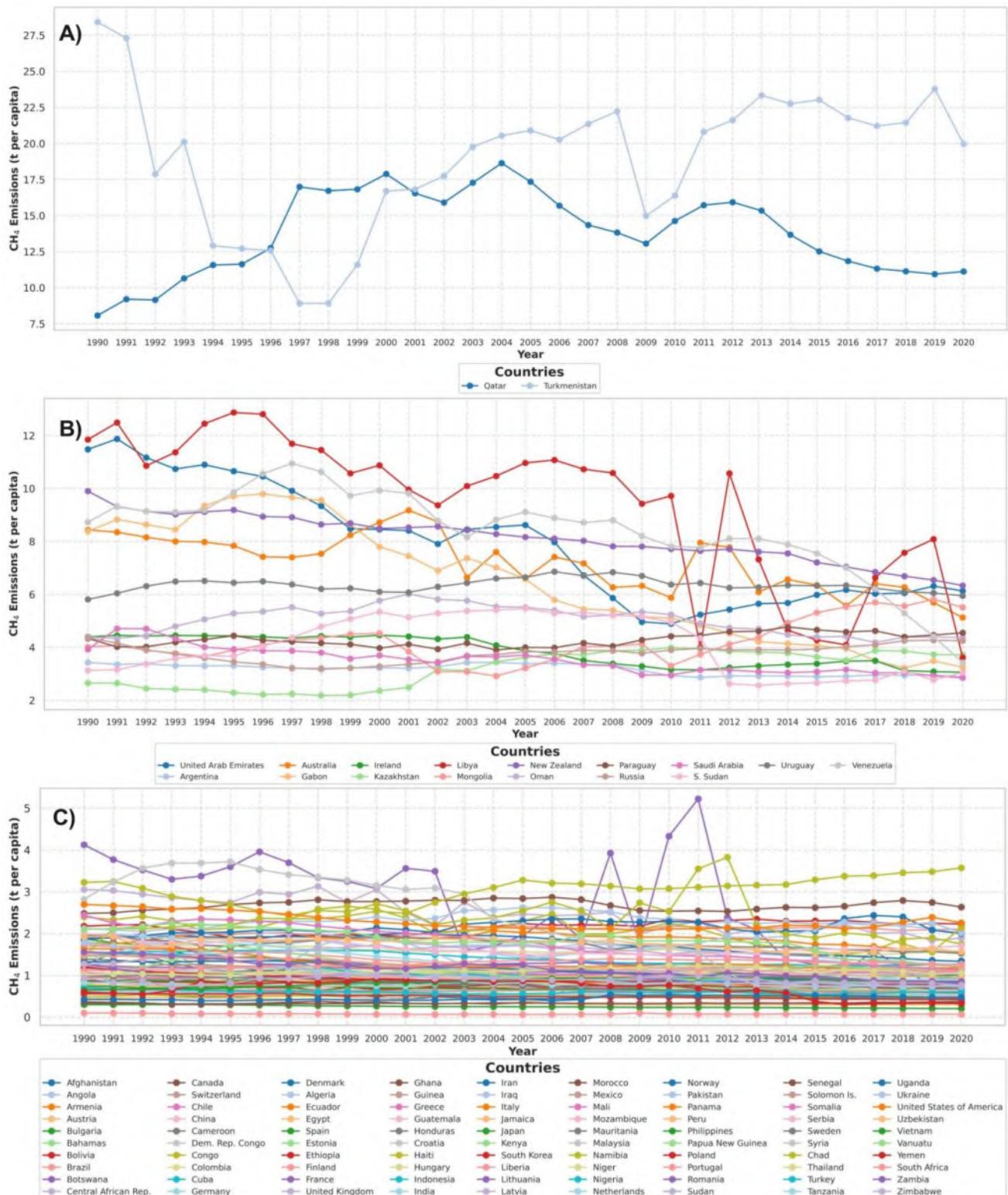


Figura 4.7 Emisiones globales de CH₄ en tm per cápita; **A** Grupo de emisiones altas, **B** Grupo de emisiones medias, **C** Grupo de emisiones bajas.

4.2.1.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales per cápita de CH₄

La Figura 11 describe la tendencia promedio de las trayectorias seguidas por cada grupo de emisiones de CH₄ per cápita en toneladas. Los tres clústeres se diferencian por colores: el Clúster 1 representa las emisiones altas con una línea roja, el Clúster 2 representa las emisiones medias con una línea azul y el Clúster 0 representa las emisiones bajas con una línea verde.

El Clúster 1, CH₄ per cápita, representa la trayectoria promedio del grupo con las emisiones más altas, compuesto por menos del 2% de los países considerados en este estudio. A lo largo del periodo de análisis este grupo muestra una tendencia caracterizada por pronunciadas caídas y picos. Entre 1994 y 1998 se registró el periodo con las menores emisiones de los 30 años de estudio, en este lapso de tiempo el grupo generó 101.22 toneladas, alcanzando el punto más bajo en 1994 con 24.34 toneladas como grupo y 12.24 toneladas promedio por persona ese año, antes de este periodo, entre 1990 y 1994, las emisiones disminuyeron un 32.49%, por el contrario se identificaron dos periodos con las mayores emisiones generadas: el primero entre 2000 y 2008 cuando el grupo alcanzó 323.77 toneladas, precedido por un incremento del 32.53% entre 1998 y 2000, y el segundo entre 2011 y 2019 tiempo en que se generaron 318.18 toneladas, este último fue antecedido por una caída en 2009, cuando las emisiones disminuyeron un 22.24% respecto a 2008, sin embargo, estas se recuperaron rápidamente entre 2010 y 2011, con un aumento del 28.40%, antes de iniciar el segundo periodo de emisiones altas. El pico más alto durante los 30 años de estudio se alcanzó en 2004, cuando las emisiones del grupo llegaron a 39.18 toneladas per cápita y las emisiones promedio por persona registraron 19.59 toneladas, estas fluctuaciones en conjunto, resultaron en una disminución total del 14.80% en las emisiones del grupo durante el periodo analizado y de 14.80% del año 2020 con respecto a 1990. En total este grupo generó 1,017.04 toneladas per cápita de CH₄ durante los 30 años de estudio, lo que equivale al 14.49% de las emisiones globales totales de CH₄ per cápita, las emisiones promedio por persona en estos 30 años fueron de 508.52 toneladas, mientras que las emisiones anuales por persona se registraron en 16.95 toneladas.

Este grupo está integrado únicamente por Turkmenistán y Qatar, países cuyas principales actividades económicas son la producción y exportación de gas natural licuado y petróleo, siendo destacados productores y exportadores de estos recursos fósiles a nivel mundial, las fluctuaciones en las emisiones del grupo están más influenciadas por Turkmenistán, que

presenta una tendencia individual con mayores variaciones debido a crisis económicas y accidentes en gasoductos que interrumpieron el flujo de gas, provocando reducciones temporales en las emisiones, estas caídas se reflejan claramente en la tendencia del grupo. Por su parte Qatar también experimentó fluctuaciones, aunque de menor magnitud, principalmente relacionadas con las variaciones en el crecimiento de su población.

El clúster 2, CH₄ per cápita, representa el comportamiento de las emisiones promedio del grupo de países con niveles medios, representando el 14.81% de los países considerados en este estudio. Durante los 30 años analizados, este grupo muestra una tendencia lineal en descenso con picos ligeros, entre 1990 y 2003 se observa el período con las mayores emisiones, acumulando un total de 1,370.70 toneladas y un promedio de 85,68 toneladas por persona, durante este lapso, las emisiones experimentaron una reducción del 7.06%, siendo 1991 el año con el pico más alto cuando el grupo registró 101.15 toneladas totales y 6.32 toneladas promedio por persona. Entre 2003 y 2011 se presentó un período de emisiones en un nivel intermedio, durante este tiempo se registraron 702.51 toneladas totales y un promedio de 43.90 toneladas por persona, con una reducción del 15.97% en las emisiones, posteriormente se generó un incremento del 6.25% entre 2011 y 2012, seguido por el período de menores emisiones que abarcó de 2013 a 2020, en este último intervalo el grupo reportó 600 toneladas totales y un promedio de 37.55 toneladas por persona, alcanzando una reducción del 19,68%. El año 2020 marcó el punto más bajo, con emisiones totales de 68.07 toneladas y un promedio de 4.25 toneladas por persona. En términos generales, el comportamiento del clúster durante todo el período de estudio resultó en un total de 2,757.75 toneladas de CH₄ per cápita, representando el 39.31% de las emisiones globales totales de CH₄ per cápita, el promedio de emisiones por persona fue de 172.36 toneladas, mientras que el promedio anual por persona fue de 5.74 toneladas en los países de este grupo, además la reducción total en las emisiones alcanzó el 31.39% y de 31.39% del año 2020 con respecto a 1990. Esta disminución se explica por importantes reducciones individuales registradas en países clave por sus contribuciones al grupo, como Venezuela, Nueva Zelanda y Emiratos Árabes Unidos, debido a factores económicos, regulatorios o al incremento de su población. No obstante, los países que conforman este grupo son importantes generadores de emisiones globales totales de CH₄. Esto se debe a que sus principales actividades económicas están relacionadas con la producción y exportación de recursos fósiles, así como con el sector agropecuario. En particular, la ganadería juega un papel destacado al contribuir significativamente a las emisiones de CH₄.

Cluster 0, CH₄ per cápita, refleja la tendencia promedio del grupo de países con emisiones bajas, integrado por el 83.33% de los países analizados en este estudio, presenta una tendencia lineal descendente en sus emisiones, sin fluctuaciones significativas ni períodos marcados. Desde el inicio del periodo hasta su finalización, se observa una disminución constante en las emisiones per cápita de CH₄. En 1990 las emisiones totales del grupo alcanzaron su punto máximo con 118.15 toneladas y un promedio de 1.32 toneladas anuales por persona, a partir de este año y hasta 2003 las emisiones experimentaron un descenso continuo logrando una reducción de 11.65% durante este periodo, posteriormente 2004, las emisiones se estabilizaron en torno a 104 toneladas anuales por grupo, con un promedio de 1.16 toneladas anuales por persona, este nivel se mantuvo prácticamente constante hasta 2006. A partir del 2007 se registró otra leve disminución en las emisiones de 1.43% entre 2006 y 2007. Durante los años 2007 al 2011, se presentaron ligeras fluctuaciones con pequeños picos y caídas, en este periodo el balance muestra una reducción del 5.18%, con emisiones promedio anuales del grupo de 101.54 toneladas y 1.12 toneladas promedio anuales por persona. En 2012 las emisiones retomaron una tendencia descendente constante, registrando disminuciones anuales hasta 2020, en este periodo las emisiones anuales promedio del grupo fueron de 94.23 toneladas, con un promedio de 1.04 toneladas anuales por persona y una reducción total del 8.19% durante este tiempo.

Al ser el grupo con la mayor cantidad de países considerados para este estudio conformado por 90 de los 108 países, las contribuciones de cada uno de ellos son pequeñas, además la participación de países altamente poblados como India y China, junto con el crecimiento global de la población, contribuye a la dilución de las emisiones totales de CH₄ al calcularlas en términos per cápita. Esta dinámica explica la tendencia general decreciente en las emisiones per cápita de metano de este grupo, observándose durante todo el periodo (1990-2020) una disminución total en ellas del 46.19% y del 23.10% del año 2020 con respecto al 1990. En total las emisiones generadas por este grupo alcanzaron 3,240.57 toneladas, lo que contribuye con el 46.19% a las emisiones totales de CH₄ per cápita, el promedio por persona a lo largo del periodo fue de 35.94 toneladas, con un promedio anual por persona de 1.19 toneladas. Lo anterior demuestra que este grupo genera la menor cantidad de emisiones per cápita de metano CH₄ y quien presenta la mayor reducción en sus emisiones, como resultado del acelerado crecimiento de la población a nivel global.

El análisis de las emisiones per cápita de CH₄ revela que el grupo de emisiones altas genera 14.24 veces más emisiones anuales por persona en comparación con el grupo de emisiones

bajas y 2.95 veces más en relación con el grupo de emisiones medias, asimismo el grupo de emisiones medias genera 4.82 veces más emisiones anuales por persona que el grupo de emisiones bajas. En cuanto a las contribuciones totales globales de CH₄ per cápita, el grupo de emisiones bajas que agrupa al 83.33% (90 de 108) de los países analizados aporta el 46.19% de las emisiones globales totales per cápita de CH₄, esto refleja que, a pesar de generar menores emisiones por persona, es el mayor contribuyente global. Por otro lado, el grupo de emisiones medias, que integra al 14.81% (16 de 108) de los países contribuye con un significativo 39.31%, mostrando que su impacto per cápita es mucho más concentrado. Finalmente, el grupo de emisiones altas compuesto únicamente por el 1.85% de los países (2 de 108), representa un 14.49% de las emisiones globales totales per cápita de CH₄, reflejando el alto nivel de emisiones por persona en los países de ese grupo, impulsado principalmente por sus actividades económicas relacionadas con la producción y exportación de combustibles fósiles. Esta distribución pone de manifiesto cómo la composición demográfica, económica y de actividades productivas de los grupos influye en su impacto de las emisiones globales de CH₄ per cápita.

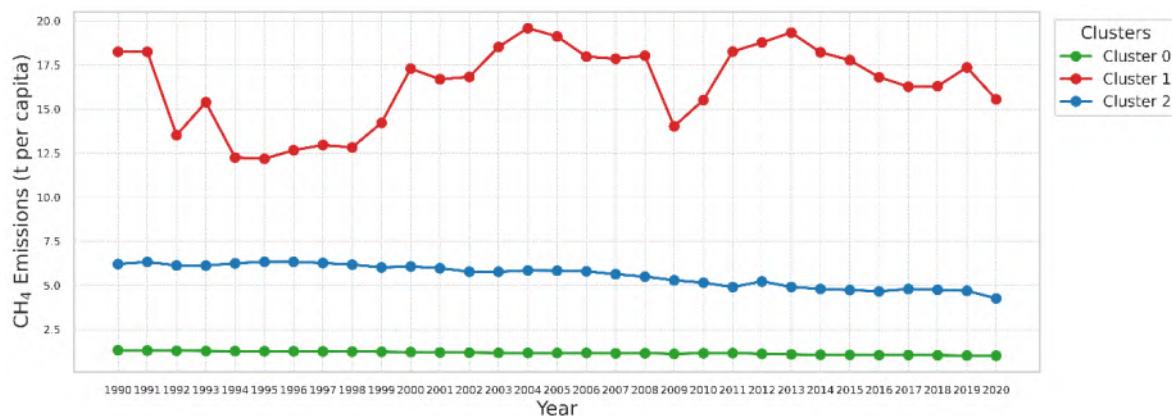


Figura 4.8 Trayectoria promedio de las emisiones globales de CH₄ tm per cápita por grupo.

4.2.1.3 Segmentación global de emisiones per cápita de CH₄

La Figura 12 muestra la segmentación de los países del mundo según sus emisiones per cápita de CH₄, representando gráficamente tres grupos diferenciados por colores: los países con emisiones altas, en color rojo, forman el Clúster 1; aquellos con emisiones medias, en azul, integran el Clúster 2; y los países con emisiones bajas, en verde, correspondiente al

Clúster 0. Este mapa permite visualizar el comportamiento de las diferentes regiones del mundo en relación con las emisiones de este gas de efecto invernadero (GEI).

En América, se observa la participación de cuatro países en el grupo de emisiones medias (Clúster 2), destacando por sus posiciones en el ranking global de emisiones per cápita de CH₄. Venezuela en el cuarto lugar a nivel global es el país latinoamericano con mayores emisiones per cápita, aportando un 3.70% de las emisiones globales, esto se debe a su economía altamente dependiente del sector de hidrocarburos, le sigue Uruguay en el lugar nueve contribuyendo con un 2.80%, cuya actividad ganadera es la principal fuente de emisiones, Paraguay clasificado en el lugar once aporta un 1.89%, mientras que Argentina en el lugar dieciocho contribuye con un 1.39%, ambos países impulsados también por la intensa actividad ganadera, por otro lado, el resto de América Latina predomina en el grupo de emisiones bajas (Clúster 0), ocupando posiciones intermedias en el ranking global. México en el lugar 50, contribuye con un 1.14%, siendo sus principales fuentes de metano la extracción de petróleo y gas natural, además de la ganadería, mientras que Brasil, clasificado en el lugar 30 aporta un 0.89%, aunque en emisiones globales absolutas CH₄, es el quinto mayor emisor debido a su relevante producción mundial de ganado bovino, finalmente Colombia en el lugar 39 contribuye con un 0.70%, con emisiones principalmente relacionadas con la ganadería y el cultivo de arroz, dado que cuenta con una de las mayores poblaciones de ganado en la región. En general, las emisiones de CH₄ en América Latina reflejan patrones diversos. Países como Argentina, Uruguay, Paraguay Colombia y Brasil destacan por su dependencia de la ganadería, mientras que en Venezuela y México las actividades relacionadas con los hidrocarburos, siendo estos sectores los que generan sus emisiones.

En África, la mayoría de los países corresponden al grupo de emisiones bajas de CH₄, un ejemplo destacado es Sudáfrica que ocupa el puesto 44 a nivel global en emisiones per cápita de este GEI, contribuyendo con un 0.6%, sin embargo, en términos de emisiones globales totales Sudáfrica se posiciona en el puesto 23, debido a su papel como uno de los mayores productores de carbón del mundo, una actividad que contribuye significativamente a estas emisiones. Por otro lado, Botsuana por su baja población de 2.6 millones de habitantes, se ubica en el puesto 20 global en emisiones per cápita de CH₄ contribuyendo con un 1.19%, ya que en emisiones totales ocupa el lugar 95, Liberia con una contribución de solo 0.03% en emisiones per cápita, se encuentran entre los de menores emisiones, ocupando el lugar 108 global per cápita y el 107 en emisiones totales. En esta región también se encuentran países

en el grupo de emisiones medias, como Libia que ocupa el puesto tres global en emisiones per cápita de CH₄, contribuyendo con un significativo 416%, y Argelia en el puesto 8 con una contribución del 2.85 %, ambos países generan la mayor parte de sus emisiones de metano a partir de la producción de petróleo y gas natural, siendo Libia uno de los principales productores en África. En Europa, predomina la participación de los países en el grupo de emisiones bajas, ocupando posiciones en los últimos lugares a nivel de emisiones de metano per cápita, con contribuciones pequeñas. Por ejemplo, Alemania se sitúa en el puesto 75, contribuyendo con un 0.37%, Francia en el puesto 60 con un 0.47%, Italia en el puesto 79 con un 0.36% y España en el puesto 74, aportando un 0.38%. No obstante, cabe destacar que a nivel de emisiones globales totales de CH₄, estos países se sitúan en posiciones relativamente altas, ocupado el lugar 21, 22, 32 y 36 respectivamente, lo anterior refleja el impacto de su población a nivel de emisiones per cápita. Dentro de esta región destaca Irlanda, como el único país europeo en el grupo de emisiones medias, ocupando el puesto 14 global en emisiones per cápita de CH₄ y contribuyendo con un 1.70%, en contraste, a nivel de emisiones totales globales Irlanda se posiciona en el puesto 61. Aunque la agricultura no es la principal actividad económica de Irlanda, sigue siendo fundamental en su economía y una de las mayores fuentes de emisiones de este gas de efecto invernadero.

Asia se destaca por ser el continente con países en los tres grupos de emisiones de metano. Los dos países que integran el grupo de emisiones altas pertenecen a esta región: Turkmenistán y Qatar, que lideran a nivel mundial en emisiones per cápita de metano, ocupando los puestos 1 y 2 respectivamente, con contribuciones del 8.39 % y 6.10 % en las emisiones globales, ambos son importantes productores y exportadores de gas natural en el mundo, lo que explica el alto nivel de sus emisiones. Entre los países de esta región que participan en el grupo de emisiones medias se encuentran Rusia, en el puesto 15 con una contribución del 1.67 %, Arabia Saudita, en el puesto 16 con un 1.55 %, y Australia, en el puesto 7 con un 3.18 %, todos ocupando posiciones destacadas en el ranking global de emisiones per cápita de metano. En el caso de Australia, estas emisiones se originan principalmente en el sector agropecuario, mientras que en Arabia Saudita y Rusia predominan las emisiones relacionadas con sus grandes industrias energéticas, específicamente por la extracción y procesamiento de petróleo y gas natural.

Las emisiones totales de los 108 países que integran los tres grupos (emisiones altas, medias y bajas) ascienden a 7,015.47 toneladas de CH₄ per cápita. Entre los tres principales gases de efecto invernadero (GEI) —N₂O, CH₄ y CO₂—, el metano es el que registra emisiones

intermedias en términos per cápita. Este gas contribuye con el 27.97% de las emisiones totales de N₂O, CH₄ y CO₂ combinados. A lo largo del período de estudio, las emisiones per cápita de los 108 países mostraron una disminución significativa del 25.15%, lo que refleja una tendencia general hacia la reducción de emisiones debido al crecimiento de la población mundial. El promedio anual global por persona durante este período fue de 2.16 toneladas de CH₄, por lo que el crecimiento de la población tiene un impacto crucial en las emisiones per cápita de metano. Este fenómeno explica cómo países con altas emisiones totales a nivel global pueden ocupar los últimos lugares en el ranking de emisiones per cápita, mientras que otros con emisiones globales totales intermedias o bajas pueden posicionarse en lugares destacados en términos per cápita. Lo anterior invita a reflexionar sobre la cantidad de emisiones que genera una persona, independientemente del tamaño de la población, las actividades económicas predominantes, el nivel de desarrollo tecnológico y ecológico en el país o región en la que se encuentre.

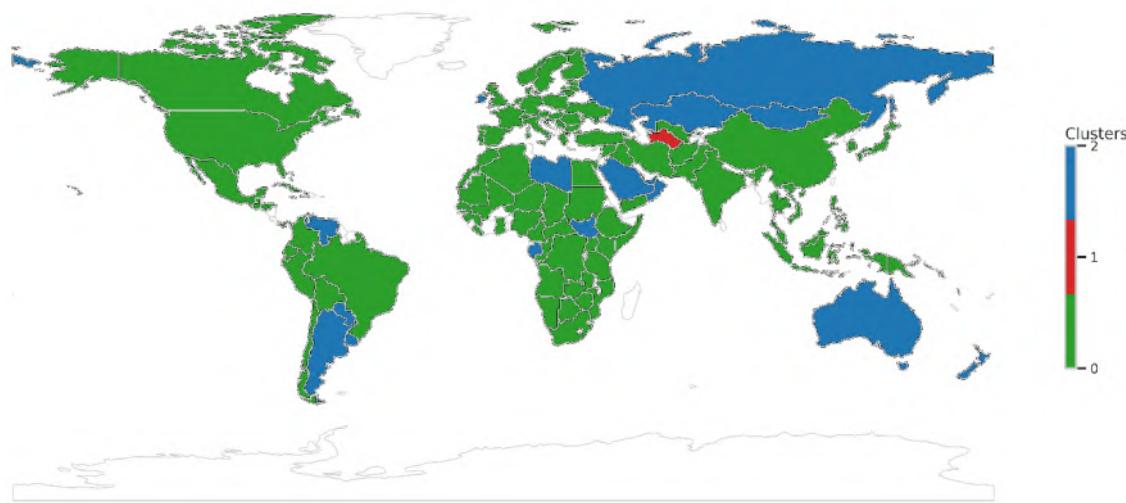


Figura 4.9 Mapa de las emisiones per cápita de CH₄ tm por país

4.2.2 EMISIONES GLOBALES TOTALES DE CH₄

4.2.2.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales totales altas, medias y bajas de CH₄

La Figura 13 presenta los resultados del análisis de agrupamiento de los países en tres grupos relacionados con las emisiones globales totales de metano en kilotoneladas(kt), durante el período estudiado.

La Figura 13.A presenta el grupo de países con emisiones altas absolutas de metano, con un rango de emisiones entre 472,999.32 kt emitidas por Rusia en 1998 y 1,186,285.18 kt emitidas por China en 2020. Este grupo está compuesto por solo cuatro países: China, Estados Unidos, India y Rusia. China lidera el grupo, contribuyendo con el 34.00% de las emisiones, seguida por Estados Unidos con el 24.02%, India en tercer lugar con un 22.21% y Rusia en cuarto lugar con un aporte cercano al de India, alcanzando el 19.74%. Estos cuatro países son los principales emisores globales de este GEI. China, además de liderar el grupo muestra una tendencia ascendente en sus emisiones durante todo el periodo, desde 1990 hasta 2020, registrando el mayor incremento de los países del grupo, con un 45.20%, mientras que India, a pesar de ocupar el tercer lugar en contribuciones dentro del grupo, ocupa el segundo lugar en incremento de emisiones, con un 28%. La posición de China como líder global en estas emisiones se explica principalmente por su sector energético, ya que es el mayor productor y consumidor de carbón en el mundo, las actividades mineras de carbón generan emisiones significativas de CH₄, como fugas de depósitos subterráneos, además la expansión de su agricultura y ganadería contribuyen a estas emisiones: China tiene las tercera mayores poblaciones de ganado a nivel mundial, particularmente vacas y cerdos, cuyas emisiones provienen de la fermentación entérica y la descomposición del estiércol, el cultivo de arroz también desempeña un papel relevante, además de su rápido crecimiento urbano e industrial, junto con el aumento del consumo energético, explica el acelerado incremento de sus emisiones. En el caso de India, las emisiones de CH₄ provienen principalmente del sector agrícola, ya que es uno de los mayores productores de arroz en el mundo, asimismo tiene las segundas mayores poblaciones de ganado, cuya digestión genera metano como subproducto, por otro lado, el sector energético también contribuye de manera significativa, al ser uno de los principales productores y consumidores de carbón, utilizado principalmente para la generación de energía. Estados Unidos por su parte ha mantenido una tendencia más estable, aunque registra un crecimiento importante del 11.36% en sus

emisiones durante el periodo de estudio, estos derivan principalmente de su gran sector energético, siendo el mayor productor de gas natural a nivel mundial, la mayor parte de este gas proviene de la fracturación hidráulica, que ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, este sector constituye la mayor fuente de emisiones de CH₄ en el país, aunque la ganadería y la gestión de residuos hacen contribuciones importantes. Finalmente, Rusia genera sus emisiones de CH₄ principalmente a partir de su industria energética, destacándose como uno de los mayores productores y exportadores de gas natural y petróleo en el mundo. La explotación de carbón, especialmente la ganadería y la agricultura por el cultivo de arroz, también contribuyen, aunque en menor medida. A pesar de su importante participación histórica, Rusia no solo no ha incrementado sus emisiones, sino que las ha reducido en un 3.17% durante el periodo analizado, esta reducción se debe en gran parte a la limitación de sus exportaciones de gas natural a Europa, que era su mercado principal. Esta situación causada por el contexto político actual ha reducido temporalmente su producción de gas natural y en consecuencia sus emisiones.

