



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
QUÍMICA



EL EFECTO DE LA TRANSICIÓN A REFRIGERANTES LIMPIOS SOBRE EL CALENTAMIENTO GLOBAL EN AMÉRICA LATINA

POR

DANIELA AILING CHIANG PEÑA

Memoria de Título presentada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniera Civil Química

Profesor Guía
Dr. Claudio Zaror Zaror

Profesional Supervisor
Dra. Nicole Miranda González

Diciembre 2024
Concepción (Chile)
© 2024 Daniela Ailing Chiang Peña

© 2024 Daniela Ailing Chiang Peña

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen ejecutivo

Esta investigación evalúa el efecto sobre el calentamiento global de la utilización de propano en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en el contexto de la Enmienda de Kigali, que busca reducir un 80% las emisiones de compuestos de hidrofluorocarbonos (HFC) para 2045. Estos gases sintéticos podrían ser responsables de hasta 0,4°C del calentamiento global al 2100, pero pueden ser reemplazados por refrigerantes naturales con un potencial de calentamiento global (PCG) bajo, tales como el propano, que ya ha sido aplicado exitosamente en varios países.

Para ello, se implementa un modelo de proyección de emisiones basado en datos históricos y futuros escenarios, combinado con un modelo de demanda-emisiones de aire acondicionado residencial, y un modelo climático para estimar los impactos en el calentamiento global.

En los resultados se muestra que la adopción de la Enmienda de Kigali podría reducir hasta 16,8 Mt de CO₂-eq en 2050, mitigando un calentamiento atmosférico de $2 \cdot 10^{-4}$ °C. Además, se evidencia que el mayor impacto proviene de las emisiones indirectas, lo que representa un gran desafío para la transición.

Este estudio destaca lo potencialmente beneficioso, en términos de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), que sería implementar la Enmienda de Kigali. Se concluye que es necesario adoptar refrigerantes de bajo PCG, mejorar la eficiencia energética de los equipos, y avanzar hacia matrices eléctricas más limpias para maximizar los beneficios climáticos de esta transición. También, se recomienda estudiar los factores económicos y sociales de esta transición.

Abstract

This research evaluates the effect on global warming of the use of propane in residential air conditioning systems in Latin America, in the context of the Kigali Amendment, which seeks to reduce emissions of hydrofluorocarbon compounds (HFCs) by 80% by 2045. These synthetic gases could be responsible for up to 0.4°C of global warming by 2100 but can be replaced by refrigerants with a low global warming potential (GWP), such as propane, which has already been successfully applied in China, India and Ghana.

For this, an emissions projection model is implemented based on historical data and future scenarios, combined with a demand-emissions model of residential air conditioning, and a climate model to estimate impacts on global warming.

The results show that adoption of the Kigali Amendment could reduce up to 16,8 Mt of CO₂-eq in 2050, mitigating an atmospheric warming of $2 \cdot 10^{-4}$ °C. Furthermore, it is evident that the greatest impact comes from indirect emissions, this represents a major challenge for the transition.

This study highlights the potential benefits, in terms of GHG mitigation, of implementing the Kigali Amendment. It concludes that it is necessary to adopt low-GWP refrigerants, improve the energy efficiency of equipment, and move towards cleaner electricity matrices to maximize the climate benefits of this transition. Also, it is recommended to study the economic and social factors of this transition.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	10
2. Objetivos	14
3. Metodología.....	15
3.1 Metodología análisis bibliométrico	15
3.2 Establecimiento de perfiles de emisiones.....	16
3.2.1 Emisiones históricas de HFC en Latino América	16
3.2.2 Construcción de perfiles de emisiones	18
3.3 Demanda de Aires Acondicionados Residenciales (AAR)	20
3.5 Uso del modelo de cambio climático simple FaIR 2.2	26
4. Resultados y Discusión.....	28
4.1 Contexto en América Latina sobre la emisiones de gases de efecto invernadero asociados a los HFC	28
4.1.1 Ratificación de la Enmienda de Kigali por países en América Latina	28
4.1.2 Emisiones de gases HFC en América Latina	29
4.2 Perfil de emisiones	32
4.3 Implementación de modelo para evaluar el potencial de reducción de emisiones GEI en el sector de aire acondicionado residencial en América Latina	34
4.3.1 Proyección de Demanda de Aire Acondicionado Residencial	34
4.3.2 Gases de efecto invernadero mitigado en el reemplazo del refrigerante R-410A por propano (R-290)	36
4.3.3 Comparación del impacto total equivalente durante la vida útil del equipo de aire acondicionado residencial en países seleccionados	38
4.4 Cuantificación de la sustitución por propano (R-290) en términos de forzamiento radiativo y cambio de temperatura global.	40
5. Conclusión.....	43

6. Referencias	45
-----------------------------	-----------

Lista de Figuras

Figura 3.1 Modelo