La Figura 13.B presenta el grupo de emisiones medias de CH₄ totales globales, compuesto por nueve países, con un rango de emisiones que va desde las 280,038.51 kt emitidas por Indonesia en 1990 hasta las 449,213 kt emitidas por Brasil en 2020. Brasil lidera este grupo con una contribución del 21.96% de las emisiones totales que provienen principalmente del sector agropecuario, especialmente de su gran población de ganado bovino siendo de los mayores productores mundiales de carne de res, este sector es la principal fuente de emisiones de metano en el país. Brasil experimentó un incremento de sus emisiones del 46.56% durante el período, en gran parte debido al crecimiento significativo de su sector ganadero en las últimas décadas. En segundo lugar, se encuentra Indonesia con una contribución del 18.55% en las emisiones del grupo, este país es uno de los mayores productores de arroz en el mundo, lo que genera emisiones de CH₄, además de la ganadería, aunque en menor medida en comparación con Brasil, Indonesia registró un aumento de sus emisiones del 18.06% durante el período. El tercer lugar lo ocupa Venezuela, con una contribución del 12.53%, las principales emisiones de CH₄ en Venezuela provienen de su sector energético, dado que su economía depende en gran medida de los hidrocarburos, sin embargo, Venezuela es el país del grupo que más redujo sus emisiones durante el período, con una disminución del 45.43%. Esta gran reducción está relacionada principalmente con las crisis económicas, la disminución de la actividad industrial y energética, lo que ha resultado en una drástica caída en la producción de petróleo y gas natural que ha generado

la reducción de sus emisiones. Otros países destacados en este grupo son Irán, que ocupa el cuarto lugar con una contribución del 8.89%, Australia en el quinto lugar con una contribución del 8.59%, Nigeria en el lugar 6 contribuyendo el 8.36%, México en el octavo lugar con una contribución del 7.22%, y Pakistán en el noveno lugar. con una contribución del 6.64%. Irán, Nigeria, México contribuyen a estas emisiones principalmente debido a su sector energético. Irán es uno de los mayores productores de gas natural y petróleo en el mundo, Nigeria de los mayores productores de estos hidrocarburos en África, mientras que México es productor y consumidor de estos recursos, y las emisiones de CH₄ provienen de la extracción, transporte y procesamiento de gas natural. En Pakistán, las emisiones se derivan principalmente de su sector agrícola, ya que el país es un importante productor mundial de arroz. Por último, Australia genera sus emisiones de CH₄ principalmente de su sector agropecuario, destacándose la ganadería como el principal contribuyente, el sector energético como productor y exportador de petróleo, también tiene una participación en las emisiones del país.

En la Figura 13.C se muestra el agrupamiento de los países con las más bajas emisiones globales totales de CH₄. Este grupo está compuesto por 95 países lo que lo convierte en el más grande de todos. Las emisiones dentro de este grupo varían desde las 144.81 kt emitidas por Bahamas en 1990 hasta las 146,450.68 kt emitidas por Turkmenistán en 2019, estos dos países ocupan el lugar más bajo y más alto dentro del grupo, destacándose Turkmenistán como líder con una contribución del 3.88% derivado de su industria del gas natural, siendo uno de los principales productores de este recurso, lo que representa una fuente significativa de sus emisiones de metano, además es el país que en términos de emisiones per cápita de este GEI, lidera el ranking mundial, por otro lado, Bahamas tiene la contribución más baja del grupo con apenas un 0.007%. Al ser el grupo más grande, las contribuciones de los países individuales son relativamente pequeñas. Este grupo es representativo de países de todas las regiones del mundo, lo que evidencia una gran diversidad en las fuentes de emisiones de metano. En el continente americano destacando países como Canadá, que ocupa el segundo lugar con una contribución del 3.56% a las emisiones del grupo relacionadas con su sector energético, particularmente con la extracción, producción y transporte de gas natural y petróleo, a pesar de estar en el grupo de las emisiones más bajas, Canadá sigue siendo un importante emisor dentro de este grupo a consecuencia de su actividad en este sector. Otros países de América Latina incluyen Chile, en el lugar 58, con un aporte del 0.47%, Perú en el lugar 35, con una contribución del 1.06%, y Colombia en el lugar 11, con un 2.72%. Todos los

países africanos considerados en este estudio se encuentran en este grupo a excepción de Nigeria, que participa en el grupo de emisiones medias, sin embargo, la mayoría de los países africanos tienen una menor actividad industrial y de extracción de recursos fósiles, lo que contribuye a su baja emisión de metano en comparación con otras regiones. Europa se pinta de verde con todos sus países en este grupo, sin embargo, varios de ellos ocupan posiciones intermedias o altas dentro de este grupo, como Alemania, en el lugar 8, con una contribución del 2.79% derivado en parte por la explotación de carbón, Francia en el lugar 9, con un 2.76%, Italia en el lugar 19, con un 1.95%, y España en el lugar 23, con un 1.55%. En esta región ha favorecido la implementación de regulaciones políticas ambientales estrictas para reducir emisiones de CH₄, lo que justifica sus posiciones en este grupo, sin embargo, a pesar de su bajo nivel de emisiones de CH₄ en comparación con otras regiones, siguen siendo grandes economías industriales, lo que explica su posición relativamente alta dentro del grupo. En Asia, la distribución de emisiones también es variada, con una mezcla de países en posiciones intermedias y bajas dentro del grupo, Turkmenistán encabezando el grupo, Japón en el lugar 29, con una contribución del 1.30%, Mongolia en el lugar 60, con un 0.46%, Kazajistán en el lugar 15, con una contribución del 2.13%, y Afganistán en el lugar 57, con un 0.48%. En Países como Mongolia y Afganistán las emisiones son menores debido a la menor densidad de ganadería y agricultura, Japón es una economía industrial avanzada con un sector energético desarrollado, no obstante, su contribución a las emisiones globales de metano es moderada lo que se debe a su capacidad para implementar tecnologías avanzadas para reducir las fugas de gas.

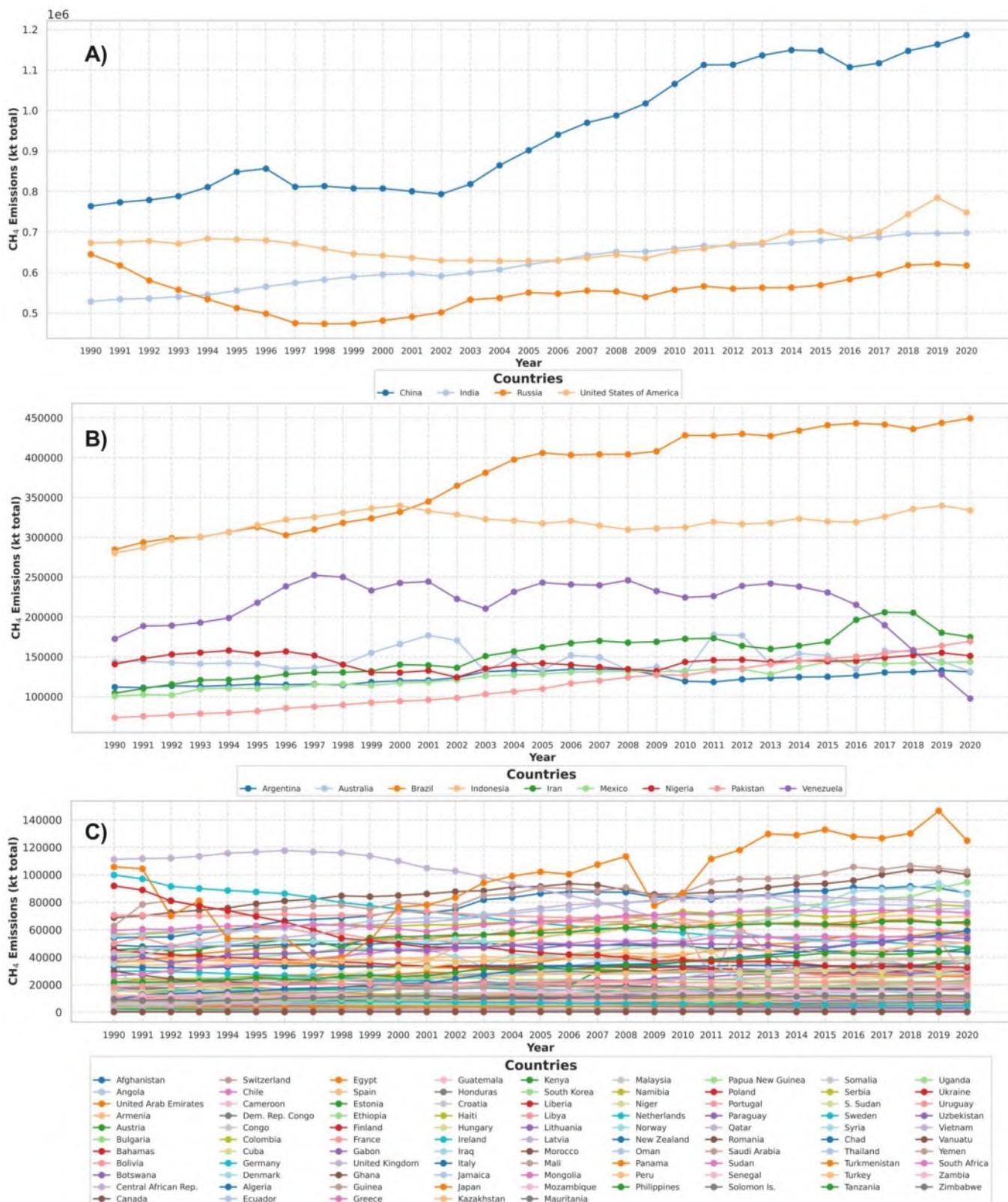


Figura 4.10 Emisiones globales totales de CH₄ en kt; **A** Grupo de emisiones altas, **B** Grupo de emisiones medias, **C** Grupo de emisiones bajas.

4.2.2.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales totales de CH₄

En la Figura 14, describe el comportamiento de la tendencia de las trayectorias promedios que siguen cada uno de los grupos de emisiones totales de CH₄ en kt. Los tres clústeres se diferencian por colores: el Clúster 1 representa las emisiones altas con una línea roja, el Clúster 0 representa las emisiones medias con una línea azul y el Clúster 2 representa las emisiones bajas con una línea verde.

El Clúster 1, CH₄ total, refleja la tendencia promedio del grupo de países con las emisiones más altas, representando el 3.84% de los países considerados en este estudio. La tendencia general de este grupo muestra un comportamiento ascendente con periodos de estabilización. Estos periodos de estabilización se deben al comportamiento en las tendencias individuales de Rusia quien además de no incrementar sus emisiones las redujo y Estados Unidos que mantiene una trayectoria más estable, logrando neutralizar la tendencia de crecimiento continuo de India y, principalmente de China, siendo los cuatro países que conforman este grupo. Durante los 30 años del estudio, el grupo registró su punto más alto en 2019, con 3,265,126.89 kt de CH₄ y su punto más bajo en 2002 con 2,514,991.75 kt. Entre 1990 y 1996 se observa un periodo de estabilización con una ligera caída en 1993, durante este tiempo el grupo acumuló 18,109,289.56 kt, con un promedio anual por país de 646,760.34 kt y una reducción del 0.37%, lo que indica una estabilidad notable en las emisiones. En 1997 hubo un decremento del 2.61% respecto al año anterior, seguido de otro periodo de estabilización entre 1997 y 2002, en este intervalo, las emisiones anuales promedio por país fueron de 630,860.91 kt, y la reducción total fue del 0.65%, representando un periodo con las emisiones más bajas del estudio. A partir de 2002 el grupo presenta una tendencia de ascenso constante que se mantuvo hasta 2020, con una única caída en 2016 cuando las emisiones se redujeron un 1.24% respecto a 2015, tras esta breve disminución las emisiones volvieron a crecer hasta el final del periodo analizado. El balance general el comportamiento de este grupo, generó un incremento de las emisiones de 22.29% durante los 30 años del estudio. En total este grupo generó 86,644,298.21 kt de CH₄ entre 1990 y 2020, contribuyendo con un 40.11% a las emisiones globales totales de CH₄, el promedio de emisiones generadas por país durante este periodo fue de 21,610,574.55 kt, mientras que el promedio anual por país se situó en 720,352.48 kt. Las principales fuentes de emisiones en estos países, como los mayores emisores de CH₄ a nivel mundial, están relacionadas con las grandes industrias energéticas en China, Estados Unidos y Rusia, y con el sector agropecuario en India.

El Clúster o, CH₄ total, presenta la trayectoria promedio del grupo de países con las emisiones medias y abarca el 8.33% de los países considerados en el estudio. A lo largo del periodo analizado, muestra una tendencia de crecimiento lento con fluctuaciones leves, incluyendo pequeñas caídas y periodos de estabilización. Entre 1990 y 2001 se registró un crecimiento continuo cada año en las emisiones, siendo este el periodo con las menores emisiones generadas por el grupo en los 30 años de análisis, durante este lapso el grupo acumuló 18,847,966.00 kt de CH₄, con un promedio anual de 174,518.204 kt y un crecimiento total de 19.07%. Su punto más bajo se alcanzó en 1990, cuando las emisiones totales del grupo fueron de 1,411,850.12 kt, y las emisiones promedio anuales por país se situaron en 156,872.23 kt. Posteriormente, entre 2002 y 2003, el grupo entró en un periodo de estabilización, con una ligera reducción del 0.80%. En 2004 las emisiones registraron un incremento del 4.30% respecto al año anterior, siendo este el mayor crecimiento registrado entre dos años durante todo el periodo de estudio. Entre 2004 y 2009 el grupo presento un segundo periodo de estabilización, acumulando 8,937,517.21 kt de CH₄, con emisiones promedio anuales por país de 193,057.48 kt y un incremento total de apenas 0.68%, lo que refleja una estabilidad considerable. De 2010 a 2017 las emisiones retomaron un crecimiento constante, con una única caída en 2013 cuando disminuyeron un 2.15% respecto a 2012, durante este periodo, las emisiones promedio anuales por país alcanzaron 206,028.22 kt, marcando la etapa de mayores emisiones generadas por el grupo, además en 2017 se registró el pico más alto, con un promedio anual de 210,547.041 kt por país, en total, el crecimiento acumulado entre 2010 y 2017 fue del 5.91%. En los últimos tres años del estudio, de 2018 a 2020, el grupo experimentó un declive en las emisiones, con una disminución acumulada del 6.079%, a pesar de las caídas en algunos años, el balance general del periodo refleja un crecimiento total del 23.79%. Este incremento se debe principalmente a las tendencias individuales de países como Pakistán, Brasil e Irán que mostraron aumentos significativos en sus emisiones, Pakistán lideró el crecimiento con un 84.87%, seguido por Brasil con un 46.56% e Irán con un 55.58%, siendo los países que registraron el mayor incremento en sus emisiones dentro de este grupo. Durante los 30 años de estudio, este grupo generó un total de 53,249,993.19 kt de CH₄, lo que representa el 24.71% de las emisiones globales totales de CH₄ y en comparación con 1990 las emisiones en 2020 crecieron un 26.12%, el promedio de emisiones por país durante este periodo fue de 5,916,665.91 kt, mientras que el promedio anual por país alcanzó los 197,222.19 kt. Las principales fuentes de emisiones de CH₄ en este grupo están relacionadas con la agricultura y el sector de los hidrocarburos, actividades económicas predominantes en los países que lo integran.

El Clúster 2, CH₄ total, presenta el comportamiento de las emisiones promedio del grupo de países con los niveles más bajos generadas de CH₄ total, representando el 87.96% de los países estudiados. Este grupo muestra una tendencia casi lineal con un ligero crecimiento y sin fluctuaciones significativas durante el periodo de estudio, su pico más bajo se registró en 1992 con 2,145,200.62 kt totales del grupo y un promedio anual de 22,843.13 kt por país, en contraste, su pico más alto se alcanzó en 2019 con 2,758,551.96 kt totales y un promedio anual de 29,037.38 kt por país. La tendencia de este grupo refleja un crecimiento constante casi todos los años del periodo estudiado, excepto en tres ocasiones que marcaron las caídas más representativas: la primera en 1992 con una reducción del 1.77% respecto a 1991; la segunda en 2009 con una disminución del 2.17% respecto a 2008; y la tercera en 2020 con una caída del 2.049% en comparación con 2019, además se registraron otras caídas menores significativas, inferiores al 0.5%. En total las emisiones generadas por este grupo a lo largo de los 30 años alcanzaron las 75,807,047.60 kt, representando el 35.17% de las emisiones globales totales de CH₄. El promedio de emisiones generadas por país durante este periodo fue de 797,968.92 kt, mientras que el promedio anual por país fue de 26,598.96 kt. En términos de crecimiento, las emisiones del grupo incrementaron en un 22.19% durante el periodo analizado, y el aumento entre 2020 con respecto a 1990 fue del 24.51%. Al ser el grupo más grande en relación con países que lo integran, con 95 de los 108 países estudiados, las aportaciones individuales de cada país son bajas y con diferencias pequeñas. Esto contribuye a una tendencia más estable, amortiguando las variaciones individuales en las tendencias de cada país.

El análisis de las emisiones anuales por país en cada grupo refleja una clara desigualdad en las contribuciones a las emisiones globales totales de CH₄, influida por la cantidad de países en cada grupo y las actividades económicas predominantes. El grupo de emisiones altas, aunque está compuesto únicamente por cuatro países, genera el 40.11% de las emisiones globales de CH₄, con un promedio anual por país de 720,352.48 kt. Las grandes industrias energéticas y el sector agropecuario son las principales fuentes responsables de estas cifras. Por su parte, el grupo de emisiones medias contribuye con el 24.71% de las emisiones globales, con un promedio anual por país de 197,222.19 kt, este grupo presenta un balance entre actividades agrícolas y energéticas como fuentes de emisiones, finalmente el grupo de emisiones bajas, que agrupa al 87.96% de los países estudiados, aporta el 35.17% de las emisiones globales, pero con un promedio anual por país mucho menor, de solo 26,598.96 kt, su tamaño y las menores diferencias individuales entre países estabilizan su tendencia.

Por otro lado un país del grupo de emisiones altas genera en promedio, 27 veces más emisiones anuales que un país del grupo de emisiones bajas (720,352.48 kt frente a 26,598.96 kt), comparado con un país del grupo de emisiones medias, un país del grupo de emisiones altas emite aproximadamente 3.65 veces más (720,352.48 kt frente a 197,222.19 kt), finalmente un país del grupo de emisiones medias genera 7.41 veces más emisiones anuales que uno del grupo de emisiones bajas (197,222.19 kt frente a 26,598.96 kt). El grupo de emisiones altas no solo es el principal contribuyente a las emisiones globales, sino que también refleja la influencia de economías y sectores altamente industrializados, como en China, Estados Unidos y Rusia. En contraste, los países del grupo de emisiones bajas, aunque numerosos, tienen una influencia relativamente menor debido a su menor nivel de industrialización o menor dependencia de actividades intensivas en emisiones.

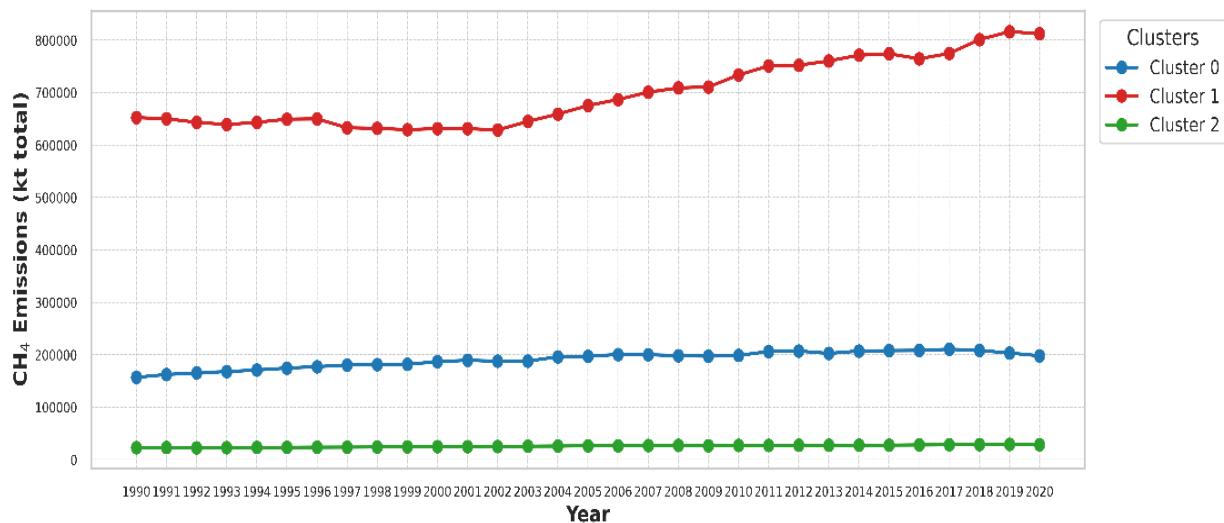


Figura 4.11 Trayectoria promedio por grupo de las emisiones globales totales de CH₄ en kt.

4.2.2.3 Segmentación global de emisiones totales de CH₄

La Figura 15 presenta la segmentación de los países del mundo según sus emisiones totales de CH₄. En el mapa se muestra una representación esquemática de la distribución de países por regiones o continentes, agrupados en tres clústeres diferenciados por colores: los países con emisiones altas, pintados en rojo, corresponden al Clúster 1; aquellos con emisiones medias, en azul, forman el Cluster 0; y los países con emisiones bajas, en verde, integran el Clúster 2. Esta clasificación permite visualizar el comportamiento global de las emisiones globales totales de CH₄,

En América se refleja la participación de los países en los tres grupos de emisiones, altas, medias y bajas. Destaca Estados Unidos por ser el único país de este continente en el grupo de emisiones altas, quien además ocupa el segundo lugar a nivel global de esta emisiones, generando durante todo el periodo de estudio 20,771,297 kt, contribuyendo en las emisiones globales totales de CH₄ con un 9.67%, esto se debe principalmente a sus gran industria energética, especialmente por la extracción, procesamiento y distribución de gas natural obtenido por fracturación hidráulica, otros sectores que también contribuyen en menor medida son la ganadería y la gestión de residuos. En el grupo de emisiones medias participan Brasil en el lugar 5 a nivel global quien generó 11,694,947.05 kt, con esto contribuye en las emisiones globales con el 7.91% la principal fuente de generación de CH₄ en Brasil es su sector agropecuario teniendo las mayores poblaciones de ganado bovino en el mundo, en otros países que también participan en el grupo de emisiones medias se encuentra México con 3,876,629.91 kt de metano generadas, el lugar 11 a nivel global y contribuyendo con 1.79%, Argentina en el lugar 12, generó 3,815,357 kt contribuye con 1.77% y Venezuela en el lugar 7 generó 6,674,910.81 kt contribuye con 3.09%. En el caso de Venezuela estas emisiones se originan de su sector energético, particularmente de los hidrocarburos que es la base de la economía de este país. México como consumidor y productor de petróleo y gas natural también generan sus principales emisiones de CH₄ de este sector, pero además tiene contribuciones del sector ganadero, mientras que Argentina genera el sector que mayormente contribuye en la generación de sus emisiones es la ganadería y en menor medida su sector energético. Entre los países de esta región que participan en el grupo de emisiones bajas se encuentran Canadá en el lugar 15 a nivel mundial con una contribución del 1.22%, genero durante todo el periodo de estudio 2,703,274.54 kt, sus emisiones son originadas mayormente de su sector energético y en menor medida de su sector ganadero, aunque se encuentra en el grupo de emisiones medias tiene un lugar importante en el ranking global lo que refleja que sigue siendo un importante emisor global de CH₄. Colombia en el lugar 24 genero 2,064,210.68kt con el 0.95%, y Chile en el lugar 71 genero 359,833.85kt 0.16% ocupando los puestos intermedios y últimos en ranking global con menores emisiones generadas.

Africa se pinta de verde con casi todos los países participado en el grupo de emisiones bajas, gracias a que los países de esta región tienen menor actividad en sectores como la industria y el sector de hidrocarburo, sin embargo destaca Nigeria como el único participante en el grupo de emisiones medias, ya que este país es uno de los principales productores de

petróleo crudo y gas natural, ocupando el lugar 10 a nivel global en emisiones absolutas de CH₄, con una contribución del 2.06% y generando durante el periodo 4,453,910.26 kt.

La unión europea destaca por su participación de todos sus países en el grupo de emisiones bajas ocupando posiciones intermedias altas en el ranking global de emisiones de CH₄. Algunos países representativos de la región son Alemania en el lugar 21 a nivel global quien generó 2,121,849.09 kt aportando 0.98%, seguido por Francia en el lugar 22 generando 2,097,529.12 con el 0.97%, Italia en el lugar 32 con 1,474,816.83 kt, participando con 0.68% y España en el lugar 36 con 1,175,987.17 kt contribuyendo con el 0.54%. Se evidencia que en esta región se ha promovido la implementación de estrictas regulaciones políticas ambientales para reducir las emisiones de CH₄, sin embargo, a pesar de su bajo nivel de emisiones en comparación con otras regiones, ocupan posiciones importantes en el ranking global, debido importante actividad en el sector industrial y en el caso de Alemania en la explotación de carbón.

Asia se distingue por tener una participación más proporcional de sus países en los tres grupos de emisiones, altas, medias y bajas. China destaca como líder mundial en la generación de emisiones de CH₄, con 29,398,255.03 kt generadas, contribuye con el 13.64% en las emisiones globales de este GEI, derivado de su gran industria energética, principalmente como el mayor productor y consumidor de carbón en el mundo, además de otros sectores que también contribuyen en las emisiones como la agricultura y la ganadería. En tercer lugar, en el ranking global se encuentra India, produciendo 19,206,752.68 kt y contribuyendo en las emisiones totales 8.91%, en este país sus emisiones provienen principalmente del sector agropecuario y en menor medida del sector energético. Rusia en cuarto lugar contribuye con el 7.91%, quien generó en este periodo 17,065,992.96 kt derivadas principalmente de su gran industria energética como uno de los mayores productores y exportadores de petróleo y gas natural en el mundo. Estos tres países juntos generan el 30.46% de todas las emisiones globales totales de CH₄, casi una tercera parte de todas las emisiones mundiales de CH₄. Entre los países de esta región que participa en el grupo de emisiones medias destaca Irán en el lugar 8, generando 4,737,938.50 kt aportando el 2.19%, Pakistán en el lugar 13, con 3,539,198.02 kt, contribuyendo 1.64%, y Australia en el lugar 9, con 4,576,671.96 kt aportando el 2.12% en las emisiones globales totales de CH₄. En el caso de Irán sus emisiones derivan del sector energético mientras que en Australia y Pakistán su principal fuente de emisiones de este GEI es la ganadería y la agricultura respectivamente. Algunos países que participan en el grupo de emisiones bajas son,

Turkmenistán, Japón, Mongolia y Afganistán en el lugar 14, 29, 60 y 70 respectivamente, a pesar de estar en el grupo de emisiones bajas Turkmenistán destaca por tener un lugar alto en el ranking global, como un importante productor mundial de gas natural, sector del que derivan principalmente sus emisiones. Además, es el país que en términos de emisiones per cápita de este GEI, lidera el ranking global.

Las emisiones globales totales de los 108 países que integran los tres grupos (emisiones altas, medias y bajas) ascienden a 215,499,339.00 kt de CH₄ totales. Entre los tres principales gases de efecto invernadero (GEI) —N₂O, CH₄ y CO₂—, el CH₄ es el que registra las emisiones intermedias, este gas contribuye con el 19.65% de las emisiones totales de CH₄, N₂O y CO₂ combinados. A lo largo del período de estudio las emisiones de los 108 países mostraron un incremento del 22.43%, en contraste con la reducción global que se registró en términos per cápita del 25.15%. Lo anterior muestra una tendencia hacia el incremento en las emisiones globales de CH₄, causada primordialmente por el sector energético, agrícola y ganadero. En el sector energético estas emisiones están relacionadas principalmente por la extracción, producción y transporte del gas natural y petróleo, en el sector agrícola por los cultivos de arroz, por otro lado, en el sector ganadero, especialmente por la producción de ganado bovino.

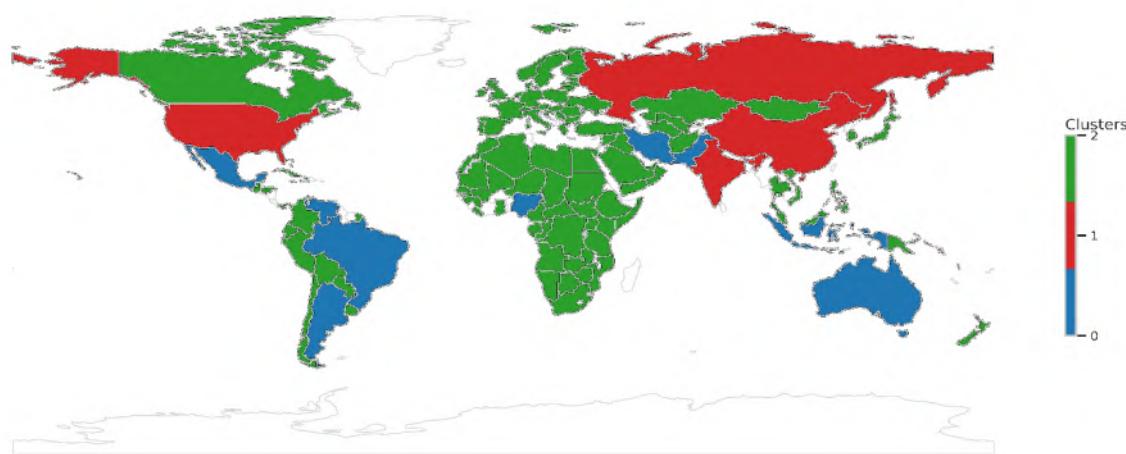


Figura 4.12 Mapa de las emisiones globales totales de CH₄ en kt por país.

4.3 EMISIONES DE CO₂ PER CÁPITA Y TOTALES

4.3.1 EMISIONES GLOBALES PER CÁPITA DE CO₂

4.3.1.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales per cápita altas, medias y bajas de CO₂.

La Figura 16. muestra los resultados del análisis de agrupamiento de los países en tres grupos relacionados con las emisiones globales per cápita de CO₂ en toneladas, durante un periodo de estudio (1990 a 2020).

La Figura 16.A, muestra el agrupamiento de países que generan las mayores emisiones globales per cápita de CO₂ en el mundo. Estas emisiones oscilan entre las 47.6 toneladas generadas por Qatar en 2004 y las 6.6 toneladas producidas por Omán en 1990. Integrado por siete países, Qatar lidera el grupo contribuyendo con el 27.35% de las emisiones, este país presenta una tendencia fluctuante durante el periodo estudiado, con un aumento significativo en las emisiones per cápita entre 1996 y 2007, y dos caídas notables en 2001 y 2009. La caída de 2001 se explica por el comportamiento casi estable de las emisiones totales que crecieron apenas un 0.95%, mientras la población aumentó un 5.09% entre 2000 al 2001, en tanto que en la segunda caída en 2009, las emisiones totales crecieron un 1.93%, mientras que la población aumentó un 11.49% entre 2008 al 2009, generando una reducción aún más pronunciada, después de 2012, las emisiones per cápita comenzaron a disminuir debido a que la población creció a un ritmo más acelerado que las emisiones totales, este comportamiento pone de manifiesto el importante papel de la densidad poblacional en las emisiones per cápita. Como uno de los mayores productores de petróleo y gas natural a nivel mundial, las emisiones de Qatar se derivan principalmente de la energía requerida para la quema, licuefacción y transporte del gas natural, así como de la generación de electricidad, basada casi exclusivamente en este combustible. Aunque el gas natural emite menos CO₂ que el carbón o el petróleo, sigue siendo una fuente significativa de emisiones, otros sectores que contribuyen son la industria petroquímica, la construcción masiva, el transporte y el alto consumo per cápita. En segundo lugar, Emiratos Árabes Unidos contribuye al grupo con el 14.74%, mostrando una tendencia decreciente en sus emisiones per cápita, que se redujeron un 31.70% durante los 30 años analizados, este descenso se debe al rápido crecimiento de su población que aumentó un 168.87% en el mismo periodo, las emisiones de los EAU provienen principalmente de la extracción, procesamiento y transporte de hidrocarburos,

aunque el país está invirtiendo en energías renovables, la mayor parte de su electricidad todavía se genera a partir de gas natural, otros factores importantes incluyen el transporte, la urbanización acelerada y la construcción de infraestructuras. Estados Unidos ocupa el tercer lugar, con una contribución del 12.82%, este país ha registrado una disminución del 37.92% en sus emisiones per cápita, siendo la mayor reducción entre los países del grupo, sus principales fuentes de emisiones incluyen la quema de combustibles fósiles y procesos industriales, como la generación de electricidad a partir de carbón, gas natural y petróleo, aunque la dependencia del carbón ha disminuido, sigue siendo una fuente relevante, así como el transporte, impulsado por el uso de gasolina y diésel, y la industria debido al consumo energético, también son grandes contribuyentes, por su parte Australia ocupa el cuarto lugar, con una contribución del 12.06%, presenta altas emisiones per cápita debido a su baja población de aproximadamente 26 millones de habitantes, la mayor fuente de emisiones es el sector energético, dominado por el uso de carbón y gas natural, aunque la proporción de energías renovables ha crecido en años recientes, la minería, el transporte y la agricultura también generan emisiones significativas, así mismo Canadá con una contribución del 11.29%, junto a Arabia Saudita (9.52%) y Omán (9.17%), completa el grupo. Las emisiones de estos países provienen principalmente del sector de hidrocarburos, ya que son grandes productores de petróleo y gas natural. Los procesos de extracción, procesamiento y transporte de estos recursos demandan grandes cantidades de energía, contribuyendo significativamente a las emisiones de CO₂

La Figura 16.B presenta el grupo de países con emisiones medias de CO₂ per cápita, compuesto por 39 países, con un rango de emisiones entre 22.01 toneladas generadas por Estonia en 1990 y 1.91 toneladas generadas por China en el mismo año. China se encuentra en el puesto 35 cerca de los últimos lugares del grupo, con una contribución del 1.63%, esta posición se debe a su alta población que diluye sus emisiones totales al dividirlas entre sus habitantes, aunque en términos absolutos lidera las emisiones globales de CO₂, a pesar de ocupar una posición baja en este grupo, China ha registrado un incremento del 146.50% en sus emisiones per cápita, siendo el país con el mayor aumento dentro del periodo de estudio. Este grupo está encabezado por Estonia, contribuye con el 4.41% de las emisiones del grupo, su posición se explica por su pequeña población, de aproximadamente 1.3 millones de habitantes, y su dependencia del esquisto bituminoso como principal fuente de generación eléctrica, este mineral, único en el mundo por su uso en Estonia, es una roca sedimentaria que contiene kerógeno, una materia orgánica que al calentarse mediante pirolisis libera

líquidos y gases que pueden transformarse en combustibles como petróleo y gas. Sin embargo, la combustión de esquisto bituminoso genera más emisiones de CO₂ por unidad de energía que otros combustibles fósiles, lo que contribuye al impacto ambiental. A lo largo del periodo de estudio, Estonia ha reducido sus emisiones en un 105.06%, reflejo de sus esfuerzos por adoptar energías renovables y disminuir el uso de este mineral, mientras Kazajistán ocupa el segundo lugar en este grupo, con una contribución del 4.14%, sus emisiones provienen principalmente de los sectores energético e industrial, este país es un importante productor de combustibles fósiles como petróleo, gas natural y carbón que requieren altas cantidades de energía tanto para la extracción como para el procesamiento de estos recursos y la generación de su energía se basa en centrales termoeléctricas alimentadas por carbón. En el tercer puesto se encuentra Rusia con una contribución del 4.01%. las emisiones de este país provienen mayoritariamente de su sector energético, que depende del gas natural, el petróleo y el carbón, Rusia es uno de los mayores productores y exportadores de gas natural, petróleo y carbón, una gran parte de su energía se genera a partir de estos recursos, además el transporte y la industria también contribuyen de manera significativa. Durante los 30 años de estudio Rusia logró una reducción del 24.90% en sus emisiones, impulsada por factores como crisis económicas derivadas de sanciones internacionales, lo cual ha disminuido temporalmente sus emisiones, además ha habido una tendencia a usar más gas natural que genera menos emisiones de CO₂ por unidad de energía que el carbón. Otros países destacados en este grupo incluyen Alemania en el séptimo lugar con un 3.45% de contribución; Japón en el décimo lugar con un 3.22%; Irán en el puesto 26 con un 2.10%; y Venezuela en el lugar 32 con un 1.81%. Todos estos países generan sus principales emisiones de CO₂ en el sector energético. Alemania, aunque ha avanzado en el uso de energías renovables, todavía depende del carbón como una fuente importante, mientras que Irán y Venezuela emiten CO₂ principalmente por la quema de combustibles fósiles, debido a su condición de productores y exportadores de petróleo y gas, por su parte Japón, presenta emisiones asociadas a su alto grado de industrialización y dependencia de combustibles fósiles para generar energía.

La Figura 16.C presenta el grupo de países con las menores emisiones globales de CO₂ per cápita, compuesto por 62 países, el cual se integra por la mayor parte de países considerados para este estudio. Las emisiones en este grupo oscilan entre 5.71 toneladas generadas por Armenia en 1991 y 0.03 toneladas generadas por Uganda en 1994. Este grupo está encabezado por Croacia que contribuye con el 5.20%, seguido de México con el 4.76%,

Gabón con el 4.75%, Argentina con el 4.66% e Irak en quinto lugar con el 4.62%. Sin embargo, en términos de emisiones totales globales de CO₂, Croacia ocupa el puesto 64, México el 11, Gabón el 85, Argentina el 28 e Irak el 34, lo que refleja la importancia del tamaño de la población en el cálculo de emisiones per cápita, ya que Croacia y Gabón se encuentran entre los países con menores emisiones globales absolutas de CO₂. No obstante México ocupa un lugar destacado como emisor global, las emisiones de México provienen principalmente del sector energético, aunque el país ha incrementado la proporción de energías renovables en su matriz energética, sigue dependiendo en gran medida de combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón, la generación de electricidad mediante plantas termoeléctricas que queman estos combustibles constituye una parte significativa de las emisiones, además, el transporte y la industria son sectores importantes que también contribuyen, aunque el tamaño de la población de alrededor de 128 millones de habitantes, posiciona a México en un lugar bajo en términos de emisiones per cápita de CO₂. Entre los países destacados en este grupo también se encuentra Brasil en el puesto 17, con una contribución del 2.29%, sus emisiones provienen principalmente del cambio en el uso de la tierra y la deforestación, en la quema o tala de bosques para convertirlos en tierras agrícolas o ganaderas, liberando grandes cantidades de carbono almacenado en los árboles y el suelo. Aunque su matriz energética es relativamente limpia, Brasil utiliza plantas termoeléctricas que queman combustibles fósiles para generar electricidad, especialmente en épocas de sequía cuando se reduce la capacidad de las hidroeléctricas, por su parte, India ocupa el lugar 28 aportando el 1.46%, como el país más poblado del mundo, su posición en este grupo se explica por el rápido crecimiento de su población, que diluye las emisiones totales de CO₂, a pesar de ello durante los 30 años del periodo estudiado, sus emisiones per cápita aumentaron un 92.28% y en términos de emisiones totales globales; India es uno de los principales emisores globales de CO₂ ocupando el cuarto lugar mundial, esto se debe principalmente a su sector energético, siendo de los mayores consumidores de carbón en el mundo, otros sectores emisores importantes incluyen la industria, el transporte, los edificios y el uso residencial. Un país destacado en este grupo es Malí, que ocupa el puesto 54 con una contribución del 0.14%. A pesar de que a nivel global se sitúa en el lugar 99 en cuanto a emisiones totales de CO₂, es el país del grupo que registró el mayor incremento, con un 146.43%. Este aumento se debe principalmente al uso de biomasa tradicional, ya que una gran parte de su población depende de la leña y el carbón vegetal para cocinar y calentar sus hogares.

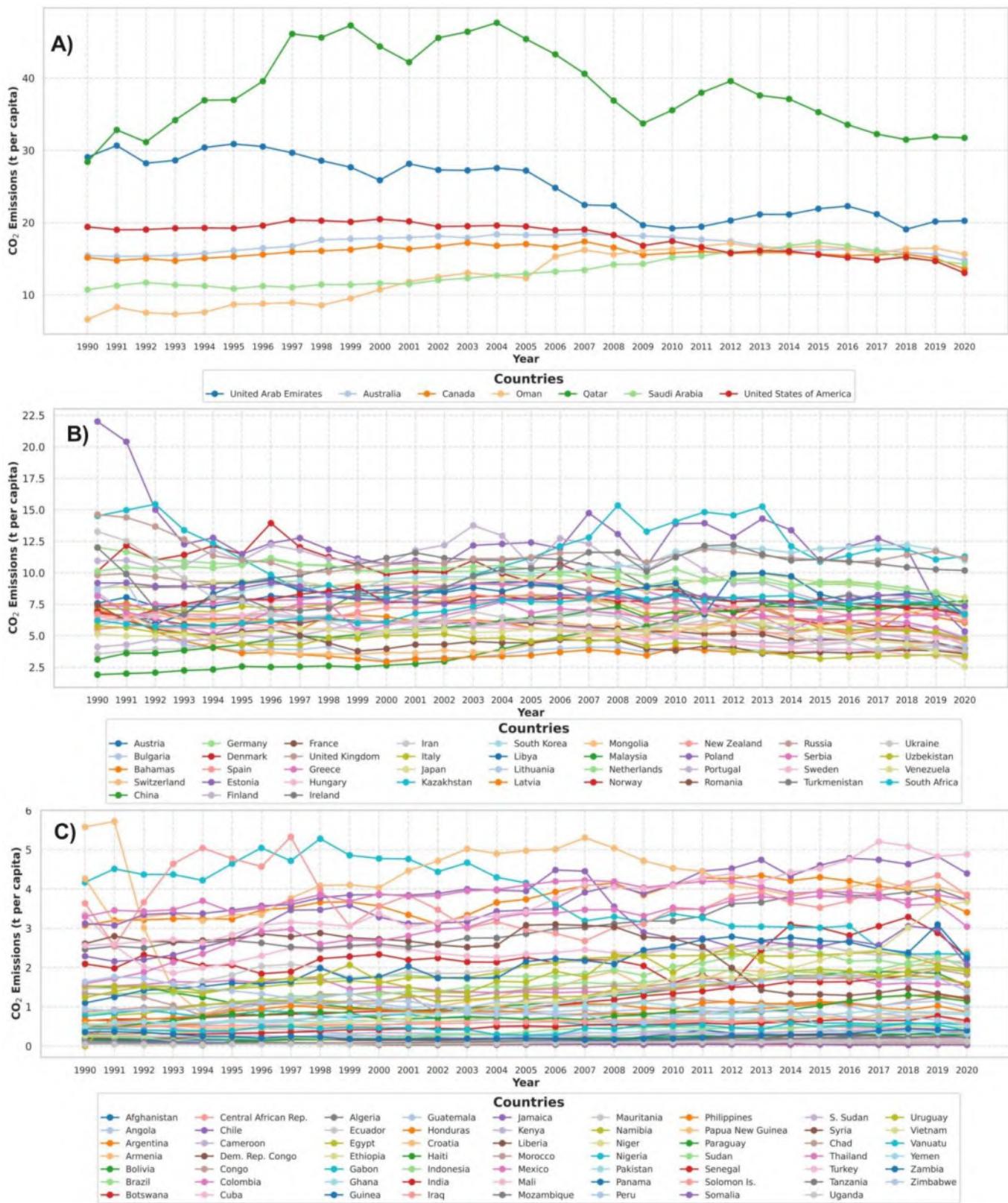


Figura 4.13 Emisiones globales per cápita de CO₂ en tm; **A** Grupo de emisiones altas, **B** Grupo de emisiones medias, **C** Grupo de emisiones bajas.

4.3.1.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales per cápita de CO₂

La Figura 17 describe la tendencia promedio de las trayectorias seguidas por cada grupo de emisiones de CO₂ per cápita en toneladas. Los tres clústeres se diferencian por colores: el Clúster 0 representa las emisiones altas con una línea roja, el Clúster 2 representa las emisiones medias con una línea azul y el Clúster 1 representa las emisiones bajas con una línea verde.

El Cluster 0, CO₂ per cápita, refleja el comportamiento de las emisiones promedio del grupo con los niveles más altos, integrado por el 6.73% de los países considerados en este estudio. Durante el periodo analizado, este grupo mostró una tendencia caracterizada por fluctuaciones y descensos sin picos pronunciados, aunque las emisiones fluctuaron no se registraron incrementos ni caídas abruptas y el balance general indicó una notable estabilidad en las emisiones. La trayectoria de las emisiones en este grupo se divide en dos periodos marcados durante los 30 años, influenciados principalmente por el comportamiento en las tendencias individuales de Qatar y Emiratos Árabes Unidos, los mayores contribuyentes del grupo. El primer periodo de 1990 a 2010, comienza con un crecimiento de emisiones del 5.89% en 1991 respecto a 1990, continuando en ascenso hasta alcanzar el punto máximo en 2004, cuando las emisiones del grupo fueron de 153.59 toneladas y el promedio anual por persona llegó a 21.94 toneladas, a partir de 2005 se registra una disminución del 1.71% en comparación con 2004, tendencia que se mantiene hasta 2009, año en el que las emisiones del grupo fueron de 134.27 toneladas, con un promedio anual por persona de 19.18 toneladas, durante este periodo el grupo acumuló 2,861.74 toneladas, con un promedio anual por persona de 20.44 toneladas y un crecimiento acumulado del 8.16%. El segundo periodo de 2010 a 2020, comienza con un incremento del 2.53% en 2010 respecto a 2009, alcanzando su punto máximo en 2012 con emisiones de 141.89 toneladas y un promedio por persona de 20.27 toneladas, desde 2013 las emisiones decrecieron un 1.34% en comparación con 2012, continuando en descenso hasta 2020, este año también se registró el mayor descenso en las emisiones, con una reducción del 4.06% en comparación con el año anterior, alcanzando además el nivel más bajo de todo el periodo de estudio, con 123.28 toneladas y un promedio anual por persona de 17.61 toneladas, durante este periodo se acumularon 1,485.57 toneladas, con un promedio anual por persona de 19.29 toneladas y una disminución acumulada del 8.29%, equivalente al incremento registrado en el primer periodo. En términos generales las emisiones del grupo durante los 30 años mostraron un decremento marginal del 0.12%, reflejando una estabilidad

significativa, y el grupo generó 4,347.32 toneladas per cápita de CO₂ durante todo el periodo de estudio, contribuyendo con el 27.74% a las emisiones totales globales per cápita en tanto las emisiones por persona durante los 30 años fueron de 621.04 toneladas, con un promedio anual por persona de 20.70 toneladas. Las emisiones de los países de este grupo están estrechamente vinculadas a sus sectores energéticos, tanto en la generación de electricidad como en la intensa demanda de energía necesaria para la extracción, procesamiento y distribución de petróleo y gas natural. Entre los principales integrantes de este grupo se encuentran Qatar, Turkmenistán, Estados Unidos, Arabia Saudita y Canadá, todos ellos destacados productores y exportadores de estos recursos.

El clúster 2, CO₂ per cápita, revela la tendencia promedio del grupo de países con emisiones medias y representa el 36.11% de los países considerados en este estudio. Su trayectoria presenta un comportamiento decreciente con ligeras fluctuaciones y periodos cortos de estabilización, destacándose dos periodos relevantes: el primero entre 1990 al 2009, y el segundo de 2010 a 2020. En el primer periodo entre 1990 y 1993, se observa una tendencia decreciente con una reducción del 11.66% en las emisiones, durante este tiempo el grupo acumuló 1,208.59 toneladas, con un promedio anual por persona de 7.74 toneladas, alcanzando su pico máximo en 1990 con 8.16 toneladas promedio anuales por persona. A partir de 1994 y hasta 2009 el grupo experimentó un periodo de estabilización, con un decremento en las emisiones del 0.15%, reflejando una notable estabilidad a pesar de pequeñas variaciones entre esos años. El segundo periodo entre 2010 y 2020, comienza con un incremento del 5.10% en las emisiones de 2010 respecto al año anterior, a partir de 2011 se registra una tendencia decreciente que se mantiene hasta 2020, durante este periodo el grupo acumuló 2,999.46 toneladas, con un promedio anual por persona de 6.99 toneladas y una disminución total del 22.00%. En 2020 se alcanzó el nivel más bajo de emisiones, con un promedio anual de 6.03 toneladas por persona, y también se registró la menor reducción de emisiones entre dos años en todo el periodo analizado, con un descenso del 8.025%. En total las emisiones generadas por el grupo durante los 30 años de estudio alcanzaron 8,840.81 toneladas de CO₂ per cápita, representando el 56.42% de las emisiones globales totales per cápita de CO₂, mientras que las emisiones acumuladas por persona durante todo el periodo fueron de 226.68 toneladas, con un promedio anual por persona de 7.55 toneladas, además la reducción total de las emisiones fue del 28.71% durante el periodo de estudio y una disminución del 26.09% en 2020 respecto a 1990. Esta reducción se debe principalmente a las reducciones individuales registradas en la mayoría de los países de este

grupo, debido a crisis económicas, sanciones internacionales e incremento de su población, ya que países como China y Rusia son líderes globales en emisiones totales de CO₂. Las principales emisiones en estos países provienen del sector energético, especialmente de la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad, asimismo el grupo incluye importantes productores y exportadores de estos recursos, como China, Rusia, Kazajistán, Alemania, Irán y Venezuela, estas actividades económicas contribuyen significativamente a las emisiones de CO₂. Otros sectores que también contribuyen en las emisiones de este grupo son el transporte y la Industria como sucede en la mayoría de los países.

El clúster 1, CO₂ per cápita, presenta la trayectoria promedio del grupo de países con las emisiones más bajas y está integrado por el 57,40% de los países estudiados, muestra una tendencia casi lineal ascendente en las emisiones promedio, con períodos alternados de aumentos y disminuciones. Este grupo alcanzó su pico máximo en 2019 con 1.43 toneladas promedio anuales por persona, y su punto más bajo en 1993 con 1,09 toneladas promedio anuales por persona. Entre 1990 y 1994 se observó una disminución anual acumulando un decremento del 2.64%, cuando el grupo registró 343,15 toneladas totales y emisiones promedio de 1.38 toneladas por persona, posteriormente entre 1995 y 2015, se generó una tendencia creciente con un aumento acumulado del 28.98%, alcanzando un total de 1.688,17 toneladas y un promedio anual por persona de 1.29 toneladas, durante este periodo se presentaron dos caídas puntuales: una del 2.03% en 1999 respecto a 1998 y otra del 1.48% en 2009 respecto al año anterior. Entre 2016 y 2017 las reducciones fueron mínimas, inferiores al 0.3%, sin embargo, entre 2018 y 2019 se registró una recuperación con un aumento del 2.90%. Finalmente, entre 2019 y 2020 se observó el mayor descenso entre dos años durante todo el periodo, con una disminución del 9.021%. En total las emisiones de este grupo alcanzaron 2.479 toneladas per cápita de CO₂, representando el 15.82% de las emisiones globales totales de CO₂ per cápita, el promedio acumulado por persona a lo largo del periodo fue de 39.99 toneladas, con un promedio anual de 1.33 toneladas por persona. A diferencia de los grupos con emisiones altas y medias que presentaron reducciones, este clúster registró un incremento total del 19.95% en las emisiones durante todo el periodo de estudio, y del 20.89% al comparar 2020 con 1990. Este aumento se debe a que, en la mayoría de los países de este grupo, las emisiones de CO₂ crecieron más rápidamente que la población. Casos destacados son Malí donde la población creció un 87.69% mientras sus emisiones totales aumentaron un 238%, e India donde la población creció un 47.65% y las emisiones se incrementaron un 141.47% durante el mismo periodo.

En análisis de los tres grupos presentan diferencias notables en sus contribuciones a las emisiones globales per cápita de CO₂. El grupo de emisiones altas contribuye con el 27.74% del total global, con un promedio anual de 20.70 toneladas por persona, aunque experimentó una leve disminución del 0.12%, las emisiones per cápita de este grupo son sustancialmente más altas que las de los otros dos grupos, una persona en el grupo alto emite 2.74 veces más CO₂ anualmente que una persona del grupo medio y 15.56 veces más CO₂ que una persona del grupo bajo. Por otro lado, el grupo de emisiones medias contribuye con el 56.42% a las emisiones globales, con un promedio anual de 7.55 toneladas por persona, a pesar de haber experimentado una reducción significativa del 28.71%, este clúster de países contribuye con las mayores emisiones globales per cápita de CO₂, generadas principalmente por sus sectores energéticos, además una persona de este grupo emite 5.67 veces más CO₂ por año en comparación con una persona del grupo de emisiones bajas. Por otro lado, el grupo de emisiones bajas contribuye globalmente con el 15.82% a las emisiones per cápita de CO₂, registrando un aumento del 19.95% en las emisiones, debido principalmente a que las emisiones totales de CO₂ en la mayoría de los países de este grupo registraron un crecimiento más acelerado que el crecimiento de su población, como es el caso de India y Malí. Un factor determinante en los tres grupos es la mayor reducción de emisiones de CO₂ per cápita que registraron todos ellos entre 2019 y 2020 lo que resalta un punto clave en el análisis de las tendencias globales, este descenso no fue producto de cambios sostenibles a largo plazo, sino de factores excepcionales como la pandemia de la COVID-19. Durante ese periodo, los confinamientos globales, la reducción en la actividad industrial y la disminución del transporte contribuyeron de manera significativa a la caída temporal en las emisiones. En este contexto, las reducciones de 2020 evidencian cómo eventos globales inesperados pueden alterar temporalmente las emisiones, pero también resaltan la necesidad de políticas permanentes y medidas sostenibles para lograr una reducción real y duradera de las emisiones a nivel mundial.

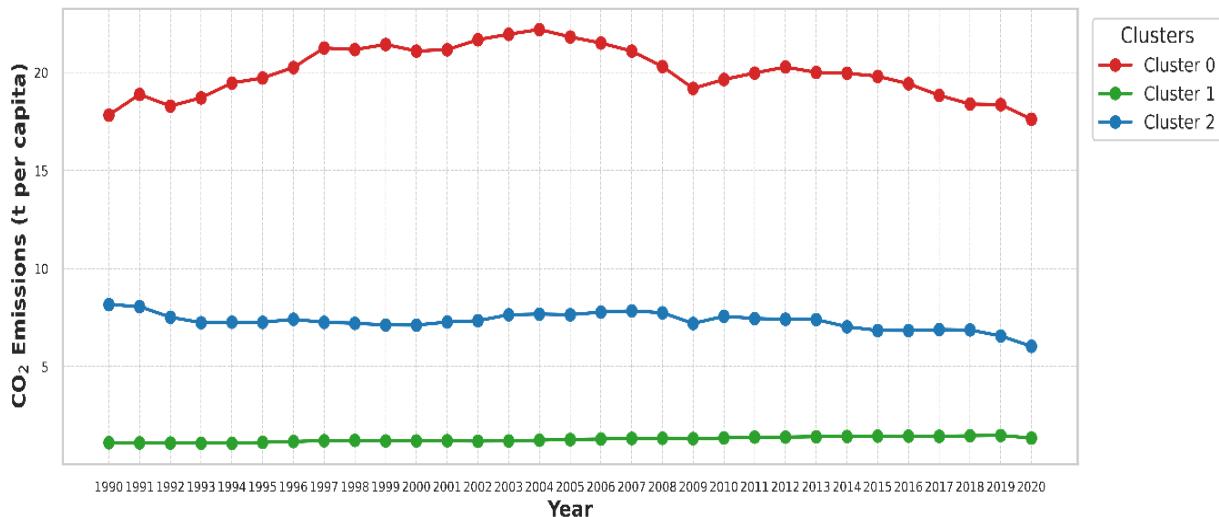


Figura 4.14 Trayectoria promedio por grupo de las emisiones globales per cápita de CO₂ en tm.

4.3.1.3 Segmentación global de emisiones per cápita de CO₂

La Figura 18 muestra la segmentación de los países del mundo según sus emisiones per cápita de CO₂ en toneladas, representando gráficamente tres grupos diferenciados por colores: los países con emisiones altas, en color rojo, forman el Clúster 0; aquellos con emisiones medias, en azul, integran el Clúster 2; y los países con emisiones bajas, en verde, correspondiente al Clúster 1. Este mapa facilita la comprensión del comportamiento de las distintas regiones del mundo en cuanto a las emisiones de este gas de efecto invernadero (GEI).

En el continente americano se observa la presencia de países en los tres grupos de emisiones: altas, medias y bajas. En el grupo de emisiones altas destaca Estados Unidos, líder en emisiones per cápita de CO₂ en esta región y tercero en el ranking global, durante todo el período analizado, generó 557.57 toneladas por persona, lo que equivale a 18.58 toneladas anuales por persona, contribuyendo con el 3.55% a las emisiones globales. Le sigue Canadá, en el quinto lugar del ranking global, con 490 toneladas por persona en el período, representando 16.36 toneladas anuales por persona y contribuyendo con el 3.13% a las emisiones globales. Ambos países importantes productores mundiales de petróleo y gas natural, Estados Unidos como el primer productor y Canadá como el cuarto en petróleo, generan gran parte de sus emisiones en la extracción, procesamiento y distribución de estos recursos, así como en la quema de combustibles fósiles en sus sectores energéticos e

industriales, aunque han reducido notablemente la quema de carbón, este sigue siendo una fuente de emisiones significativa. Venezuela único país de esta región y de América Latina en el grupo de emisiones medias, ocupa el lugar 39 a nivel global en emisiones per cápita de CO₂, con un acumulado de 160.64 toneladas por persona equivalente a 5.35 toneladas anuales por persona, y una contribución del 1,02% a las emisiones globales, las principales fuentes de emisiones en Venezuela provienen de la generación de electricidad, especialmente de plantas termoeléctricas que utilizan gas natural y derivados del petróleo. Aunque el país depende principalmente de la energía hidroeléctrica, las termoeléctricas siguen siendo una fuente relevante de emisiones. Además, la industria del petróleo y el gas, junto con un sistema de transporte altamente dependiente de combustibles fósiles, contribuye significativamente al CO₂ emitido. En el grupo de emisiones bajas se encuentran países como México, Brasil y Argentina. México ocupa el lugar 48 con 3.39 toneladas anuales por persona y una contribución del 0.75%, mientras que Brasil está en el lugar 63 con 1.89 toneladas anuales por persona y una contribución del 0.36%. Argentina ocupa el lugar 50 con 3.83 toneladas anuales por persona, contribuyendo con el 0.73% a las emisiones globales per cápita de CO₂. Las emisiones de México y Argentina provienen principalmente del sector energético. Aunque México ha incrementado la proporción de energías renovables en su matriz energética, sigue dependiendo en gran medida de combustibles fósiles como petróleo, gas natural y carbón. Por su parte, Argentina genera energía principalmente a partir del gas natural. En Brasil, el cambio en el uso de la tierra y la deforestación son las principales fuentes de emisiones de CO₂, destacándose como un problema ambiental significativo.

África se caracteriza por una mayoría de países en el grupo de emisiones bajas, con las menores contribuciones globales y ocupando los últimos lugares en el ranking global de emisiones per cápita de CO₂. Esto se debe a una combinación de factores económicos, tecnológicos y demográficos. Muchos países africanos tienen economías en desarrollo con una infraestructura industrial limitada, lo que implica una menor dependencia de procesos industriales intensivos en emisiones de carbono, un consumo energético per cápita reducido debido a niveles relativamente bajos de acceso a la electricidad, y un transporte menos intensivo. Únicamente Libia y Sudáfrica se encuentran en el grupo de emisiones medias. Libia ocupa el lugar 19 en el ranking global, contribuyendo con el 1.64% a las emisiones globales per cápita de CO₂ y registrando emisiones anuales por persona de 8.6 toneladas, como productor de petróleo y gas natural, estas actividades que incluyen la extracción, transporte y refinación, son las principales fuentes de emisiones, además la generación de electricidad en Libia depende principalmente de plantas térmicas que utilizan combustibles

fósiles como el gas natural y el petróleo. Por su parte Sudáfrica ocupa el lugar 26, con una contribución del 1.40% y emisiones anuales por persona de 7.34 toneladas, sus emisiones provienen principalmente de la generación de electricidad basada en carbón, ya que aproximadamente el 80% de la electricidad del país se produce en plantas de energía a carbón, otro sector significativo es la industria minera, especialmente la extracción y procesamiento de metales como el platino, el oro y el carbón.

La Unión Europea se caracteriza por la presencia de todos sus países en el grupo de emisiones medias. Alemania ocupa el puesto 14 en el ranking global, con una contribución del 1.94% a las emisiones globales per cápita de CO₂ y un promedio de 10.18 toneladas anuales por persona, este país altamente industrializado, es uno de los mayores emisores de CO₂ en Europa, sus principales fuentes de emisión son su generación de energía eléctrica y térmica a partir de carbón lignito, un recurso altamente contaminante, a pesar de los esfuerzos por reducir su uso. Francia ocupa el lugar 36, con 5.74 toneladas anuales por persona y una contribución del 1.1%, mientras que Italia está en el lugar 27, con 7.09 toneladas anuales por persona y un 1.35%, y España se sitúa en el lugar 30, con 6.64 toneladas anuales y el 1.23% de las emisiones globales. En el caso de Francia, las principales fuentes de emisiones de CO₂ provienen del sector del transporte y la industria, con una menor contribución de la generación eléctrica gracias a su fuerte dependencia de la energía nuclear. Por su parte Italia y España emiten principalmente por el transporte y la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles, especialmente gas natural, sin embargo, ambos países han diversificado sus matrices energéticas, incorporando un porcentaje creciente de energías renovables.

En Asia predominan los países en el grupo de emisiones medias per cápita de CO₂, entre ellos China que ocupa el lugar 42 con 4.81 toneladas anuales por persona y Rusia en el lugar 10, con 11.82 toneladas anuales por persona. Aunque estas cifras los ha colocado en el grupo de emisiones medias per cápita de CO₂, en términos de emisiones globales totales son líderes mundiales de este GEI, especialmente China que ocupa el primer lugar global, debe su liderazgo al tamaño de su población, lo que diluye sus emisiones totales en términos per cápita. La mayor parte de sus emisiones proviene de la generación de electricidad a partir del carbón, y en menor medida, del uso de gas natural. Por su parte en Rusia las principales fuentes son su sector energético, especialmente el uso del gas natural seguido de la industria y el transporte. En el grupo de emisiones altas destaca Qatar en primer lugar como líder mundial en emisiones per cápita de CO₂ con 39.63 toneladas anuales por persona, como uno

de los mayores productores de petróleo y gas natural del mundo, sus emisiones derivan principalmente de la energía requerida para la quema, licuefacción y transporte de gas natural, así como de la generación de electricidad basada casi exclusivamente en este combustible. Le sigue Emiratos Árabes Unidos en segundo lugar con 25.75 toneladas anuales por persona, cuyas emisiones provienen principalmente de la extracción, procesamiento y transporte de hidrocarburos, aunque invierte en energías renovables, la mayor parte de su electricidad aún se genera con gas natural, otros factores que contribuyen son el transporte, la urbanización acelerada y la construcción de infraestructuras. Arabia Saudita en el sexto lugar con 13.79 toneladas anuales por persona, y Omán en el séptimo lugar con 12.8 toneladas, también destacan como grandes productores de petróleo y gas natural, con sus emisiones principalmente vinculadas al sector de hidrocarburos. Australia en el cuarto lugar con 17.48 toneladas anuales por persona, como importante productor y exportador de carbón a nivel mundial, genera la mayoría de sus emisiones a partir de la energía, debido a su fuerte dependencia del carbón para la generación de electricidad, otros sectores como el transporte y la industria, especialmente la minera que es clave en su economía, también tiene una contribución significativa. Con menor presencia de países en el grupo de emisiones bajas, destaca India en el lugar 74 con 1.17 toneladas anuales por persona, esto refleja cómo su población la más numerosa del mundo diluye las emisiones per cápita al igual que China, aunque en términos absolutos ocupan el cuarto lugar global. En India el sector energético es el principal responsable de las emisiones de CO₂, siendo uno de los mayores consumidores de carbón a nivel mundial. Otros países de la región en este grupo incluyen Turkmenistán, en el lugar 15 con 10.1 toneladas anuales por persona, Irak, en el lugar 51 con 3.82 toneladas, y Afganistán, en el lugar 97 con 0.17 toneladas anuales por persona.

Las emisiones totales de los 108 países que integran los tres grupos (emisiones altas, medias y bajas) ascienden a 15,667.79 toneladas de CO₂ per cápita. Entre los tres principales gases de efecto invernadero (GEI) —N₂O, CH₄ y CO₂—, el dióxido de carbono es el que registra las emisiones más altas en términos per cápita. Este gas contribuye con el 62.47% de las emisiones totales de N₂O, CH₄ y CO₂ combinados. A lo largo del período de estudio, las emisiones per cápita de los 108 países analizados mostraron una disminución del 13.65%, reflejando una tendencia general hacia la reducción de emisiones. Esta caída estuvo influenciada por eventos mundiales inesperados como la pandemia del COVID-19, que redujo temporalmente las emisiones globales de CO₂ y afectó de manera proporcional las emisiones per cápita de este gas, también contribuyeron crisis económicas en países como

Rusia y Venezuela, provocadas en parte por sanciones internacionales relacionadas con cuestiones normativas, y el incremento global de la población. En países como China, India y Malí, donde la población creció a un ritmo más acelerado que las emisiones de CO₂, este crecimiento también contribuyó a la dilución de las emisiones per cápita.

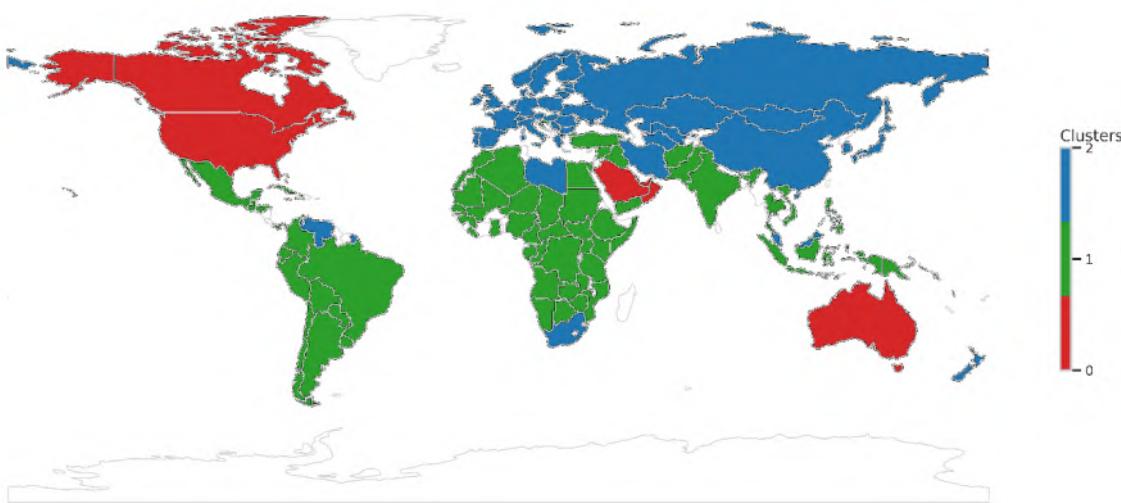


Figura 4.15 Mapa de las emisiones de CO₂ en tm per cápita por país.

4.3.2 EMISIONES GLOBALES TOTALES DE CO₂

4.3.2.1 Agrupamiento de países para las emisiones globales totales altas, medias y bajas de CO₂

La Figura 19, presenta los resultados del análisis de agrupamiento de los países en tres grupos relacionados con las emisiones globales totales de dióxido de carbono en kilotoneladas, durante los 30 años del estudio.

En particular la Figura 19.A, presenta el grupo de países que generan las mayores emisiones globales totales de CO₂, el gas de efecto invernadero con mayor impacto en el calentamiento global. Este grupo integrado únicamente por China y Estados Unidos, con un rango que varía entre 2,173,364.2 kt generadas por China en 1990 y 10,944,686.20 kt generadas por el mismo país en 2020. China aporta el 54.10% de las emisiones de este grupo y muestra una tendencia ascendente en casi todo el periodo, con excepción de dos años, con una reducción del 2.55% en 1999 respecto a 1998 y otra del 1.61% en 2015 respecto a 2014, cabe resaltar

que en 2020 con respecto a 2019 generó un incremento del 1.68%. Sus emisiones se incrementaron un 169.37% durante el periodo, pasando de 2,173,364.2 kt en 1990 a 10,944,686.2 kt en 2020, lo que representa un aumento de 5,03 veces. China es el mayor productor de carbón del mundo, generando más de la mitad del suministro global. Su alta demanda interna impulsada por el uso del carbón como principal fuente de energía para la generación de electricidad y la industria pesada (especialmente en la producción de acero y cemento que requieren grandes cantidades de energía), la expansión de la industria fabricante ha sido un factor determinante. Desde los años 90, China se ha consolidado como la "fábrica del mundo", con una producción masiva de bienes para exportación, siendo la principal fuente de sus emisiones. Otro sector clave en el aumento del CO₂ ha sido el transporte, donde el uso de combustibles fósiles en automóviles y camiones sigue siendo una fuente importante de contaminación. A esto se suma la urbanización acelerada, que ha generado emisiones adicionales asociadas al crecimiento urbano y la construcción de infraestructura. Por otro lado, la adopción de energías renovables ha sido más lenta en comparación con la expansión industrial, a pesar de las inversiones en energías renovables, el carbón sigue dominando su matriz energética (IEA, Países y Regiones, China). Durante años, estas fuentes limpias no pudieron competir con los bajos costos y la infraestructura consolidada del carbón, lo que retrasó su implementación a gran escala. En definitiva, el incremento de las emisiones de CO₂ en China desde 1990 ha sido consecuencia de su rápido crecimiento económico, su industrialización masiva y su fuerte dependencia del carbón. A pesar de los avances en energías renovables y políticas ambientales, la transición hacia una economía más sostenible sigue representando un gran desafío.

Estados Unidos, en segundo lugar, contribuye con el 45.89% de las emisiones del grupo; a diferencia de China, mostró una disminución total en sus emisiones durante el periodo. Sus emisiones aumentaron inicialmente desde 1990 hasta 2005, cuando alcanzaron un máximo de 5,753,493.2 kt, pero a partir de ese año comenzaron a disminuir, terminando con 4,320,532 kt en 2020, durante el periodo analizado, registró la mayor reducción en 2020 respecto a 2019, con un descenso del 10,31 %, y una disminución acumulada del 9,71 % en sus emisiones totales, como resultado de diversos factores presentes desde 2006. Uno de los más significativos ha sido la transición hacia las energías renovables, con una mayor dependencia de la energía eólica y solar, lo que reduce la dependencia del carbón para la generación de electricidad. Sin embargo, la combustión de combustibles fósiles —incluido el gas natural, el carbón y el petróleo— sigue siendo una fuente importante de emisiones, especialmente en la generación de energía. Aunque el uso del carbón ha disminuido, todavía

desempeña un papel relevante en ciertas regiones. Por otro lado, la transición hacia las energías renovables ha contribuido a reducir las emisiones del sector eléctrico, pero estas fuentes aún no superan a los combustibles fósiles en la participación total de la matriz energética. Más allá de la generación de electricidad, otros sectores siguen contribuyendo significativamente a las emisiones, como el transporte, la manufactura, la refinación de petróleo, la producción química y siderúrgica, y el consumo de energía en edificios comerciales y residenciales, especialmente para calefacción, refrigeración y electricidad. En este contexto, la sustitución del carbón por gas natural ha desempeñado un papel crucial en la reducción de emisiones. El auge de la fractura hidráulica ha incrementado el acceso al gas natural como fuente de energía alternativa, que emite menos CO₂ por unidad de energía producida. Las mejoras en la eficiencia energética también han contribuido, con avances en edificios, electrodomésticos y sistemas industriales que optimizan el consumo energético y reducen el impacto ambiental. Las políticas regulatorias han impulsado aún más la reducción de emisiones. Si bien las políticas ambientales han variado entre administraciones, han promovido medidas como estándares de eficiencia vehicular y restricciones a las centrales eléctricas de carbón, lo que ha contribuido a la disminución de las emisiones. Finalmente, la disminución de la demanda de carbón y el cierre de numerosas centrales eléctricas han acelerado este proceso, ya que la competencia de fuentes de energía más limpias ha reducido progresivamente el uso del carbón y sus emisiones asociadas. (IEA, Países y Regiones, Norte América)

La Figura 19 B, muestra el grupo de países que generan niveles medios de emisiones globales totales de CO₂, integrado por cuatro países: India, Alemania, Japón y Rusia. Este grupo tiene un rango de emisiones que varía entre las 563,575.40 kt emitidas por India en 1990 y las 2.458.175,90 kt emitidas por el mismo país en 2018. Rusia lidera este grupo con una contribución del 33.37% a las emisiones totales, seguida por India con un 27.16%, Japón en tercer lugar con un 23.32% y, en último lugar, Alemania aportando el 16.13%. Rusia muestra una tendencia inicial de descenso en sus emisiones desde 1990 hasta 1997, con una reducción del 36.00% en este periodo, alcanzando su punto mínimo en 1997 con 1,489,506.5 kt, posteriormente sus emisiones presentan fluctuaciones con caídas y picos no pronunciados hasta 2020, cuando registró 1,618,271 kt, en total Rusia experimentó una reducción del 26.79% en sus emisiones durante todo el periodo de estudio. Estas emisiones se generan principalmente en su sector energético, que depende del gas natural, el petróleo y el carbón, como uno de los mayores productores y exportadores de estos recursos, una gran parte de su energía proviene de ellos, además el transporte y la industria también

contribuyen significativamente a sus emisiones. En cambio India en segundo lugar dentro del grupo, registró el mayor incremento en sus emisiones, mostrando una tendencia creciente cada año desde 1990 hasta 2018, cuando alcanzó su pico máximo, que también fue el más alto del grupo, durante este período sus emisiones aumentaron un 152.07%, entre 2019 y 2020 las emisiones de India disminuyeron un 10.59%, aunque el balance general durante los 30 años del estudio muestra un incremento del 141.47%. Las emisiones de India provienen principalmente de su sector energético, dado que el país es uno de los mayores consumidores de carbón a nivel mundial, gran parte de su electricidad se genera en plantas termoeléctricas que utilizan este combustible, además otros sectores como la industria, el transporte, los edificios y el uso residencial también contribuyen de manera considerable a las emisiones totales, por otro lado Japón presenta una tendencia más estable con fluctuaciones menores, registrando una disminución del 5.87% en sus emisiones durante el período de estudio. Sus principales fuentes de emisiones provienen de la generación de electricidad, donde se utilizan principalmente gas natural, carbón y petróleo, además los sectores del transporte y la industria contribuyen de manera significativa debido al nivel avanzado de su economía ya la gran cantidad de industrias que posee. Alemania por su parte, muestra una tendencia general decreciente en sus emisiones, con algunos incrementos menores en ciertos años, en total se registra una reducción del 44.13%, siendo el país del grupo con la mayor disminución de emisiones. Las emisiones de Alemania provienen principalmente de su sector energético, aunque ha avanzado en la transición hacia las energías renovables, todavía utiliza carbón especialmente lignito que es altamente contaminante, como una importante fuente de generación eléctrica.

La Figura 19 C presenta el agrupamiento de países con las emisiones totales de CO₂ más bajas a nivel mundial, compuesto por la gran mayoría de los países considerados en el estudio, con un total de 102 países. Las emisiones de este grupo varían entre las 688,618.9 kt emitidas por Ucrania en 1990 y las 66.9 kt emitidas por Vanuatu en el mismo año. Canadá lidera este grupo con una contribución del 5.38% y una reducción en sus emisiones del 22.37% durante todo el periodo analizado. Le sigue el Reino Unido, con una contribución del 5.10%, y en tercer lugar se encuentra Corea del Sur, que aporta un 5.04% a las emisiones totales del grupo. En este conjunto compuesto por un gran número de países, destaca la participación de todos los países latinoamericanos, africanos y europeos, excepto Alemania, que pertenece al grupo de emisiones medias, así como la mayoría de los países asiáticos. Aunque estos países son los que menos emiten en términos absolutos, también registran los mayores incrementos relativos en sus emisiones. En particular los países africanos que

figuran en los últimos lugares por su baja contribución al total de emisiones del grupo, han registrado los mayores aumentos debido a su rápido crecimiento poblacional. África tiene una de las tasas de crecimiento demográfico más altas del mundo, lo que eleva la demanda de energía, transporte, alimentos y otros servicios, incrementando el uso de combustibles y por ende las emisiones de CO₂. Entre estos países, destaca Ghana ubicado en el lugar 70 del grupo, con una contribución del 0.08% y un incremento del 230.09% en sus emisiones. Mozambique en el lugar 86, aporta un 0.03% y registra un aumento del 207.10%. Camerún en el lugar 74, contribuye con un 0.06% y presenta un incremento del 183.86%, mientras que Nigeria, en el lugar 31, aporta el 1.03% con un aumento del 152.47%. Estas naciones también han experimentado importantes incrementos poblacionales del 2020 con respecto a 1990, con tasas del 120.89% en Ghana, 154.80% en Mozambique, 135.05% en Nigeria y 150.62% en Camerún. Asia se caracteriza por la presencia de países en posiciones altas e intermedias dentro del grupo, además de registrar los segundos mayores incrementos en sus emisiones de CO₂. Entre ellos destacan Afganistán en el lugar 80, con una contribución del 0.05% y un incremento del 206.97%; Emiratos Árabes Unidos en el lugar 24, que aporta el 1.31% con un aumento del 129.11%; Irán en el lugar 4, que contribuye con el 4.51% y un incremento del 117.36%; Catar en el lugar 45, con una contribución del 0.50% y un incremento del 206.08%; y Arabia Saudita, en el lugar 9, que aporta el 3.69% con un incremento del 113.71%. Excepto Afganistán, estos países son grandes productores y exportadores de petróleo y gas natural. La extracción, procesamiento y transporte de estos recursos generan emisiones significativas de CO₂, mientras que el bajo costo y alta disponibilidad de los combustibles fósiles en estos países fomentan un consumo elevado de energía, el rápido crecimiento urbano también ha contribuido al incremento en sus emisiones.

América Latina participa con países que presentan los terceros mayores incrementos en sus emisiones, ocupando posiciones intermedias y altas dentro del grupo. México en el lugar 5, contribuye con el 4.20% y registra un incremento del 38.82%; Brasil en el lugar 12, aporta el 3.61% con un aumento del 78.32%; y Argentina en el lugar 22, presenta un incremento del 46.81%, Colombia en el lugar 35 aporta el 0.67% con un incremento del 51.05%, por otro lado con posiciones bajas en el grupo se encuentran países como Guatemala(67), Honduras (73) y Paraguay(81) registran los mayores incrementos de la región, con aumentos del 141.19%, 158.29% y 142.84% respectivamente. A pesar de estos incrementos, las emisiones de América Latina han crecido en menor medida en comparación con Asia o África, gracias

a la expansión de su matriz energética hacia fuentes renovables, especialmente la energía hidroeléctrica en países como Brasil, Colombia y Paraguay. Por su parte, los países europeos registran los menores incrementos en sus emisiones, e incluso reducciones significativas, aunque ocupan posiciones altas dentro del grupo. Reino Unido en el lugar 2, contribuye con el 5.10% y registra una disminución del 57.09% en sus emisiones; Italia en el lugar 6, aporta el 4.17% con un incremento del 33.96%; Francia en el lugar 11, contribuye con el 3.65% y presenta una reducción del 26.49%; mientras que España, en el lugar 15, aporta el 2.82% con un incremento mínimo del 0.10%. Estas reducciones significativas en Europa son el resultado de compromisos internacionales, como el Acuerdo de París y políticas ambientales orientadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Así mismo, Europa ha expandido su matriz energética hacia fuentes renovables y ha desarrollado tecnologías para mitigar sus emisiones. Pese a ello, los países europeos siguen siendo grandes emisores de CO₂ en comparación con las naciones de África o América Latina.

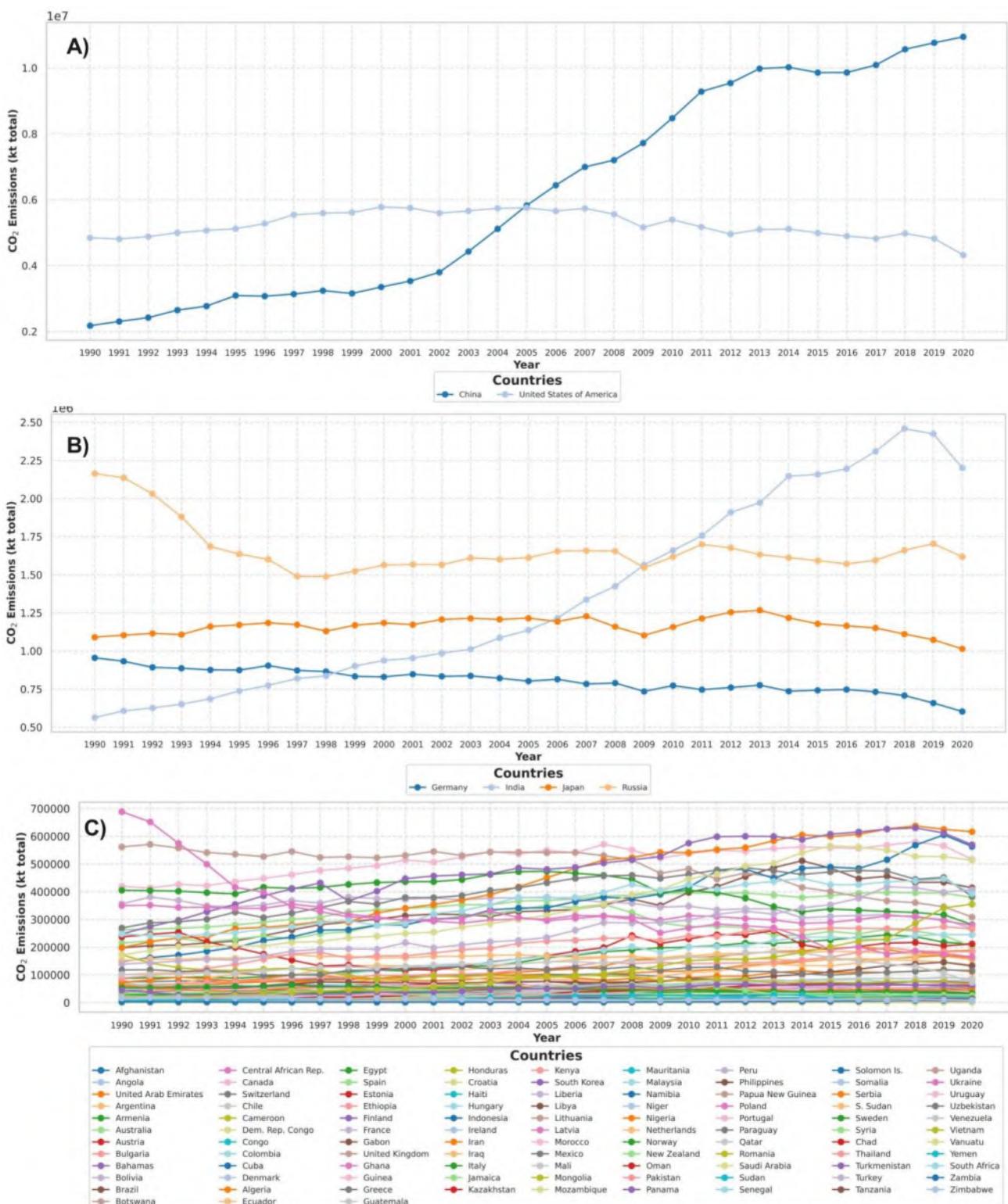


Figura 4.16 Emisiones globales totales de CO₂ en kt; **A** Grupo de emisiones altas, **B** Grupo de emisiones medias, **C** Grupo de emisiones bajas.

4.3.2.2 Trayectoria promedio de las emisiones globales totales de CO₂

En la Figura 20 se describe el comportamiento de la tendencia de las trayectorias promedios que siguen cada uno de los grupos de emisiones totales de CO₂ en kt. Los tres clústeres se diferencian por colores: el Clúster 1: representa las emisiones altas con una línea roja, el Clúster 0: representa las emisiones medias con una línea azul y el Clúster 2: Representa las emisiones bajas con una línea verde.

El Clúster 1, CO₂ total, representa el comportamiento en las emisiones promedio del grupo de países con las emisiones más altas, representando el 1.85% de los países considerados en este estudio. La tendencia general de este grupo muestra un comportamiento ascendente, con breves periodos de estabilización y dos reducciones menores registradas en todo el periodo analizado. Estos periodos de estabilización se explican por la tendencia individual de Estados Unidos, que además de no incrementar sus emisiones logró reducirlas, neutralizando parcialmente el crecimiento continuo de las emisiones de China. Durante el periodo de estudio las emisiones promedio de este grupo alcanzaron su punto más alto en 2019 con 7,790,267.2 kt anuales por país y 15,580,534.4 kt como grupo. Su punto más bajo se registró en 1990 con 3,508,940.8 kt anuales promedio por país y 7,017,881.6 kt como grupo. La tendencia general presenta tres periodos de crecimiento. El primero entre 1990 y 2002, se caracterizó por incrementos anuales menores, con un promedio del 1.28%, durante este periodo las emisiones anuales promedio por país fueron de 2,337,085 kt, acumulando un total de 107,505,917 kt como grupo. El segundo periodo entre 2003 y 2007, mostró el mayor crecimiento del estudio, con un promedio de incremento anual del 6.28%, en esos años las emisiones promedio anuales fueron de 5,733,307.89 kt por país, acumulando 57,333,078.9 kt como grupo. Posteriormente, entre 2008 y 2009, se observó un breve periodo de estabilización con un incremento de solo el 1.14%. A partir de 2010 y hasta 2020 la tendencia se volvió fluctuante, con incrementos en algunos años, reducciones en otros y breves periodos de estabilización. En este tercer periodo se registraron las únicas dos reducciones del clúster: un descenso del 1.83% en 2015 respecto a 2014, y una disminución del 2.02% en 2020 respecto a 2019. En general estos años generaron un incremento promedio anual del 1.60%, con emisiones anuales promedio de 7,450,981.76 kt por país, acumulando 163,921,559 kt como grupo. El balance general del comportamiento del Clúster 1 muestra el mayor incremento de emisiones entre los tres grupos estudiados, con un crecimiento del 79.78% durante los 30 años y del 117.51% en 2020 respecto a 1990. En total este grupo generó 354,394,074.3 kt de CO₂, representando el 44.00% de las emisiones

globales totales de CO₂, el promedio de emisiones generadas por país en este periodo fue de 177,197,037.2 kt, con un promedio anual por país de 5,906,567.9 kt. Estos datos reflejan que China y Estados Unidos son líderes indiscutibles en emisiones totales de CO₂. En contraste, mientras que China ha experimentado un crecimiento exponencial en sus emisiones, Estados Unidos ha mostrado una tendencia a la disminución. A pesar de ello, estos dos países generan casi la mitad de las emisiones mundiales totales de CO₂, contribuyendo significativamente al calentamiento global y al cambio climático, que plantea serios desafíos para la humanidad. Estas emisiones provienen principalmente de sus sectores energéticos, sus grandes industrias y el transporte. En el caso de China, el elevado uso de carbón para la generación de energía junto con su acelerado crecimiento poblacional, contribuyen de manera significativa. Estos factores explican su posición como líder del grupo y como el mayor emisor de CO₂ a nivel mundial.

El clúster 2, CO₂ total, muestra la trayectoria promedio del grupo con emisiones medias y abarca el 3.70% de los países considerados en el estudio. Integrado por Rusia, Alemania, Japón e India. Durante el periodo analizado este grupo muestra una tendencia de crecimiento lento con leves fluctuaciones, incluyendo pequeñas caídas y periodos de estabilización. Este crecimiento moderado está influenciado por las tendencias individuales de Rusia, Alemania y Japón que registraron reducciones en sus emisiones individuales, contribuyendo a neutralizar parcialmente el aumento continuo de India, que destacó con un crecimiento en sus emisiones del 185.13% en comparación con Alemania, siendo el país del grupo con la mayor reducción de emisiones. Entre 1990 y 1994 este grupo registró una tendencia decreciente acumulando una reducción del 7.85%, con un promedio anual de emisiones por país de 231,518 kt, alcanzando un total acumulado por el grupo de 23,151,899.40 kt. De 1995 a 1999, el grupo mostró un período de estabilización, con incrementos y caídas menores que se equilibraron, resultando en un aumento acumulado del 0.52%, equivalente a un promedio anual del 0.08%. Desde el año 2000 hasta 2018 predominó una tendencia ascendente, salvo en 2009 y 2015 donde se registraron reducciones del 1.57% y 0.72%, respectivamente, con respecto a los años anteriores, en este periodo el incremento total fue del 29.81%, con un promedio anual por país de 1,293,713.92 kt y un acumulado grupal de 98,322,257.80 kt. Finalmente, las emisiones cayeron un 1.31% en 2019 respecto a 2018, y un 7.22% en 2020 respecto a 2019, siendo esta ultima la mayor caída interanual en todo el periodo de estudio. En el balance general, este grupo generó un total de 154,755,166.40 kt de CO₂ durante los 30 años analizados, lo que representa el

19.21 % de las emisiones globales totales de CO₂. Durante este periodo se observó un incremento del 13.93 % en las emisiones globales, y específicamente un aumento del 13.90 % en 2020 en comparación con 1990, el promedio de emisiones por país fue de 38,688,791.60 kt, mientras que el promedio anual por país alcanzó 1,289,626.38 kt.

Las principales fuentes de emisiones de CO₂ en este grupo están vinculadas al sector energético debido a su alta dependencia de los hidrocarburos para la generación eléctrica. India y Alemania utilizan carbón como fuente principal, aunque Alemania ha avanzado hacia una matriz energética más diversificada con fuentes renovables, lo que le ha permitido liderar las reducciones de emisiones. Mientras que en Rusia sus principales emisiones derivan de su sector energético por la producción de su electricidad, otras emisiones importantes en este país se generan de su gran industria de hidrocarburos, como uno de los mayores productores y exportadores mundiales de petróleo y gas natural, lo que contribuye significativamente a sus emisiones de CO₂.

El Clúster 2, CO₂ total, exhibe la tendencia promedio de emisiones del grupo de países con los niveles más bajos, representando el 94.44% de los países estudiados. Este grupo muestra un comportamiento lineal en ascenso durante casi todo el periodo de estudio, a excepción de algunos años cuando hubo reducciones menores por abajo del 0.5% en 1992, 1993, 2014 y 2019 con respecto a los años anteriores. Por otro lado 2009 y 2020 se caracterizan por ser los dos años con las mayores reducciones interanuales que se presentaron durante todo el periodo, en 2009 del 3.17% con respecto al 2008, y en 2020 del 6.31% con respecto a 2019, registrándose en 2020 la mayor reducción de todo el periodo, mientras que el mayor crecimiento interanual se registró en 2010 del 4.80% con respecto al 2009, posterior a una de sus mayores caídas. Este grupo alcanzó su punto máximo de emisiones en 2018 con 11,296,852 kt totales del grupo y un promedio anual de 110,753 kt por país, en contraste, su punto mínimo en 1990 cuando el grupo generó 7,589,454.19 kt, con 74,406.41 kt promedio anuales por país. En total las emisiones generadas por este grupo a lo largo de los 30 años alcanzaron las 296,114,148.6 kt, representando el 36.77% de las emisiones globales totales de CO₂. El promedio de emisiones generadas por país durante este periodo fue de 2,903,079.88 kt, mientras que el promedio anual por país fue de 96,769.32 kt. En términos de crecimiento, las emisiones del grupo incrementaron en un 33.75% durante el periodo analizado, y el aumento entre 2020 con respecto a 1990 fue del 39.00%. Al ser el grupo más grande, con 102 de los 108 países estudiados, el incremento general del grupo se debe principalmente a que la mayoría de los países asiáticos, africanos y de América Latina

experimentaron aumentos significativos en sus emisiones, alrededor de 100% y 200%, en contraste las reducciones que registraron gran parte de los países europeos contrarrestaron el crecimiento general de emisiones en el grupo.

Los tres grupos analizados presentan comportamientos diferenciados en sus emisiones de CO₂ a lo largo de los últimos 30 años, reflejando tanto patrones globales como regionales en su contribución al cambio climático. El grupo de emisiones altas liderado por China y Estados Unidos, mostró el mayor crecimiento en emisiones totales, acumulando 354,394,074.3 kt y representando el 44% de las emisiones globales de CO₂. Mientras que China incrementó exponencialmente sus emisiones debido a su alto uso de carbón y crecimiento poblacional. Estados Unidos mostró una tendencia a la reducción de emisiones, registrando una disminución acumulada del 9.31% durante todo el período analizado y un descenso del 10.31% en 2020 respecto a 2019, influenciado principalmente por la pandemia de la COVID-19, sin embargo, este descenso solo logró reducir las emisiones del grupo en un 2.02% durante esos años, debido a que China este tiempo lejos de disminuirlas, las incremento. Este grupo cuya fuente principal de emisiones proviene del sector energético e industrial, es el principal responsable del calentamiento global. Por otro lado, el grupo de emisiones medias con un acumulado de 154,755,166.40 kt que representa un 19.21% de las emisiones totales globales de CO₂. A pesar de los incrementos observados durante la mayor parte del periodo, se destacaron reducciones significativas en 2019 y 2020, especialmente por eventos mundiales inesperados como la pandemia de la COVID-19, debido a las medidas de confinamiento y restricciones en la movilidad y la ralentización de las actividades económicas. Además, los efectos de avances hacia fuentes renovables en países como Alemania y Francia han contribuido a contrarrestar el incremento en las emisiones. Sin embargo, India y Rusia siguen siendo emisores significativos, debido a su dependencia del carbón y su papel como grandes productores de hidrocarburos. Finalmente, el grupo de emisiones bajas, que incluye a la mayoría de los países, acumuló 296,114,148.6 kt, equivalentes al 36.77% de las emisiones globales. Este grupo también registro su mayor disminución de emisiones del 6.31% en 2020 con respecto al 2019, como efecto de la pandemia de la COVID-19, no obstante, durante todo el periodo su crecimiento fue del 33.75%, impulsado por los altos incrementos en países asiáticos, africanos y latinoamericanos, aunque contrarrestado en parte por reducciones en Europa. A pesar de su menor contribución individual, el crecimiento de este grupo destaca la creciente participación de economías en desarrollo en el panorama global de emisiones. En conjunto,

los datos reflejan la necesidad urgente de abordar las emisiones de CO₂ a nivel global, considerando tanto los grandes emisores como el incremento de emisiones en países en desarrollo. Las estrategias deben centrarse en la transición energética, la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y el impulso a tecnologías limpias y renovables. Por otro lado, un país del grupo de emisiones altas genera en promedio (5,906,567.9 kt anuales) 4.58 veces más emisiones que un país del grupo de emisiones medias (1,289,626.38 kt anuales), y 61.04 veces más que el grupo de emisiones bajas (96,769.32 kt anuales). Por su parte un país del grupo de emisiones medias genera 13.33 veces más emisiones que un país del grupo de emisiones bajas.

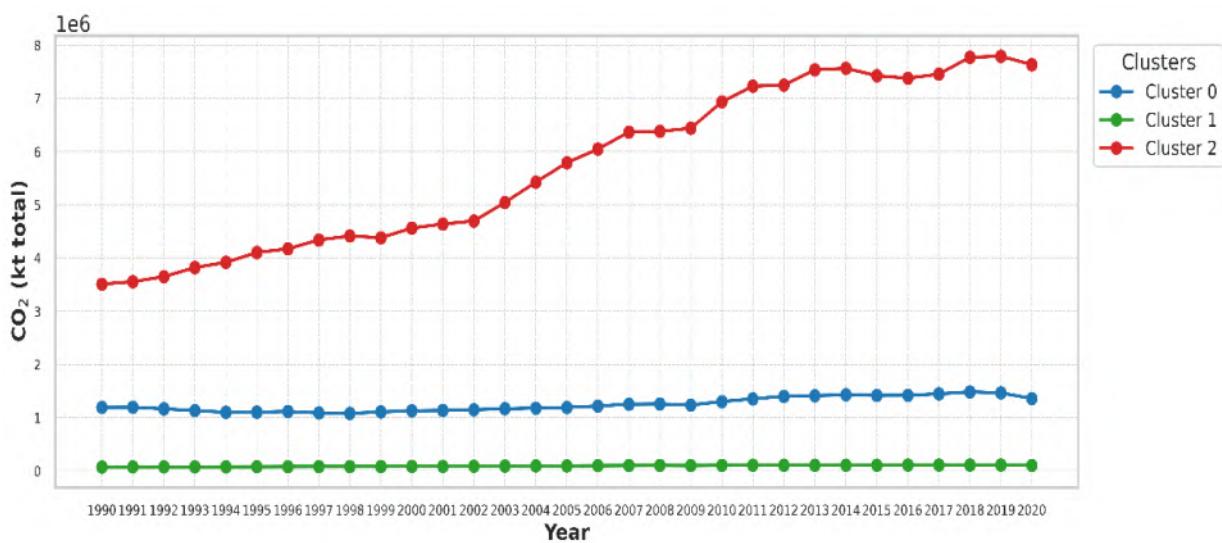


Figura 4.17 Trayectoria promedio por grupo de las emisiones globales totales de CO₂ en kt.

4.3.2.3 Segmentación global de emisiones totales de CO₂

La Figura 21, muestra la segmentación de países en el mundo según sus emisiones totales de dióxido de carbono. En el mapa se muestra una representación esquemática de la distribución de países por regiones o continentes, agrupados en tres clústeres diferenciados por colores: los países con emisiones altas, pintados en rojo, corresponden al Clúster 2; aquellos con emisiones medias, en azul, forman el Clúster 0; y los países con emisiones bajas, en verde, integran el Clúster 1. Esta clasificación permite visualizar el comportamiento global en relación con las emisiones totales de CO₂.

En el continente americano destaca la presencia de Estados Unidos como el único país en el grupo de emisiones altas, mientras que el resto de los países de esta región considerados en

el estudio pertenecen al grupo de emisiones bajas. Estados Unidos uno de los líderes globales en emisiones de CO₂, ocupa el segundo lugar en el ranking mundial, acumulando 162,638,318.1 kt durante el periodo de estudio, lo que equivale a un promedio anual de 5,421,277.27 kt y representa el 20.19 % de las emisiones globales totales. Aunque ha mostrado una tendencia decreciente, con una reducción del 9.71 % en los últimos 30 años, sigue siendo responsable de las segundas mayores emisiones de CO₂ a nivel mundial. Estas emisiones provienen principalmente de su sector energético que utiliza hidrocarburos como petróleo, gas natural y carbón para la generación de electricidad, además de una industria de hidrocarburos robusta, donde la extracción y producción de gas natural mediante fracturación hidráulica ha crecido exponencialmente en las últimas dos décadas. El sector transporte altamente dependiente de combustibles fósiles como gasolina y diésel, también contribuye significativamente a las emisiones, como una de las economías más grandes del mundo, este país requiere una alta demanda de energía para la producción industrial y el funcionamiento de su infraestructura urbana. Su elevado consumo de bienes y servicios per cápita, así como la gran cantidad de vehículos por habitante, genera mayores emisiones directas e indirectas, justificando su posición en el ranking global. Por otro lado, Canadá, aunque pertenece al grupo de emisiones bajas ocupa el séptimo lugar en el ranking global, con un acumulado de 15,939,392.3 kt durante el periodo estudiado, equivalente a un promedio anual de 531,313,07 kt. El resto de los países de la región se ubica en el grupo de emisiones bajas, especialmente los países latinoamericanos que ocupan posiciones relativamente altas, medias o bajas en el ranking global. Entre los países con posiciones más altas se encuentra México en el puesto 11, con un acumulado de 12,445,192.6 kt, lo que equivale a un promedio anual de 414,839.75 kt, su economía basada en actividades industriales y el uso de combustibles fósiles, explica su posición en el ranking global. Le sigue Brasil en el lugar 18, con un acumulado de 10,698,529.8 kt, equivalente a un promedio anual de 356,617.66 kt. En el caso de Brasil las emisiones relacionadas con la deforestación y la agricultura hacen que sea uno de los principales emisores globales de gases de efecto invernadero no asociados exclusivamente al uso de combustibles fósiles. En posiciones medias del ranking global se encuentran Argentina en el puesto 28, con emisiones anuales promedio de 150,960.81 kt, y Colombia en el puesto 41, con 66,702.6 kt anuales. En las posiciones más bajas de la región aparecen países como Guatemala (73), Honduras (79) y Paraguay (87). Esto se debe a que la mayoría de los países de América Latina tienen economías menos industrializadas en comparación con Estados Unidos, China o los países de Europa. Al depender de más sectores como la agricultura, servicios y turismo, generan menos emisiones provenientes de industrias pesadas y procesos industriales intensivos.

Además, muchos países de la región tienen un alto porcentaje de generación eléctrica a partir de fuentes renovables, especialmente energía hidroeléctrica. Por ejemplo, Brasil, Colombia y Paraguay que generan una gran parte de su electricidad mediante represas, mientras que países como Uruguay han invertido fuertemente en energías eólica y solar.

En África todos los países se encuentran en el grupo de emisiones bajas y ocupan las posiciones más bajas en el ranking global, contribuyendo mínimamente a las emisiones de CO₂ a nivel mundial. Sin embargo, esta región destaca por registrar los mayores incrementos en emisiones durante el período de estudio. Este crecimiento se debe principalmente a su rápido aumento poblacional, ya que África tiene una de las tasas de crecimiento demográfico más altas del mundo. Este fenómeno eleva la demanda de energía, transporte, alimentos y otros servicios, lo que incrementa el uso de combustibles fósiles y en consecuencia las emisiones de CO₂. En Europa predomina la presencia de países en el grupo de emisiones bajas de CO₂, salvo Alemania, que es el único país europeo clasificado en el grupo de emisiones medias, ocupando posiciones altas y medias dentro del ranking global. Europa se caracteriza por haber logrado las mayores reducciones en emisiones de CO₂ a nivel global, impulsadas por políticas climáticas ambiciosas y transformaciones estructurales. Alemania en el sexto lugar del ranking global, contribuye con el 3.10 % de las emisiones globales, acumulando 24,971,744.6 kt durante el periodo de estudio lo que equivale a un promedio anual de 832,391.48 kt. Aunque Alemania ha avanzado en su transición energética hacia fuentes renovables, sigue utilizando carbón especialmente lignito que es altamente contaminante, como una fuente importante para la generación eléctrica. Dentro del grupo de emisiones bajas se encuentran Reino Unido en el octavo lugar, Italia en el 12, Francia en el 17 y España en el 21 del ranking global. Las reducciones de CO₂ en Europa son resultado de una combinación de políticas climáticas estrictas, avances tecnológicos y cambios en la estructura económica. La Unión Europea ha adoptado metas ambiciosas, como las establecidas en el Acuerdo de París y el Pacto Verde Europeo, que buscan alcanzar la neutralidad de carbono para 2050. Esto ha impulsado una transición hacia energías renovables, una transformación del transporte y una mayor conciencia ciudadana sobre el cambio climático ha consolidado a Europa como líder mundial en la reducción de emisiones.

Asia se caracteriza por la presencia de países en los tres grupos de emisiones: altas, medias y bajas. En el grupo de emisiones altas, China se posiciona como el principal emisor global de CO₂, contribuyendo con el 23.81 % de las emisiones globales y acumulando durante el periodo de estudio un total de 191,755,756.2 kt, equivalente a un promedio anual de

6,391,858.54 kt. Este volumen lo convierte en el líder indiscutible en emisiones de CO₂, además de haber registrado un aumento exponencial en sus emisiones, incluso durante la pandemia de la COVID-19, periodo en el que a diferencia de la mayoría de los países no redujo ni estabilizó sus emisiones, sino que las incrementó. Esta tendencia se explica por el predominio del carbón en su matriz energética, siendo el mayor productor y consumidor de este combustible a nivel mundial. Otros factores como su rápida industrialización basada en la manufactura, el crecimiento urbano y las actividades de construcción, así como su población en constante aumento, refuerzan su posición como el mayor emisor global de CO₂. En el grupo de emisiones medias se encuentran Rusia e India, que ocupan el tercer y cuarto lugar en el ranking global respectivamente. Rusia con emisiones anuales promedio de 1,721,563.1 kt, contribuye con el 6.41 % de las emisiones globales, una proporción más de tres veces menor que la de China o Estados Unidos. Estas emisiones provienen principalmente de su sector energético basado en el gas natural, el petróleo y el carbón, siendo uno de los mayores productores y exportadores de estos recursos. El transporte y la industria también desempeñan un papel importante en sus emisiones. Por su parte, India con emisiones anuales promedio de 1,401,528.06 kt, contribuye con el 5.22% de las emisiones globales. En este caso las emisiones se originan principalmente en el sector energético, dado que el país es uno de los mayores consumidores de carbón a nivel mundial. Otros sectores como la industria, el transporte, los edificios y el uso residencial, también contribuyen significativamente al total de sus emisiones. Dentro del grupo de emisiones bajas, los demás países asiáticos ocupan posiciones intermedias y altas en el ranking global. Por ejemplo, Emiratos Árabes Unidos se encuentra en el puesto 30, Irán en el 10, Catar en el 51 y Arabia Saudita en el 15. Sin embargo, los países asiáticos también destacan por registrar los segundos mayores incrementos en emisiones de CO₂ durante el período de estudio, debido a que muchos de estos países son grandes productores y exportadores de petróleo y gas natural, actividades que generan emisiones significativas durante la extracción, procesamiento y transporte, además el bajo costo y la alta disponibilidad de combustibles fósiles fomentan un consumo energético elevado, también el rápido crecimiento urbano en la región ha contribuido al incremento de sus emisiones totales.

Las emisiones globales totales de los 108 países que conforman los tres grupos de emisiones (altas, medias y bajas) ascienden a 805,263,389.3 kt de CO₂ equivalente. Entre los tres principales gases de efecto invernadero (GEI) —N₂O, CH₄ y CO₂—, el CO₂ es el que registra las mayores emisiones, representando el 73.44 % del total combinado de estos gases.

Durante el periodo de estudio, las emisiones de los 108 países aumentaron un 48.78 %, con un incremento del 61.25 % en 2020 en comparación con 1990. El CO₂ es, por lo tanto, el principal responsable del calentamiento global y también el gas que registró los mayores incrementos globales entre los tres GEI estudiados. El impacto de la COVID-19 fue más notable en las emisiones de CO₂ que en las de CH₄ u N₂O, debido a la abrupta disminución de las actividades económicas relacionadas con el uso de combustibles fósiles, como la generación de energía y el transporte. En contraste, las emisiones de metano y óxido nitroso se mantuvieron relativamente estables, ya que están más vinculadas a procesos agrícolas y biológicos que no se vieron tan afectados por la pandemia. Esto pone de manifiesto cómo la crisis sanitaria impactó principalmente en sectores dependientes de combustibles fósiles, mientras que otros sistemas emisores de GEI permanecieron prácticamente inalterados.

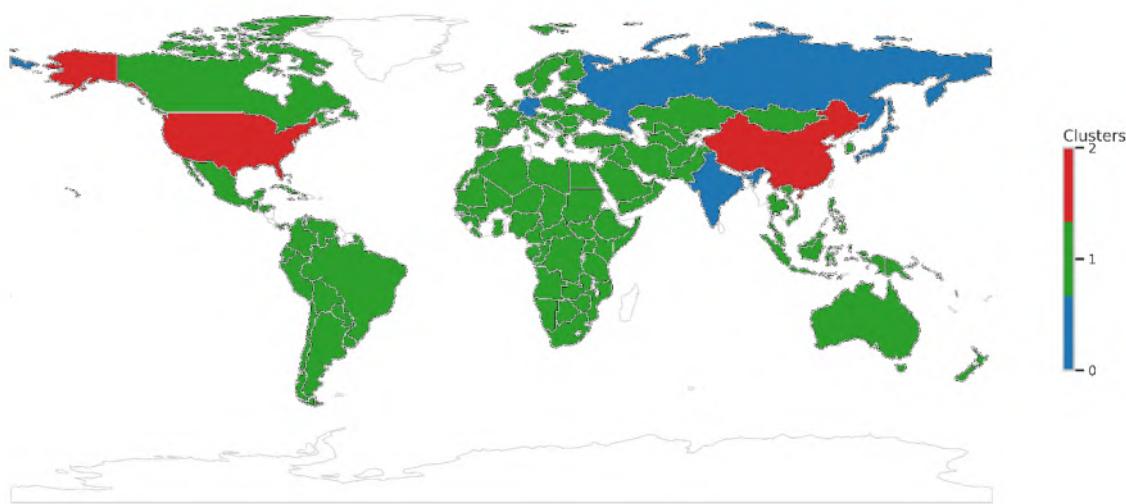


Figura 4.18 Mapa de las emisiones totales de CO₂ en kt por país.

4.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Este estudio evalúa las tendencias y disparidades en las emisiones de los tres GEI principales (N_2O , CH_4 y CO_2) de 1990 a 2020, subrayando su papel acumulativo en el calentamiento global y la necesidad urgente de estrategias de mitigación específicas. En conjunto, estos gases representan más del 90% de las emisiones totales de GEI, con el CO_2 dominando con un 73%, el CH_4 con un 16% y el N_2O con aproximadamente un 10%. (IPCC, University Press: Cambridge, 2023)

Las emisiones de CO_2 siguen siendo el principal contribuyente al cambio climático, y se originan principalmente en la quema de combustibles fósiles para la producción de energía, el transporte y las actividades industriales (Friedlingstein et al., 2022). El estudio destaca las contribuciones desproporcionadas de China y los Estados Unidos, que juntos representan casi el 44% de las emisiones mundiales de CO_2 . Las emisiones de China han aumentado un 169% desde 1990 debido a la dependencia del carbón, la rápida industrialización y el crecimiento urbano (Zheng et al., 2020). En contraste, Estados Unidos redujo las emisiones en un 9.7% durante el mismo período, atribuido a la transición al gas natural y las fuentes de energía renovables (Le Quéré et al., 2021), mientras que los países europeos, como Alemania, el Reino Unido y Francia, muestran reducciones significativas impulsadas por políticas climáticas como el Acuerdo de París y los avances en tecnologías renovables (IPCC Geneva et al., 2015).

Las emisiones de CH_4 son las segundas más grandes y contribuyen significativamente debido a su potencial de calentamiento a corto plazo, que es 28 veces mayor que el de CO_2 durante un período de 100 años (Saunois et al., 2020). El CH_4 se origina predominantemente en la agricultura (ganadería y cultivo de arroz), la extracción de gas natural y la minería de carbón. Los principales emisores incluyen India, Brasil y China, donde las actividades agrícolas extensivas impulsan las emisiones. Países como Turkmenistán y Qatar lideran las emisiones de CH_4 per cápita, estrechamente vinculadas a su producción y exportación de gas natural (Jackson et al., 2020). A pesar de los avances en los sistemas energéticos, las reducciones en las emisiones de CH_4 siguen siendo limitadas en comparación con las de CO_2 .

El N_2O , aunque representa una proporción menor, plantea una amenaza crítica debido a su potencial de calentamiento global 298 veces mayor en relación con el CO_2 (Suddick et al.,

2013). Las emisiones de N₂O son impulsadas principalmente por los fertilizantes a base de nitrógeno en la agricultura, la deforestación y la degradación del suelo. Australia, Nueva Zelanda y regiones de África presentan emisiones per cápita significativas, mientras que los países en desarrollo en regiones tropicales enfrentan niveles crecientes de N₂O debido a la expansión de las fronteras agrícolas y prácticas insostenibles de uso de la tierra (Reay et al., 2012).

Por último, aunque el CO₂ domina las emisiones globales, el CH₄ y el N₂O exigen la misma atención debido a sus potentes impactos en el calentamiento y las tendencias crecientes en las economías agrícolas. Para abordar estas emisiones se necesita un enfoque multifacético: descarbonizar los sistemas energéticos, reducir la dependencia del carbón y el gas natural e implementar prácticas agrícolas sostenibles para frenar las emisiones de CH₄ y N₂O a nivel mundial.

4.5 EMISIONES AJUSTADAS AL COMERCIO INTERNACIONAL Y RENDICIÓN DE CUENTAS EN LA GENERACIÓN DE GEI

Una dimensión crucial de las emisiones de GEI que se extiende más allá de los inventarios nacionales es el papel del comercio internacional, en la redistribución de la responsabilidad de las emisiones. Si bien las emisiones directas de un país reflejan su producción interna y su consumo de energía, no tienen en cuenta el carbono incorporado en los bienes y servicios importados. Muchas economías desarrolladas dependen en gran medida de las importaciones de productos industriales y agrícolas procedentes de países con altas emisiones derivadas de la producción, transfiriendo efectivamente parte de su huella de emisiones a las naciones exportadoras.

Los resultados de este estudio destacan a China como el mayor emisor absoluto de CO₂, CH₄ y N₂O del mundo, aunque su clasificación en emisiones per cápita sigue siendo significativamente más baja (72.^º en cuanto a N₂O, por ejemplo). Esto sugiere que una gran proporción de sus emisiones no son impulsadas por el consumo interno sino más bien por la producción de bienes como el mayor exportador del mundo, quien lidera el comercio mundial gracias a su enorme capacidad industrial y su red logística global. De manera similar, India y Brasil, a pesar de contribuir significativamente al crecimiento de las emisiones totales durante el período de estudio, actúan como proveedores clave de productos industriales y agrícolas para los mercados globales. En cambio, los países de altos ingresos como Alemania quien Importa gran cantidad de bienes manufacturados, especialmente de China, Polonia e India generando en el extranjero grandes cantidades de

emisiones de GEI para cubrir el consumo alemán. Por su parte Japón un país muy industrializado pero dependiente de importaciones de recursos naturales y productos manufacturados, en 2022 reportó 1.82 millones de toneladas de emisiones indirectas, aunque han disminuido en la última década, siguen representando una parte importante de su huella ambiental. Mientras que Reino Unido, que registra menores emisiones directas per cápita, contribuye indirectamente a las emisiones globales a través de su dependencia de bienes importados, alrededor del 46% de su huella de carbono total proviene de emisiones generadas fuera del país. Importa bienes de China, Rusia y E.U.A., especialmente en ropa, alimentos y materiales de construcción.

Al desglosar las emisiones según las dependencias comerciales sectoriales se revelan más disparidades. El sector industrial de China, India y México está fuertemente orientado hacia los mercados extranjeros, particularmente en productos electrónicos, textiles y bienes manufacturados, lo que significa que las emisiones generadas en estos países deberían atribuirse parcialmente a sus socios comerciales importadores. Por ejemplo, México ocupa el lugar 11 en emisiones globales absolutas de CO₂ (contribuyendo con el 1.54% a nivel mundial), mientras que en emisiones per cápita se encuentra sólo en el lugar 48 (contribuyendo con el 0.75% a nivel global) pero una parte significativa de sus emisiones industriales resulta de la producción de bienes para los mercados de Estados Unidos y Europa.

Una tendencia similar se observa en el sector agrícola, donde las emisiones derivadas del uso de la tierra, la aplicación de fertilizantes y la ganadería están integradas en las cadenas de suministro mundiales. Países como Brasil y Argentina han experimentado aumentos en las emisiones de CO₂ relacionadas con la deforestación, impulsados en gran medida por la demanda mundial de soja y carne de res, que son exportaciones importantes a China, la Unión Europea y los Estados Unidos. Mientras tanto, Uruguay y Nueva Zelanda presentan emisiones de N₂O per cápita desproporcionadamente altas, pero gran parte de su producción ganadera se destina a los mercados internacionales en lugar del consumo interno. Esto plantea la cuestión de si los inventarios nacionales de emisiones deberían ajustarse para reflejar mejor el uso final de los productos con altas emisiones.

Además, las emisiones de CO₂ procedentes de la producción de combustibles fósiles también deberían evaluarse desde esta perspectiva. Países como Arabia Saudita, Rusia y Estados Unidos, como principales exportadores de petróleo y gas, generan importantes emisiones vinculadas a la extracción y el refinamiento. Sin embargo, gran parte de la combustión real

de estos combustibles fósiles ocurre en países importadores como China, India y miembros de la Unión Europea. Desde una perspectiva de justicia climática, cargar al país productor con la totalidad de la responsabilidad por las emisiones implica desatender la dimensión relacional del comercio internacional, donde la demanda de bienes en países importadores desempeña un papel determinante. No obstante, cabe señalar que, mientras las emisiones se contabilizan en los países productores, los beneficios económicos derivados de esta producción —especialmente en sectores intensivos en carbono como los hidrocarburos— también se concentran en dichos territorios. Ejemplos como Qatar y Turkmenistán, importantes exportadores de combustibles fósiles ilustran cómo algunos países productores se enriquecen sustancialmente gracias a estas actividades, lo que añade complejidad al debate sobre una distribución justa de las responsabilidades climáticas.

La incorporación de una contabilidad de emisiones ajustada al comercio —similar a las evaluaciones de sostenibilidad corporativa que distinguen entre emisiones directas e indirectas, podría proporcionar una representación más equitativa de las responsabilidades nacionales. Las economías desarrolladas, si bien logran reducciones en las emisiones territoriales mediante la subcontratación de la producción, aún pueden contribuir significativamente a las emisiones globales a través de sus dependencias comerciales. Mientras tanto, los principales exportadores soportan el costo ambiental de satisfacer la demanda mundial, lo que genera una mayor intensidad de emisiones a pesar de un consumo per cápita regularmente menor.

Al considerar tanto las emisiones basadas en la producción como aquellas asociadas al consumo, los responsables de políticas públicas pueden diseñar estrategias de mitigación más efectivas y equilibradas. Esta doble perspectiva resulta clave para avanzar hacia una distribución más justa de las responsabilidades climáticas en el contexto del comercio internacional.

En el marco de la justicia climática, resulta insuficiente atribuir de manera unilateral la responsabilidad por las emisiones de gases de efecto invernadero a los países productores, sin tener en cuenta las dinámicas estructurales del comercio global. La demanda final de bienes, particularmente en economías importadoras, constituye un motor fundamental de dichas emisiones. No obstante, el hecho de que los beneficios económicos derivados de la producción —en especial en sectores intensivos en carbono como el de los hidrocarburos—

permanezcan concentrados en los países productores introduce un elemento de complejidad en el diseño de mecanismos de asignación equitativa de responsabilidades.

Por lo que se plantean algunas propuestas orientadas a avanzar hacia un enfoque más justo y corresponsable en la distribución de compromisos climáticos vinculados al comercio internacional.

- *Incorporación de metodologías de contabilidad basadas en el consumo.* Complementar los inventarios nacionales convencionales —centrados en las emisiones generadas por la producción interna— con metodologías de contabilidad basadas en el consumo. Este enfoque permite estimar las emisiones asociadas a los bienes y servicios importados, proporcionando así una visión más integral y precisa del impacto climático de cada país.
- *Diseño e implementación de marcos normativos de corresponsabilidad.* Impulsar acuerdos multilaterales que integren el principio de corresponsabilidad entre países productores y consumidores, especialmente en cadenas de valor con alta intensidad de carbono. Estos acuerdos deben reconocer la interdependencia existente entre la generación y el consumo de emisiones, promoviendo que los países importadores de productos con elevada huella de carbono implementen ajustes en frontera o políticas comerciales que favorezcan procesos de producción con bajas emisiones. Al mismo tiempo, se debe promover que los países exportadores reciban un apoyo internacional, tanto financiero como técnico y tecnológico, para facilitar su transición hacia prácticas industriales y agrícolas sostenibles.
- *Instrumentación de mecanismos económicos correctivos transnacionales.* Explorar herramientas como los ajustes en frontera por contenido de carbono (CBAM por sus siglas en inglés Carbon Border Adjustment Mechanisms) y otras medidas fiscales internacionales como impuestos al carbono en frontera o ajustes por emisiones incorporadas, con el fin de incentivar un comercio más justo y sostenible, sin trasladar injustamente la carga a los países productores o menos desarrollados.
- *Fortalecimiento de la trazabilidad y transparencia en cadenas globales de valor.* Avanzar en la estandarización de criterios para el reporte de emisiones a lo largo de toda la cadena de suministro, de modo que los actores económicos, especialmente las empresas multinacionales, puedan ser evaluados y regulados en función de su huella total de carbono, además establecer etiquetado en productos de exportación que permitan identificar la huella de carbono.

- *Fomento de instancias de cooperación técnica y diplomática internacional.* Promover espacios de diálogo entre países exportadores e importadores, así como entre organismos multilaterales y regionales, también la creación de un organismo internacional de regulación de emisiones en el comercio, integrada al marco institucional de la OMC (Organización mundial del comercio), al reunir a 164 países que ya comparten normas comunes en materia comercial, constituye una plataforma estratégica para la integración de compromisos ambientales universales. Además, resulta crucial que todas las instituciones multinacionales trabajen de forma coordinada para cumplir con los objetivos del Acuerdo de París.

Estas recomendaciones tienen como objetivo guiar el diseño de políticas públicas y marcos internacionales que reconozcan la complejidad sistémica de las emisiones vinculadas al comercio global, con miras a construir esquemas de gobernanza climática más justos y eficaces. En este contexto, se enfatiza la necesidad de adoptar una perspectiva verdaderamente global en la rendición de cuentas por las emisiones, de modo que las políticas climáticas no se limiten a un mero traslado geográfico de las emisiones, sino que promuevan su reducción efectiva tanto en el lugar de producción como en el de consumo.

4.6 INCORPORACIÓN DE BASES DE DATOS INTERNACIONALES PARA FORTALECER EL ANÁLISIS DE EMISIONES DE GEI

Las emisiones de N₂O se asocian principalmente con el sector agrícola, impulsadas en gran medida por el uso intensivo de fertilizantes a base de nitrógeno para sostener la producción de alimentos. Los países con altas densidades de población tienden a ser los mayores emisores de este gas de efecto invernadero, con China liderando el ranking mundial, contribuyendo con el 17.73% de las emisiones totales de N₂O, seguida por India (el país más poblado del mundo y el tercer mayor emisor con un 8.5%) y Brasil, en cuarto lugar, con un 5.98%. En el caso de Brasil, las emisiones están estrechamente vinculadas a la agricultura, la deforestación y la expansión del uso de la tierra para la producción ganadera y agrícola.

Estos resultados coinciden con los datos de la OCDE, que atribuyen el 12% de las emisiones globales de GEI a la agricultura, porcentaje que aumenta al 23% cuando se consideran el cambio de uso de la tierra y la silvicultura. (OECD, consultado en febrero 2025) Además, la OCDE destaca que la agricultura sigue siendo un sector altamente subsidiado, con transferencias netas que superaron los USD 536 mil millones anuales entre 2017 y 2019 en

54 países monitoreados. Más de la mitad de estos fondos se asignan a fertilizantes e industrias con alta intensidad de emisiones de GEI, como la ganadería y la producción de arroz, lo que exacerba aún más las emisiones y las externalidades ambientales.

Al mismo tiempo, las emisiones de CH₄ están vinculadas predominantemente al sector agrícola, en particular a través de la fermentación entérica y la descomposición del estiércol. India, como el tercer mayor emisor mundial de metano, genera una parte sustancial de sus emisiones de CH₄ a partir del cultivo de arroz, dado su papel como uno de los principales productores del mundo. Sin embargo, las emisiones de metano también provienen de la industria de los hidrocarburos, y China —el mayor emisor de CH₄ del mundo— genera una parte significativa de esta industria a partir de la minería de carbón. Estados Unidos, que ocupa el segundo lugar en emisiones globales de metano, produce principalmente CH₄ a través de la extracción de gas natural, mientras que Rusia, un exportador clave de gas natural y petróleo, contribuye significativamente a las emisiones de metano a pesar de tener una huella agrícola relativamente menor.

Más allá de la agricultura, las emisiones industriales y relacionadas con la energía siguen siendo dominantes. En 2022, las industrias manufactureras representaron hasta el 40% de las emisiones globales de CO₂, equivalentes a aproximadamente 16 gigatoneladas (Gt) por año, (OECD, consultado en febrero 2025) mientras que el sector del transporte fue responsable del 23% de las emisiones globales de CO₂. (ITF, consultado en febrero 2025) Estos hallazgos son consistentes con los resultados de este estudio, que destacan que las emisiones de CO₂ se originan principalmente en los sectores energético, industrial y de transporte. Países como Japón y Alemania, que ocupan el quinto y sexto lugar entre los mayores emisores del mundo, siguen estando muy industrializados y dependen de los combustibles fósiles en sus sectores de transporte, lo que refuerza su importante huella de carbono.

Mitigar estas emisiones requiere un cambio estratégico en el apoyo financiero y los marcos de políticas, particularmente en el sector agrícola. Redireccionar los subsidios hacia la innovación, las prácticas agrícolas sostenibles y el desarrollo de servicios agrícolas puede reducir significativamente las emisiones, fomentando una transición hacia sistemas alimentarios más resilientes, sostenibles y productivos. Procesos clave como la fermentación entérica, la aplicación de fertilizantes a base de nitrógeno y la quema de biomasa deben abordarse con avances tecnológicos y prácticas agrícolas eficientes para reducir eficazmente las emisiones de CH₄ y N₂O.

Paralelamente, las emisiones de GEI procedentes de la energía, la industria y el transporte exigen medidas decisivas. La adopción de energía renovable, medidas de mayor eficiencia y una menor dependencia de los combustibles fósiles son cruciales para mitigar la huella de carbono y garantizar al mismo tiempo la resiliencia ambiental a largo plazo. Un enfoque integral y coordinado entre estos sectores es esencial para lograr un progreso significativo en la reducción de las emisiones globales y la mitigación de los impactos del cambio climático

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Este estudio proporciona una evaluación integral de las emisiones de GEI (N_2O , CH_4 y CO_2) en 108 países durante un período de 30 años (1990-2020), ofreciendo información crucial sobre las disparidades regionales y temporales en las tendencias de emisiones.

- El análisis destaca el predominio global de las emisiones de CO_2 , impulsadas por la combustión de combustibles fósiles y las actividades industriales, al tiempo que enfatiza el potencial desproporcionado de calentamiento del CH_4 y el N_2O . Estos gases, aunque contribuyen en menor medida, plantean desafíos urgentes debido a su mayor forzamiento radiactivo y persistencia en las economías agrícolas. Los resultados indican que las emisiones de CH_4 y N_2O están influenciadas predominantemente por las prácticas agrícolas, como la ganadería, el uso de fertilizantes y el cambio de uso de la tierra, lo que hace que las intervenciones específicas en estas áreas sean fundamentales para una mitigación efectiva.
- El estudio subraya las desigualdades geográficas, donde un pequeño número de países (por ejemplo, China, Estados Unidos e India) dominan las emisiones globales, mientras que las regiones en desarrollo, en particular en África y América Latina, muestran trayectorias ascendentes impulsadas por el crecimiento de la población y el desarrollo económico. En particular, las emisiones de América Latina están en gran medida vinculadas a su sector agrícola, mientras que el aumento de África está asociado con el cambio de uso de la tierra y la expansión de la demanda de energía en gran parte por su crecimiento poblacional. Comprender estos factores regionales es esencial para adaptar las políticas de mitigación.
- La integración del análisis de las emisiones totales y las emisiones per cápita revela cómo el tamaño de la población diluye las cifras per cápita en los países con altas emisiones, enmascarando su impacto absoluto. Por ejemplo, China ocupa uno de los puestos más bajos en emisiones per cápita a pesar de ser el mayor emisor total, mientras que las naciones más pequeñas con alta actividad agrícola o industrial exhiben emisiones per cápita desproporcionadamente altas. Esto subraya la importancia de considerar ambas métricas al diseñar políticas climáticas.
- El uso de métodos de agrupamiento resalta los patrones de emisiones comunes, entre los países en grupos de emisiones altas, medias y bajas, lo cual puede contribuir a diseñar

estrategias de mitigación específicas para cada región". Por ejemplo, el análisis de agrupamiento identificó que los grandes emisores de N₂O tienden a ser economías centradas en la agricultura; en cambio las emisiones de CH₄ son más frecuentes en países con importantes actividades de producción ganadera o extracción de combustibles fósiles, mientras que las emisiones de CO₂ se asocian a países altamente industrializados. Esta segmentación proporciona un enfoque más estructurado para la reducción de emisiones.

- Los resultados refuerzan la necesidad de intervenciones específicas para abordar GEI específicos. Si bien es posible reducir el CO₂ mediante transiciones hacia la energía renovable y la eficiencia energética, abordar el problema del CH₄ y el N₂O requiere innovación agrícola, una mejor gestión de la tierra y reducciones en las emisiones fugitivas de los sistemas energéticos. En concreto, el estudio destaca que los grupos de altas emisiones han mostrado tendencias relativamente estables o crecientes a lo largo del tiempo, mientras que los países de emisiones medias y bajas han demostrado patrones más variables, lo que indica oportunidades para esfuerzos de mitigación diferenciados.
- El estudio destaca la importancia de la cooperación internacional, ya que los principales emisores influyen desproporcionadamente en el calentamiento global, mientras que las economías emergentes enfrentan desafíos para equilibrar el crecimiento y la sostenibilidad. Los países del grupo de emisiones medias, como Brasil y la India, han mostrado aumentos significativos de sus emisiones, lo que indica la necesidad de apoyo internacional específico en la transición hacia economías con bajas emisiones de carbono.
- Ampliar el alcance del análisis para incluir contribuciones específicas de cada sector (por ejemplo, energía, agricultura, transporte, industria,) permitiría recomendaciones de políticas más precisas. Estos conocimientos resaltan la necesidad de contar con estrategias de mitigación específicas para cada sustrato económico, en lugar de enfoques uniformes para todos.
- La incorporación del monitoreo de emisiones en tiempo real utilizando datos satelitales y técnicas avanzadas de aprendizaje automático podría mejorar la precisión de los futuros inventarios de emisiones. Dado que las tendencias históricas revelan fluctuaciones en las emisiones, en particular de CH₄ y N₂O, el seguimiento en tiempo real permitiría respuestas políticas más dinámicas y acciones correctivas inmediatas.

- Explorar los impactos socioeconómicos de las estrategias de mitigación, particularmente en las regiones en desarrollo, es esencial para diseñar políticas equitativas que equilibren el crecimiento económico con los objetivos ambientales. Por ejemplo, países como Paraguay y Camerún han experimentado reducciones de emisiones vinculadas a transiciones políticas o económicas, lo que pone de relieve la compleja relación entre gobernanza, estabilidad económica y acción climática.
- Los trabajos futuros también podrían evaluar el impacto de las políticas climáticas (por ejemplo, el Acuerdo de París, Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la fijación de precios del carbono, Pacto Europeo Verde, Ley del clima de la ONU) en las trayectorias de reducción de emisiones, ofreciendo información sobre la eficacia de los acuerdos globales. El estudio encontró que los países con políticas climáticas fuertes, como los de la UE, muestran tendencias de emisiones más estables o decrecientes, mientras que las naciones sin regulaciones estrictas han mostrado aumentos marcados. Comprender estos impactos de las políticas es crucial para diseñar estrategias climáticas más efectivas.
- Los hallazgos resaltan la urgencia de acelerar la descarbonización global a través de una transición energética que integre la innovación tecnológica, prácticas agrícolas sostenibles e inversiones en sistemas energéticos con bajas emisiones de carbono. Si bien algunos países con altas emisiones, como China y Estados Unidos, tienen la capacidad de implementar cambios tecnológicos a gran escala, las economías emergentes requieren apoyo externo para realizar una transición efectiva. Cerrar esta brecha será crucial para lograr reducciones de las emisiones globales.
- Para abordar el aumento de las emisiones en los países en desarrollo se necesita apoyo financiero y tecnológico, fomentando una transición justa hacia la energía limpia y asegurando al mismo tiempo la resiliencia económica. El estudio identificó variaciones significativas dentro del grupo de bajas emisiones, y algunos países experimentaron aumentos graduales en lugar de disminuciones, lo que pone de relieve la necesidad de una intervención temprana antes de que las trayectorias de las emisiones se intensifiquen.
- Los resultados evidencian que el crecimiento económico, incluso acompañado de una alta participación de energías renovables en la matriz energética, no garantiza una reducción efectiva de las emisiones de gases de efecto invernadero. Países como Brasil han

incrementado significativamente sus emisiones, mientras que otros como Nueva Zelanda y Canadá continúan teniendo una alta contribución debido a la intensidad de sus actividades productivas. Esto pone de manifiesto que las energías renovables, aunque necesarias, no son suficientes por sí solas. Se requiere un enfoque integral que combine eficiencia energética, transformación productiva, regulación efectiva y cambios en los patrones de consumo para lograr una reducción sostenible de las emisiones a nivel global.

- Las estrategias de mitigación personalizadas que aborden los factores impulsores regionales y sectoriales (por ejemplo, crecimiento económico, patrones de consumo, regulación, comercio internacional) son fundamentales, con especial atención en las transiciones energéticas, la agricultura sostenible y la gestión del uso del suelo. El uso de técnicas de agrupamiento ofrece a los responsables políticos un marco útil para una acción climática específica, al alinear los perfiles de emisiones con soluciones. Las investigaciones futuras deberían centrarse en las emisiones sectoriales, el monitoreo en tiempo real y los efectos de las estrategias de mitigación, con el objetivo de avanzar hacia el cumplimiento de los objetivos globales de cero emisiones netas.
- Este estudio sirve como base fundamental para la acción climática global y regional, proporcionando una hoja de ruta para identificar prioridades clave para reducir las emisiones de GEI y mitigar el cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, K. R.; Shahbaz, M.; Zhang, J.; Irfan, M.; Alvarado, R. Analyze the Environmental Sustainability Factors of China: The Role of Fossil Fuel Energy and Renewable Energy. *Renew. Energy* **2022**, *187*, 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.066>.
- Adelekan, O. A.; Ilugbusi, B. S.; Adisa, O.; Obi, O. C.; Awonuga, K. F.; Asuzu, O. F.; Ndubuisi, N. L. Energy Transition Policies: A Global Review of Shifts Towards Renewable Sources. *Eng. Sci. Technol. J.* **2024**, *5* (2), 272–287. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i2.752>.
- Akilli, A. Impact of Covid-19 on Greenhouse Gas Emission in OECD Countries: K-Means Method. In *World Politics in the Age of Uncertainty: The Covid-19 Pandemic*. Springer Nature Switzerland **2023**, *2*, 227–246. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39611-3_17.
- All for Health, Health for All: investment case 2025–2028.* <https://www.who.int/publications/i/item/9789240095403> (accessed 2024-12-20).
- Andrzejuk, A. Classification of Agricultural Emissions Among OECD Countries with Unsupervised Techniques. *Zesz. Nauk. Szk. Głów. Gospod. Wiejs. Warsz., Probl. Rol. Światowego* **2018**, *18*(4), 80–91. <https://doi.org/10.22630/PRS.2018.18.4.99>
- Berry, E. X. The Impact of Human CO₂ on Atmospheric CO₂. *Sci. Clim. Change* **2021**.
- Barrera, M.A.; Sabbatella, I.; Serrani, E.; Macroeconomic barriers to energy transition in peripheral countries: The case of Argentina. *Energy Policy* **2022**, *168*, 0301–4215. DOI: [10.1016/j.enpol.2022.113117](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113117).
- Bock, H.-H. Clustering Methods: A History of k-Means Algorithms. In *Selected Contributions in Data Analysis and Classification*; Brito, P., Cucumel, G., Bertrand, P., De Carvalho, F., Eds.; Bock, H.-H., Gaul, W., Vichi, M., Arabie, Ph., Baier, D., Critchley, F., Decker, R., Diday, E., Greenacre, M., Lauro, C., Meulman, J., Monari, P., Nishisato, S., Ohsumi, N., Opitz, O., Ritter, G., Schader, M., Weihs, C., Series Eds.; Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, **2007**; pp 161–172. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73560-1_15.
- Cachola, C. D. S.; & Souza, J. F. T. D. Cluster and Regression Analyses to Model Global Emissions. *International Journal of Global Warming* **2024**, *34*(4), 300–313. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2024.142863>.
- Cai, B.; Huang, G.; Samadiani, N.; Li, G.; Chi, C.-H. Efficient Time Series Clustering by Minimizing Dynamic Time Warping Utilization. *IEEE Access* **2021**, *9*, 46589–46599. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3067833>.

- China 2030: Building a Modern, Harmonious, and Creative High-Income Society.* World Bank, <https://www.worldbank.org>, (consultado en 2024)
- Chomjinda, J.; Piladaeng, J.; Kulthon, T.; & Thongnim, P. Green Clustering Analyzing Logistics Performance and Carbon Emissions with K-Means and Gaussian Mixture Models. *ITC-CSCC* **2024**, 1-6. IEEE. [10.1109/ITC-CSCC62988.2024.10628277](https://doi.org/10.1109/ITC-CSCC62988.2024.10628277).
- Climate change: greenhouse gases causing global warming, European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20230316STO77629/cambio-climatico-gases-de-efecto-invernadero-que-causan-el-calentamiento-global>.
- Global climate change, Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA. Consultado en **2023**, https://climate.nasa.gov/what-is-climate-change/#what_is_climate_change.
- Global climate change, Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA. Consultado en **2023**, https://climate.nasa.gov/what-is-climate-change/#what_is_climate_change.
- Dadashi, Z.; Mahmoudi, A.; Rashidi, S. Capacity and Strategies of Energy Production from Renewable Sources in Arab Countries until 2030: A Review from Renewable Energy Potentials to Environmental Issues. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2022**, *29* (32), 47837–47866. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20544-z>.
- Darby, S. J.; Hammond, G. P.; Wu, J. Briefing: Stocktaking Global Warming: The Outcomes of the 2023 Dubai Climate Summit (COP28). *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy* **2024**, *177* (5), 193–204. <https://doi.org/10.1680/jener.24.00005>.
- DataBank | The World Bank. <https://databank.worldbank.org> / (consultado en 2024).
- Embassy of Paraguay. *History and Economy*. <https://www.embapar.ru/es/historia?utm> (accessed February 2025).
- Encyclopædia Britannica. *Paraguay*. <https://www.britannica.com/place/Paraguay> (accessed February **2025**).
- Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W.; Andrew, R. M.; Gregor, L.; Hauck, J.; Le Quéré, C.; Luijkx, I. T.; Olsen, A.; Peters, G. P.; Peters, W.; Pongratz, J.; Schwingshakel, C.; Sitch, S.; Canadell, J. G.; Ciais, P.; Jackson, R. B.; Alin, S. R.; Alkama, R.; Arneth, A.; Arora, V. K.; Bates, N. R.; Becker, M.; Bellouin, N.; Bittig, H. C.; Bopp, L.; Chevallier, F.; Chini, L. P.; Cronin, M.; Evans, W.; Falk, S.; Feely, R. A.; Gasser, T.; Gehlen, M.; Gkritzalis, T.; Gloege, L.; Grassi, G.; Gruber, N.; Gürses, Ö.; Harris, I.; Hefner, M.; Houghton, R. A.; Hurt, G. C.; Iida, Y.; Ilyina, T.; Jain, A. K.; Jersild, A.; Kadono, K;

- Kato, E.; Kennedy, D.; Klein Goldewijk, K.; Knauer, J.; Korsbakken, J. I.; Landschützer, P.; Lefèvre, N.; Lindsay, K.; Liu, J.; Liu, Z.; Marland, G.; Mayot, N.; McGrath, M. J.; Metzl, N.; Monacci, N. M.; Munro, D. R.; Nakaoka, S.-I.; Niwa, Y.; O'Brien, K.; Ono, T.; Palmer, P. I.; Pan, N.; Pierrot, D.; Pocock, K.; Poulter, B.; Resplandy, L.; Robertson, E.; Rödenbeck, C.; Rodriguez, C.; Rosan, T. M.; Schwinger, J.; Séférian, R.; Shutler, J. D.; Skjelvan, I.; Steinhoff, T.; Sun, Q.; Sutton, A. J.; Sweeney, C.; Takao, S.; Tanhua, T.; Tans, P. P.; Tian, X.; Tian, H.; Tilbrook, B.; Tsujino, H.; Tubiello, F.; Van Der Werf, G. R.; Walker, A. P.; Wanninkhof, R.; Whitehead, C.; Willstrand Wranne, A.; Wright, R.; Yuan, W.; Yue, C.; Yue, X.; Zaehle, S.; Zeng, J.; Zheng, B. Global Carbon Budget 2022. *Earth Syst. Sci. Data* **2022**, *14* (11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- Gallo, C.; Faccilongo, N.; La Sala, P. Clustering Analysis of Environmental Emissions: A Study on Kyoto Protocol's Impact on Member Countries. *J. Clean. Prod.* **2018**, *172*, 3685–3703. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.194>.
- Ganopolski, A.; Climate Change Models. Encyclopedia of Ecology (Second Edition). **2019**, 48-57, 9780444641304, DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11166-2.
- Guerry, A.; A reflection on some legal aspects of decision control in the energy transition process: a comparison of France and Germany. Elgaronline. 2016, 10, 194–218. DOI:10.4337/9781785368462.00017.
- Glavič, P.; Pintarič, Z. N.; Levičnik, H.; Dragojlović, V.; Bogataj, M. Transitioning towards Net-Zero Emissions in Chemical and Process Industries: A Holistic Perspective. *Processes* **2023**, *11* (9), 2647. <https://doi.org/10.3390/pr11092647>.
- Govender, P.; Sivakumar, V. Application of K-Means and Hierarchical Clustering Techniques for Analysis of Air Pollution: A Review (1980–2019). *Atmos. Pollut. Res.* **2020**, *11* (1), 40–56. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.009>.
- Han, Y.; Wang, Y.; Wang, X.; Huang, J.; & Ma, W. Exploring the Greenhouse Gas Emissions Inventory and Driving Mechanisms of Municipal Solid Waste in China. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2024**, *105*, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107428>
- Hassan, Q.; Viktor, P.; J. Al-Musawi, T.; Mahmood Ali, B.; Algburi, S.; Alzoubi, H. M.; Khudhair Al-Jiboory, A.; Zuhair Sameen, A.; Salman, H. M.; Jaszcjur, M. The Renewable Energy Role in the Global Energy Transformations. *Renew. Energy Focus* **2024**, *48*, 100545. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100545>.
- Hernández-Pérez, L. G.; Alsuhaihani, A. S.; Ponce-Ortega, J. M.; & El-Halwagi, M. M. Multi-Objective Optimization of Ammonia and Methanol Production Processes Considering

- Uncertain Feedstock Compositions of Shale/Natural Gas. *Chem. Eng. Res. Des.* **2022**, 187, 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.041>
- Höhne, N., Gidden, MJ, den Elzen, M. *et al.* Una oleada de objetivos de cero emisiones netas abre una ventana para el cumplimiento del Acuerdo de París. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 820–822 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01142-2>
- IEA. *Countries and Regions, Asia-Pacific, China, China's Energy System.* https://www.iea.org/countries/china?language=es&utm_, <https://www.iea.org/countries/china/renewables> (accessed February 2025).
- IEA. *Countries and Regions, North America, North America's Energy System.* <https://www.iea.org/regions/north-america> (accessed February 2025).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2014: Synthesis Report*; Pachauri, R. K., Mayer, L., , Eds.; Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland, 2015.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Ed.; Cambridge University Press: Cambridge, 2023; pp 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, 1st ed.; Cambridge University Press, 2023; pp. 3–48. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>.
- ITF. *Transport Outlook 2023*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en> (accessed 2025-02-22).
- Jackson, R. B.; Saunois, M.; Bousquet, P.; Canadell, J. G.; Poulter, B.; Stavert, A. R.; Bergamaschi, P.; Niwa, Y.; Segers, A.; Tsuruta, A. Increasing Anthropogenic Methane Emissions Arise Equally from Agricultural and Fossil Fuel Sources. *Environ. Res. Lett.* **2020**, 15 (7), 071002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abqed2>.
- Jones, M. W.; Peters, G. P.; Gasser, T.; Andrew, R. M.; Schwingshackl, C.; Gütschow, J.; Houghton, R. A.; Friedlingstein, P.; Pongratz, J.; Le Quéré, C. National Contributions to Climate Change Due to Historical Emissions of Carbon Dioxide, Methane, and Nitrous Oxide since 1850. *Sci. Data* **2023**, 10 (1), 155. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02041-1>.

- Khaleel, M.; Yusupov, Z.; Alderoubi, N.; Abdul_jabbar, R. L.; Elmnifi, M.; Nassar, Y.; Majdi, H. S.; Habeeb, L. J.; Abulifa, S. Evolution of Emissions: The Role of Clean Energy in Sustainable Development. *CiS* **2024**, *12* (2), 122–135. <https://doi.org/10.56578/cis120203>.
- Kolasa-Więcek, A. The Use of Cluster Analysis in the Classification of Similarities in Variables Associated with Agricultural Greenhouse Gases Emissions in OECD Countries. *Wieś i Rolnictwo* **2013**, No. 1 (158), 59–66. <https://doi.org/10.53098/wir.2013.1.158/03>.
- Le Quéré, C.; Peters, G. P.; Friedlingstein, P.; Andrew, R. M.; Canadell, J. G.; Davis, S. J.; Jackson, R. B.; Jones, M. W. Fossil CO₂ Emissions in the Post-COVID-19 Era. *Nat. Clim. Chang.* **2021**, *11* (3), 197–199. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01001-o>.
- Leng, P.; Li, Z.; Zhang, Q.; Koschorreck, M.; Li, F.; Qiao, Y.; Xia, J. Deciphering Large-Scale Spatial Pattern and Modulators of Dissolved Greenhouse Gases (CO₂, CH₄, and N₂O) along the Yangtze River, China. *J. Hydrol.* **2023**, *623*, 129710. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129710>.
- Leng, Y. J.; Zhang, H.; Li, X. S.; A novel evaluation method for renewable energy development based on improved sparrow search algorithm and projection pursuit model. *Expert Systems with Applications*. **2024**, *244*, 0957-4147. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122991.
- Li, L.; Awada, T.; Shi, Y.; Jin, V. L.; & Kaiser, M. Global Greenhouse Gas Emissions From Agriculture: Pathways to Sustainable Reductions. *Glob Chang Biol* **2025**, *31*(1), e70015. <https://doi.org/10.1111/gcb.70015>
- Muluneh, M. G. Impact of Climate Change on Biodiversity and Food Security: A Global Perspective—a Review Article. *Agric & Food Secur* **2021**, *10* (1), 36. <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00318-5>.
- Muralikrishna, I.V.; Manickam, V.; Chapter Four - Environmental Policies and Legislation. Environmental Management. **2017**, 37-55, 9780128119891. DOI: 10.1016/B978-0-12-811989-1.00004-X.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. A Research Agenda Toward Atmospheric Methane Removal; The National Academies Press: Washington, DC, **2024**. <https://doi.org/10.17226/27157>.
- Nisbet, E. G.; Dlugokencky, E. J.; Fisher, R. E.; France, J. L.; Lowry, D.; Manning, M. R.; Michel, S. E.; Warwick, N. J. Atmospheric Methane and Nitrous Oxide: Challenges

- Alongthe Path to Net Zero. *Phil. Trans. R. Soc. A.* **2021**, *379* (2210), 20200457. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0457>.
- OECD. *Climate Policy Leadership in an Interconnected World: What Role for Border Carbon Adjustments?* OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/8008e7f4-en> (accessed **2025-02-22**).
- OECD. *Supporting Industrial Decarbonization*, Free publication. <https://www.oecd.org/en/topics/decarbonising-industry.html> (accessed **2025-02-22**).
- People's Republic of China: Selected Issues*, International Monetary Fund (IMF). <https://www.imf.org> (accessed **2024-11**).
- Qerimi, Q.; Sergi, B. S. The Case for Global Regulation of Carbon Capture and Storage and Artificial Intelligence for Climate Change. *Int. J. Greenhouse Gas Control* **2022**, *120*, 103757. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103757>.
- Rabbi, M. F.; Kovács, S. Quantifying Global Warming Potential Variations from Greenhouse Gas Emission Sources in Forest Ecosystems. *Carbon Res.* **2024**, *3* (1), 70. <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00156-7>.
- Rahman, A.; Murad, S. M. W.; Mohsin, A. K. M.; Wang, X. Does Renewable Energy Proactively Contribute to Mitigating Carbon Emissions in Major Fossil Fuels Consuming Countries? *J. Clean. Prod.* **2024**, *452*, 142113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142113>.
- Rajamani, L.; Werksman, J. The Legal Character and Operational Relevance of the Paris Agreement's Temperature Goal. *Phil. Trans. R. Soc. A.* **2018**, *376* (2119), 20160458. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0458>.
- Reay, D. S.; Davidson, E. A.; Smith, K. A.; Smith, P.; Melillo, J. M.; Dentener, F.; Crutzen, P. J. Global Agriculture and Nitrous Oxide Emissions. *Nature Clim. Change* **2012**, *2* (6), 410–416. <https://doi.org/10.1038/nclimate1458>.
- Ripple, W. J.; Wolf, C.; Gregg, J. W.; Rockström, J.; Newsome, T. M.; Law, B. E.; Marques, L.; Lenton, T. M.; Xu, C.; Huq, S.; Simons, L.; King, S. D. A. The 2023 State of the Climate Report: Entering Uncharted Territory. *BioScience* **2023**, *73* (12), 841–850. <https://doi.org/10.1093/biosci/biado80>.
- Sadai, S.; Spector, R. A.; DeConto, R.; Gomez, N. The Paris Agreement and Climate Justice: Inequitable Impacts of Sea Level Rise Associated With Temperature Targets. *Earth's Future* **2022**, *10* (12), e2022EF002940. <https://doi.org/10.1029/2022EF002940>.

Saunois, M.; Stavert, A. R.; Poulter, B.; Bousquet, P.; Canadell, J. G.; Jackson, R. B.; Raymond, P. A.; Dlugokencky, E. J.; Houweling, S.; Patra, P. K.; Ciais, P.; Arora, V. K.; Bastviken, D.; Bergamaschi, P.; Blake, D. R.; Brailsford, G.; Bruhwiler, L.; Carlson, K. M.; Carroll, M.; Castaldi, S.; Chandra, N.; Crevoisier, C.; Crill, P. M.; Covey, K.; Curry, C. L.; Etiope, G.; Frankenberg, C.; Gedney, N.; Hegglin, M. I.; Höglund-Isaksson, L.; Hugelius, G.; Ishizawa, M.; Ito, A.; Janssens-Maenhout, G.; Jensen, K. M.; Joos, F.; Kleinen, T.; Krummel, P. B.; Langenfelds, R. L.; Laruelle, G. G.; Liu, L.; Machida, T.; Maksyutov, S.; McDonald, K. C.; McNorton, J.; Miller, P. A.; Melton, J. R.; Morino, I.; Müller, J.; Murguia-Flores, F.; Naik, V.; Niwa, Y.; Noce, S.; O'Doherty, S.; Parker, R. J.; Peng, C.; Peng, S.; Peters, G. P.; Prigent, C.; Prinn, R.; Ramonet, M.; Regnier, P.; Riley, W. J.; Rosentreter, J. A.; Segers, A.; Simpson, I. J.; Shi, H.; Smith, S. J.; Steele, L. P.; Thornton, B. F.; Tian, H.; Tohjima, Y.; Tubiello, F. N.; Tsuruta, A.; Viovy, N.; Voulgarakis, A.; Weber, T. S.; Van Weele, M.; Van Der Werf, G. R.; Weiss, R. F.; Worthy, D.; Wunch, D.; Yin, Y.; Yoshida, Y.; Zhang, W.; Zhang, Z.; Zhao, Y.; Zheng, B.; Zhu, Q.; Zhu, Q.; Zhuang, Q. The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth Syst. Sci. Data* **2020**, *12* (3), 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.

Symon Bobek, Michal Kuk, Improving cluster analysis with explainable AI and multidimensional cluster prototyping. **2022**, 10, 2169-3536, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3208957.

Steg, L.; Perlaviviute, G.; van der Werff, E.; Understanding the human dimensions of a sustainable energy transition._Sec. Personality and Social Psychology. **2015**, 6.DOI:10.3389/fpsyg.2015.00805.

Suddick, E. C.; Whitney, P.; Townsend, A. R.; Davidson, E. A. The Role of Nitrogen in Climate Change and the Impacts of Nitrogen–Climate Interactions in the United States: Foreword to Thematic Issue. *Biogeochemistry* **2013**, *114* (1–3), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9795-z>.

Taenyun Kim, Maria D. Molina, Minji Rheu, One AI does not fit all: A cluster analysis of how ordinary citizens perceive AI roles. **2023**, 1-20, 20, DOI:10.1145/3544548.3581340.

United Nations, Climate Action, accessed 2023. Renewable energy. <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>.

Wei, T.; Dong, W.; Yan, Q.; Chou, J.; Yang, Z.; Tian, D. Developed and Developing World Contributions to Climate System Change Based on Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide Emissions. *Adv. Atmos. Sci.* **2016**, *33* (5), 632–643. <https://doi.org/10.1007/s00376-015-5141-4>.

- Yi, J.; Dai, S.; Li, L.; Cheng, J.; How does digital economy development affect renewable energy innovation?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2024**, 192, 1364-0321, DOI: [10.1016/j.rser.2023.114221](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114221).
- Zhang, W.; Li, H.; Xiao, Q.; Li, X. Urban Rivers Are Hotspots of Riverine Greenhouse Gas (N₂O, CH₄, CO₂) Emissions in the Mixed-Landscape Chaohu Lake Basin. *Water Res.* **2021**, 189, 116624. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116624>.
- Zheng, Y.; Zhang, Q.; Tong, D.; Davis, S. J.; Caldeira, K. Climate Effects of China's Efforts to Improve Its Air Quality. *Environ. Res. Lett.* **2020**, 15 (10), 104052. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9e21>.

APENDICE A

A 1. Portada del Artículo Científico Publicado

I&EC research
Industrial & Engineering Chemistry Research
pubs.acs.org/IECR

Article

Greenhouse Gas Emission Clustering: Advancing Net Zero Goals through Data-Driven Analysis

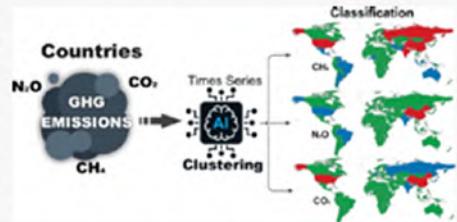
Published as part of Industrial & Engineering Chemistry Research *special issue* "Net Zero Technologies".

Yazmin Trejo-Jerónimo, Francisco Javier López-Flores, César Ramírez-Márquez, Luis Fernando Lira-Barragán, and José María Ponce-Ortega*

 Cite This: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c04884>  Read Online

ACCESS |  Metrics & More |  Article Recommendations |  Supporting Information

ABSTRACT: This study analyzes greenhouse gas (GHG) emissions (carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and nitrous oxide (N_2O)) from 108 countries (1990–2020) using k-means clustering with a Dynamic Time Warping (DTW) metric, identifying high, medium, and low emission clusters based on total and per capita emissions. CO_2 , driven by fossil fuel use in energy, industry, and transportation, dominates emissions, with China and the U.S. accounting for 44% globally. Methane from agriculture and fossil fuel extraction disproportionately affects India, Brazil, and Turkmenistan, while N_2O , linked to nitrogen-based fertilizers, shows high per capita contributions from Australia, New Zealand, and parts of Africa. Tailored mitigation strategies addressing regional and sector-specific drivers are critical, emphasizing energy transitions, sustainable agriculture, and land-use management. Clustering provides policymakers with a framework for targeted climate action, aligning emission profiles with solutions. Future research should focus on sectoral emissions, real-time monitoring, and mitigation impacts to advance global net-zero goals.



APENDICE B

Tabla B1. Posición y contribución porcentual global de cada país según sus emisiones de N₂O tanto totales como per cápita.

PAÍS	EMISIONES N ₂ O PER CÁPITA			EMISIONES N ₂ O TOTALES		
	POSICIÓN GLOBAL DE CADA PAÍS SEGÚN SUS EMISIONES	EMISIONES N ₂ O PER CÁPITA EN 30 AÑOS TM	% EMISIONES SOBRE EL TOTAL	POSICIÓN GLOBAL DE CADA PAÍS SEGÚN SUS EMISIONES	EMISIONES N ₂ O TOTALES EN 30 AÑOS KT	% EMISIONES SOBRE EL TOTAL
Afganistán	101	5.29	0.22	82	121472.12	0.16
Argelia	91	7.22	0.30	54	250803.58	0.33
Angola	23	26.71	1.12	33	512874.18	0.68
Argentina	18	32.78	1.37	13	1280150.58	1.69
Armenia	81	8.29	0.35	100	25204.01	0.03
Australia	2	116.07	4.85	5	2359415.81	3.12
Austria	45	16.18	0.68	77	132889.20	0.18
Bahamas	106	2.31	0.10	107	805.23	0.00
Bolivia	30	23.68	0.99	59	225161.62	0.30
Botswana	9	69.46	2.90	80	126452.96	0.17
Brasil	27	24.33	1.02	4	4530106.20	5.99
Bulgaria	40	17.42	0.73	75	135416.06	0.18
Camerón	4	94.92	3.96	7	1692831.89	2.24
Canadá	14	41.39	1.73	12	1334287.74	1.76
República Centroafricana	5	83.14	3.47	45	335267.78	0.44
Chad	13	43.99	1.84	34	467048.32	0.62
Chile	61	12.49	0.52	63	202129.31	0.27
China	72	10.29	0.43	1	13419151.74	17.74
Colombia	51	14.82	0.62	27	614989.87	0.81

Congo	67	10.94	0.46	97	41522.11	0.05
Croacia	44	16.46	0.69	91	71988.78	0.10
Cuba	71	10.72	0.45	83	119095.95	0.16
República Democrática de Congo	89	7.50	0.31	36	421518.46	0.56
Dinamarca	17	34.40	1.44	66	186609.92	0.25
Ecuador	68	10.83	0.45	70	148812.45	0.20
Egipto	88	7.60	0.32	28	608494.23	0.80
Estonia	15	38.60	1.61	93	53250.82	0.07
Etiopía	59	12.78	0.53	16	1021708.73	1.35
Finlandia	16	37.77	1.58	64	198578.48	0.26
Francia	29	23.71	0.99	10	1476612.27	1.95
Gabón	82	8.25	0.34	103	12755.78	0.02
Alemania	39	18.31	0.76	9	1496158.48	1.98
Ghana	97	6.02	0.25	73	135973.61	0.18
Grecia	42	16.77	0.70	67	180520.42	0.24
Guatemala	77	8.73	0.36	84	113768.94	0.15
Guinea	57	13.47	0.56	78	130129.73	0.17
Haití	103	4.72	0.20	96	42845.44	0.06
Honduras	73	10.12	0.42	90	75910.88	0.10
Hungría	33	20.69	0.86	60	208981.50	0.28
India	99	5.58	0.23	3	6437587.15	8.51
Indonesia	92	7.19	0.30	8	1656658.08	2.19
Irán	55	13.56	0.57	17	972806.50	1.29
Irak	102	4.95	0.21	74	135828.96	0.18
Irlanda	7	75.60	3.16	48	310614.35	0.41
Italia	64	11.65	0.49	24	675653.35	0.89
Jamaica	100	5.52	0.23	102	14576.35	0.02

Japón	98	5.62	0.23	23	710691.76	0.94
Kazajistán	32	20.78	0.87	44	338277.66	0.45
Kenia	65	11.27	0.47	37	413072.56	0.55
Letonia	20	29.44	1.23	92	65264.88	0.09
Liberia	107	1.92	0.08	105	6529.69	0.01
Libia	79	8.38	0.35	95	47060.01	0.06
Lituania	11	49.69	2.07	69	162623.89	0.21
Malasia	74	9.41	0.39	55	244391.15	0.32
Malí	31	20.89	0.87	49	289740.58	0.38
Mauritania	25	25.88	1.08	89	79689.57	0.11
México	63	11.76	0.49	14	1222201.48	1.62
Mongolia	1	125.08	5.22	46	329523.53	0.44
Marruecos	87	7.61	0.32	56	233324.40	0.31
Mozambique	53	13.86	0.58	50	276791.85	0.37
Namibia	10	59.17	2.47	85	112819.73	0.15
Países Bajos	28	23.98	1.00	39	384793.78	0.51
Nueva Zelanda	3	113.05	4.72	35	463277.90	0.61
Níger	48	15.45	0.65	58	231833.08	0.31
Nigeria	96	6.39	0.27	18	920811.54	1.22
Noruega	21	28.75	1.20	76	133770.38	0.18
Omán	95	6.92	0.29	101	20599.80	0.03
Pakistán	80	8.30	0.35	11	1450995.20	1.92
Panamá	66	11.11	0.46	99	36354.27	0.05
Papúa New Guinea	86	7.66	0.32	94	48155.08	0.06
Paraguay	12	48.92	2.04	51	262260.41	0.35
Perú	75	9.37	0.39	52	262200.70	0.35
Filipinas	104	4.19	0.17	42	358969.60	0.47
Polonia	36	20.03	0.84	22	765797.35	1.01

Portugal	70	10.77	0.45	86	110856.38	0.15
Catar	90	7.36	0.31	104	9489.86	0.01
Rumania	49	15.17	0.63	47	323865.45	0.43
Rusia	52	13.90	0.58	6	2026496.62	2.68
Sudán del Sur	6	76.28	3.18	32	572559.90	0.76
Arabia Saudita	83	8.11	0.34	61	202970.94	0.27
Senegal	58	12.88	0.54	71	142665.07	0.19
Serbia	38	18.61	0.78	72	137191.78	0.18
Islas salomón	108	1.29	0.05	108	619.48	0.00
Somalia	34	20.58	0.86	62	202658.10	0.27
Sudáfrica	62	12.21	0.51	30	595943.11	0.79
Corea del sur	85	7.73	0.32	40	369937.94	0.49
España	47	15.50	0.65	25	666859.98	0.88
Sudán	24	25.93	1.08	21	778048.44	1.03
Suecia	35	20.36	0.85	65	187317.83	0.25
Suiza	69	10.78	0.45	88	80968.57	0.11
Siria	93	7.19	0.30	81	125393.68	0.17
Tanzania	46	15.89	0.66	26	640828.00	0.85
Tailandia	76	8.85	0.37	31	577631.92	0.76
Turquía	60	12.59	0.53	19	860814.57	1.14
Turkmenistán	26	25.53	1.07	79	129825.50	0.17
Uganda	78	8.68	0.36	53	253681.00	0.34
Ucrania	43	16.48	0.69	20	791056.88	1.05
Emiratos Árabes Unidos	84	7.76	0.32	98	38974.62	0.05
Reino Unido	37	18.99	0.79	15	1147245.69	1.52
Estados Unidos de América	22	26.96	1.13	2	7886482.23	10.43
Uruguay	8	70.13	2.93	57	232148.88	0.31

Uzbekistán	56	13.50	0.56	41	365424.25	0.48
Vanuatu	41	16.78	0.70	106	3572.63	0.00
Venezuela	50	14.92	0.62	38	387254.34	0.51
Vietnam	94	7.13	0.30	29	598258.66	0.79
Yemen	105	4.16	0.17	87	89488.54	0.12
Zambia	19	30.51	1.27	43	353801.78	0.47
Zimbabwe	54	13.58	0.57	68	167410.69	0.22
TOTAL		2395.18	100		75644985.09	100

Tabla B2. Posición y contribución porcentual global de cada país según sus emisiones de CH₄ tanto totales como per cápita.

PAÍS	EMISIONES CH ₄ PER CÁPITA			EMISIONES CH ₄ TOTALES		
	Posición global de cada país según sus emisiones	EMISIONES CH ₄ PERCAPITA EN 30 AÑOS TM	% EMISIONES SOBRE EL TOTAL	Posición global de cada país según sus emisiones	EMISIONES CH ₄ TOTALES EN 30 AÑOS kt	% EMISIONES CH4 EN TOTAL EN 30 AÑOS
Afganistán	101	15.31	0.22	70	364733.66	0.17
Argelia	24	71.12	1.01	18	2395783.02	1.11
Angola	40	49.19	0.70	43	973170.66	0.45
Argentina	18	98.22	1.40	12	3815357.30	1.77
Armenia	82	23.55	0.34	102	73150.76	0.03
Australia	7	223.69	3.19	9	4576671.97	2.12
Austria	58	33.74	0.48	82	276212.17	0.13
Bahamas	98	16.35	0.23	108	5663.14	0.00
Bolivia	27	66.73	0.95	55	634166.17	0.29
Botswana	20	83.85	1.20	95	152410.04	0.07
Brasil	30	62.93	0.90	5	11694974.05	5.43

Bulgaria	48	38.40	0.55		78	301695.18	0.14
Camerón	68	29.92	0.43		60	505313.20	0.23
Canadá	21	83.20	1.19		15	2703254.74	1.25
República Centroafricana	23	76.60	1.09		77	307947.96	0.14
Chad	19	87.65	1.25		45	960326.67	0.45
Chile	87	22.42	0.32		71	359833.86	0.17
China	86	22.61	0.32		1	29398255.03	13.64
Colombia	39	49.61	0.71		24	2064210.68	0.96
Congo	29	65.19	0.93		85	243169.14	0.11
Croacia	77	25.88	0.37		100	112709.11	0.05
Cuba	64	31.60	0.45		72	351957.13	0.16
República Democrática de Congo	102	15.08	0.22		47	868982.87	0.40
Dinamarca	34	54.54	0.78		79	296177.62	0.14
Ecuador	31	57.84	0.82		49	797561.37	0.37
Egipto	88	21.84	0.31		27	1747744.28	0.81
Estonia	62	32.45	0.46		103	45215.19	0.02
Etiopía	84	23.28	0.33		25	1855415.50	0.86
Finlandia	49	38.11	0.54		91	199536.78	0.09
Francia	60	33.45	0.48		22	2097529.13	0.97
Gabón	8	200.27	2.85		81	282287.23	0.13
Alemania	75	25.98	0.37		21	2121849.09	0.98
Ghana	105	10.33	0.15		86	238418.02	0.11
Grecia	66	30.73	0.44		75	331413.23	0.15
Guatemala	96	17.61	0.25		88	229885.28	0.11
Guinea	67	30.19	0.43		80	296032.13	0.14
Haití	100	15.38	0.22		97	139472.11	0.06
Honduras	70	28.57	0.41		90	208481.13	0.10

Hungría	76	25.94	0.37	84	262236.19	0.12
India	97	16.89	0.24	3	19206752.68	8.91
Indonesia	43	43.72	0.62	6	9880402.34	4.58
Irán	28	66.43	0.95	8	4737938.51	2.20
Irak	38	49.93	0.71	31	1521527.79	0.71
Irlanda	14	119.46	1.70	61	492095.19	0.23
Italia	79	25.33	0.36	32	1474816.84	0.68
Jamaica	104	11.45	0.16	104	30143.57	0.01
Japón	107	7.79	0.11	42	986390.94	0.46
Kazajistán	17	98.88	1.41	28	1618979.74	0.75
Kenia	91	20.25	0.29	50	744058.29	0.35
Letonia	59	33.53	0.48	101	76084.00	0.04
Liberia	108	2.32	0.03	107	7819.53	0.00
Libia	3	292.51	4.17	29	1591717.27	0.74
Lituania	45	41.44	0.59	98	137684.58	0.06
Malasia	51	36.05	0.51	46	927621.55	0.43
Malí	65	31.43	0.45	64	439580.24	0.20
Mauritania	35	54.40	0.78	93	167352.88	0.08
México	50	37.04	0.53	11	3876629.91	1.80
Mongolia	12	130.84	1.86	73	348755.42	0.16
Marruecos	106	10.21	0.15	76	312123.18	0.14
Mozambique	93	19.76	0.28	67	405053.14	0.19
Namibia	22	78.22	1.12	96	149648.41	0.07
Países Bajos	46	41.03	0.58	53	658938.64	0.31
Nueva Zelanda	5	251.98	3.59	40	1032026.46	0.48
Níger	56	34.13	0.49	59	508275.23	0.24
Nigeria	61	32.55	0.46	10	4453910.27	2.07
Noruega	55	34.52	0.49	94	161215.98	0.07

Omán	10	155.53	2.22	62	445138.05	0.21
Pakistán	92	20.24	0.29	13	3539198.02	1.64
Panamá	47	40.40	0.58	99	132376.30	0.06
Papúa New Guinea	54	35.64	0.51	87	231396.47	0.11
Paraguay	11	132.75	1.89	52	721718.77	0.33
Perú	69	28.84	0.41	48	809511.61	0.38
Filipinas	90	20.75	0.30	26	1773753.04	0.82
Polonia	72	27.82	0.40	39	1063714.78	0.49
Portugal	53	35.88	0.51	69	369828.81	0.17
Catar	2	428.29	6.10	58	545281.83	0.25
Rumania	71	28.43	0.41	56	606299.41	0.28
Rusia	15	117.33	1.67	4	17065992.96	7.92
Sudán del Sur	13	126.06	1.80	44	969163.00	0.45
Arabia Saudita	16	109.01	1.55	16	2700612.41	1.25
Senegal	81	24.22	0.35	83	271146.40	0.13
Serbia	37	51.60	0.74	68	381040.66	0.18
Islas salomón	94	19.63	0.28	106	9608.76	0.00
Somalia	33	55.13	0.79	57	547614.12	0.25
Sudáfrica	44	42.12	0.60	23	2074213.05	0.96
Corea del sur	99	15.45	0.22	51	738688.18	0.34
España	74	27.21	0.39	36	1175987.18	0.55
Sudán	41	47.10	0.67	34	1432198.36	0.66
Suecia	85	23.07	0.33	89	210302.52	0.10
Suiza	83	23.34	0.33	92	174989.87	0.08
Siria	26	68.64	0.98	38	1143487.14	0.53
Tanzania	80	24.48	0.35	41	1000413.44	0.46
Tailandia	57	34.01	0.48	19	2218832.23	1.03
Turquía	95	18.59	0.26	35	1271296.13	0.59

Turkmenistán	1	588.76	8.39	14	2947672.43	1.37
Uganda	103	13.98	0.20	66	412905.45	0.19
Ucrania	63	31.65	0.45	30	1537918.36	0.71
Emiratos Árabes Unidos	6	244.48	3.48	37	1167062.34	0.54
Reino Unido	42	44.11	0.63	17	2654586.93	1.23
Estados Unidos de América	25	71.04	1.01	2	20771297.54	9.64
Uruguay	9	196.83	2.81	54	651120.81	0.30
Uzbekistán	36	54.30	0.77	33	1443565.73	0.67
Vanuatu	32	56.98	0.81	105	12284.61	0.01
Venezuela	4	260.03	3.71	7	6674910.82	3.10
Vietnam	78	25.83	0.37	20	2161305.42	1.00
Yemen	89	21.00	0.30	63	440660.87	0.20
Zambia	52	35.96	0.51	65	420058.30	0.19
Zimbabue	73	27.53	0.39	74	343440.50	0.16
TOTAL		7015.48	100		215499339.00	100

Tabla B3. Posición y contribución porcentual global de cada país según sus emisiones de CO₂ tanto totales como per cápita.

PAÍS	EMISIONES CO ₂ PER CÁPITA			EMISIONES CO ₂ TOTALES		
	Posición global de cada país según sus emisiones	EMISIONES CO ₂ PER CÁPITA EN 30 AÑOS tm	% EMISIONES SOBRE EL TOTAL	Posición global de cada país según sus emisiones	EMISIONES CO ₂ TOTALES EN 30 AÑOS kt	% DEL TOTAL DE EMISIONES EN 30 AÑOS
Afganistán	97	5.37	0.03	86	149452.93	0.02
Argelia	56	94.91	0.61	35	3278598.50	0.41
Angola	77	27.52	0.18	63	572379.99	0.07

Argentina	50	115.16	0.73	28	4528824.40	0.56
Armenia	64	56.18	0.36	84	177109.79	0.02
Australia	4	524.42	3.35	16	10876835.30	1.35
Austria	22	246.38	1.57	40	2031099.50	0.25
Bahamas	32	191.26	1.22	96	65836.10	0.01
Bolivia	69	42.12	0.27	69	407074.60	0.05
Botswana	59	70.69	0.45	88	137978.31	0.02
Brasil	63	56.95	0.36	18	10698529.80	1.33
Bulgaria	31	191.64	1.22	50	1491656.80	0.19
Cameron	89	11.19	0.07	80	198937.10	0.02
Canadá	5	490.85	3.13	7	15939392.30	1.98
República Centroafricana	107	1.51	0.01	107	6092.30	0.00
Chad	103	2.51	0.02	103	27618.07	0.00
Chile	53	112.88	0.72	42	1867707.70	0.23
China	42	144.32	0.92	1	191755756.20	23.81
Colombia	66	47.82	0.31	41	2001078.00	0.25
Congo	73	35.19	0.22	89	135191.63	0.02
Croacia	46	129.13	0.82	64	562097.70	0.07
Cuba	57	73.88	0.47	62	823341.00	0.10
República Democrática de Congo	108	1.34	0.01	95	77301.02	0.01
Dinamarca	18	284.76	1.82	46	1538683.30	0.19
Ecuador	61	63.85	0.41	61	903201.20	0.11
Egipto	62	59.94	0.38	26	4954009.20	0.62
Estonia	8	390.54	2.49	65	543149.72	0.07
Etiopía	104	2.48	0.02	78	219873.00	0.03
Finlandia	11	324.09	2.07	43	1702531.40	0.21
Francia	36	172.47	1.10	17	10812121.90	1.34

Gabón	49	117.88	0.75	85	171644.35	0.02
Alemania	14	305.50	1.95	6	24971744.60	3.10
Ghana	91	10.54	0.07	76	263322.26	0.03
Grecia	24	238.16	1.52	38	2573052.10	0.32
Guatemala	80	24.96	0.16	73	335737.00	0.04
Guinea	94	6.41	0.04	97	63211.10	0.01
Haití	95	6.37	0.04	98	60631.15	0.01
Honduras	78	26.87	0.17	79	211657.30	0.03
Hungría	38	162.21	1.04	44	1639333.70	0.20
India	74	35.14	0.22	4	42045842.00	5.22
Indonesia	67	47.09	0.30	13	11078397.90	1.38
Irán	33	185.92	1.19	10	13552515.50	1.68
Irak	51	114.76	0.73	34	3292943.40	0.41
Irlanda	16	288.06	1.84	57	1194050.40	0.15
Italia	27	212.81	1.36	12	12373592.50	1.54
Jamaica	54	102.60	0.65	75	271374.30	0.03
Japón	17	284.79	1.82	5	36090686.70	4.48
Kazajistán	9	366.49	2.34	24	5987486.00	0.74
Kenia	92	8.99	0.06	72	343154.60	0.04
Letonia	47	120.60	0.77	74	273497.40	0.03
Liberia	96	6.14	0.04	104	21694.82	0.00
Libia	19	258.00	1.65	52	1450278.80	0.18
Lituania	45	130.70	0.83	67	432946.20	0.05
Malasia	34	184.86	1.18	27	4948345.10	0.61
Malí	100	3.71	0.02	99	56899.66	0.01
Mauritania	85	16.94	0.11	100	55971.40	0.01
México	48	118.09	0.75	11	12445192.60	1.55
Mongolia	40	158.15	1.01	68	421572.01	0.05

Marruecos	68	43.29	0.28	53	1357681.70	0.17
Mozambique	99	3.87	0.02	92	90216.01	0.01
Namibia	71	40.57	0.26	93	83397.70	0.01
Países Bajos	13	306.90	1.96	25	4971229.04	0.62
Nueva Zelanda	25	224.18	1.43	60	928156.90	0.12
Níger	105	2.21	0.01	101	34741.11	0.00
Nigeria	83	21.26	0.14	37	2970946.00	0.37
Noruega	23	239.01	1.53	59	1129059.80	0.14
Omán	82	21.51	0.14	56	1243921.00	0.15
Pakistán	60	64.33	0.41	31	3818703.60	0.47
Panamá	84	19.05	0.12	77	222206.70	0.03
Papúa New Guinea	79	25.88	0.17	90	130227.30	0.02
Paraguay	72	39.71	0.25	87	143841.20	0.02
Perú	76	28.66	0.18	58	1129228.40	0.14
Filipinas	20	253.92	1.62	39	2535401.60	0.31
Polonia	41	157.75	1.01	20	9706328.80	1.21
Portugal	1	1189.20	7.59	45	1627378.00	0.20
Catar	7	398.70	2.54	51	1487410.50	0.18
Rumania	43	139.07	0.89	36	2979801.50	0.37
Rusia	10	354.82	2.26	3	51646893.10	6.41
Sudán del Sur	101	3.52	0.02	102	30300.63	0.00
Arabia Saudita	6	413.88	2.64	15	10939397.40	1.36
Senegal	87	15.21	0.10	82	183328.90	0.02
Serbia	29	204.68	1.31	49	1509137.70	0.19
Islas salomón	86	16.92	0.11	106	8286.70	0.00
Somalia	106	1.93	0.01	105	18993.16	0.00
Sudáfrica	26	220.34	1.41	14	10996734.60	1.37
Corea del sur	12	308.13	1.97	9	14948880.40	1.86

España	30	193.47	1.23	21	8363047.40	1.04
Sudán	90	10.87	0.07	71	358599.62	0.04
Suecia	37	165.61	1.06	48	1511711.90	0.19
Suiza	35	176.50	1.13	54	1325243.70	0.16
Siria	58	73.55	0.47	55	1296263.90	0.16
Tanzania	98	4.23	0.03	81	191207.40	0.02
Tailandia	55	96.19	0.61	23	6350568.10	0.79
Turquía	52	114.54	0.73	22	8077266.10	1.00
Turkmenistán	15	303.06	1.93	47	1522017.20	0.19
Uganda	102	2.54	0.02	94	81491.40	0.01
Ucrania	28	204.87	1.31	19	9953303.60	1.24
Emiratos Árabes Unidos	2	772.71	4.93	30	3905361.10	0.48
Reino Unido	21	249.42	1.59	8	15131217.20	1.88
Estados Unidos de América	3	557.57	3.56	2	162638318.10	20.20
Uruguay	65	55.24	0.35	83	183320.90	0.02
Uzbekistán	44	136.76	0.87	33	3589945.60	0.45
Vanuatu	88	13.97	0.09	108	3153.90	0.00
Venezuela	39	160.65	1.03	29	4190782.90	0.52
Vietnam	70	40.98	0.26	32	3627165.10	0.45
Yemen	81	22.80	0.15	66	494669.50	0.06
Zambia	93	8.09	0.05	91	102941.33	0.01
Zimbabue	75	31.74	0.20	70	383730.30	0.05
TOTAL		15667.93341	100		805263389.3	100

Tabla B4.- Análisis de datos por grupo para las emisiones de N₂O totales y per cápita con base a su nivel de emisiones alta, media y baja.

GRUPO	EMISIONES N ₂ O PER CÁPITA DEL GRUPO EN 30 AÑOS tm	PROMEDIO EMISIONES POR PERSONA DURANTE LOS 30 AÑOS	PROMEDIO EMISIONES ANUALES POR PERSONA	% DE EMISIONES POR GRUPO	% INCREMENTO DE EMISIONES TOTALES	% INCREMENTO DEL 2020 CON RESPECTO A 1990	EMISIONES N ₂ O TOTAL DEL GRUPO EN 30 AÑOS kt	PROMEDIO EMISIONES POR PAÍS DURANTE 30 AÑOS	PROMEDIO EMISIONES ANUALES POR PAÍS	% DE EMISIONES POR GRUPO	% INCREMENTO DE EMISIONES TOTALES	% INCREMENTO DEL 2020 CON RESPECTO A 1990
ALTO	882.91	88.29	2.94	36.86	-21.74	-24.61	13419151.74	13419151.74	447305.06	17.74	61.86	81.40
MEDIO	745.70	29.83	0.99	31.13	-23.70	-21.85	18854175.57	6284725.19	209490.84	24.92	40.29	48.70
BAJO	766.57	10.50	0.35	32.00	-26.00	-23.18	43371657.77	417035.17	13901.17	57.34	15.11	15.76
TOTAL 108 PAÍSES	2395.18			100.00	-25.29	-23.23	75644985.09			100.00	28.53	32.51
% DEL TOTAL DE EMISIONES DE LOS 3 GEI EN 30 AÑOS	9.55						6.90					

Tabla B5.- Análisis de datos por grupo para las emisiones de CH₄ totales y per cápita con base a su nivel de emisiones alta, media y baja.

GRUPO	EMISIONES CH ₄ PER CÁPITA DEL GRUPO EN 30 AÑOS tm	EMISIONES POR PERSONA DURANTE LOS 30 AÑOS	EMISIONES ANUALES POR PERSONA	% DE EMISIONES POR GRUPO	% INCREMENTO DE EMISIONES TOTALES	% INCREMENTO DEL 2020 CON RESPECTO A 1990	EMISIONES CH ₄ TOTAL EN 30 AÑOS kt	PROMEDIO EMISIONES POR PAÍS DURANTE 30 AÑOS	PROMEDIO EMISIONES ANUALES POR PAÍS	% DE EMISIONES POR GRUPO	% INCREMENTO DE EMISIONES TOTALES	% INCREMENTO DEL 2020 CON RESPECTO A 1990
ALTO	1017.04	508.52	16.95	14.50	1.14	-14.81	86442298.21	21610574.55	720352.49	40.11	22.29	24.52
MEDIO	2757.86	172.37	5.75	39.31	-36.20	-31.39	53249993.19	5916665.91	197222.20	24.71	23.80	26.21
BAJO	3240.58	35.95	1.20	46.19	-25.90	-23.10	75807047.60	797968.92	26598.96	35.18	22.19	24.51
TOTAL 108 PAÍSES	7015.48			100.00	-28.16	-25.15	215499339.00			100.00	22.44	24.90
% DEL TOTAL DE EMISIONES DE LOS 3 GEI EN 30 AÑOS	27.97						19.66					

Tabla B6. Análisis de datos por grupo para las emisiones de CO₂ totales y per cápita con base a su nivel de emisiones alta, media y baja.

GRUPO	EMISIONES CO ₂ PER CÁPITA DEL GRUPO EN 30 AÑOS tm	EMISIONES POR PERSONA DURANTE LOS 30 AÑOS	EMISIONES ANUALES POR PERSONA	% DE EMISIONES POR GRUPO	% INCREMENTO DE EMISIONES TOTALES	% INCREMENTO DEL 2020 CON RESPECTO A 1990	EMISIONES CO ₂ TOTAL EN 30 AÑOS kt	PROMEDIO EMISIONES POR PAÍS DURANTE 30 AÑOS	PROMEDIO EMISIONES ANUALES POR PAÍS	% DE EMISIONES POR GRUPO	% INCREMENTO DE EMISIONES TOTALES	% INCREMENTO DEL 2020 CON RESPECTO A 1990
ALTO	4347.32	621.05	20.70	27.75	-0.13	-1.19	354394074.30	177197037.15	5906567.91	44.01	79.78	117.52
MEDIO	8840.82	226.69	7.56	56.43	-28.71	-26.09	154755166.40	38688791.60	1289626.39	19.22	13.94	13.90
BAJO	2479.79	40.00	1.33	15.83	19.95	20.89	296114148.61	2903079.89	96769.33	36.77	33.76	39.00
TOTAL 108 PAÍSES	15667.93			100.00	-13.81	-13.65	805263389.31			100.00	48.79	61.25
% DEL TOTAL DE EMISIONES DE LOS 3 GEI EN 30 AÑOS	62.48						73.45					

Apéndices



Página 1 of 168 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid:::3117:474256999

Yazmin Trejo Jerónimo

IMPULSANDO LOS OBJETIVOS INTERNACIONALES DE CERO EMISIONES NETAS MEDIANTE EL ESTUDIO Y ANÁLISIS DE E



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:474256999

143 Páginas

Fecha de entrega

16 jul 2025, 11:06 a.m. GMT-6

49.939 Palabras

Fecha de descarga

16 jul 2025, 11:11 a.m. GMT-6

258.398 Caracteres

Nombre de archivo

IMPULSANDO LOS OBJETIVOS INTERNACIONALES DE CERO EMISIONES NETAS MEDIANTE EL ESTU....pdf

Tamaño de archivo

5.2 MB

19% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

18% Fuentes de Internet

12% Publicaciones

0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Página 1 of 168 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid:::3117:474256999

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.	
Título del trabajo	IMPULSANDO LOS OBJETIVOS INTERNACIONALES DE CERO EMISIONES NETAS MEDIANTE EL ESTUDIO Y ANÁLISIS DE EMISIONES GLOBALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Yazmin Trejo Jerónimo	0105283g@umich.mx
Director	Luis Fernando Lira Barragán	luis.lira@umich.mx
Codirector	José María Ponce Ortega	jose.ponce@umich.mx
Coordinador del programa	Maria del Carmen Chávez Parga	cparga@umich.mx, mae.cs.ingenieria.quimica@umich.mx

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	Si	El principal objetivo de este trabajo de investigación es la aplicación de técnicas de Machine Learning que es una rama de la inteligencia artificial, para el agrupamiento en clústeres de grandes volúmenes de datos, las cuales se describen detalladamente a lo largo de la tesis. Sin embargo, el análisis estadístico y de resultados lo realice Yo.
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	 Yazmin Trejo Jerónimo
Lugar y fecha	Morelia Michoacán, a 17 de julio del 2025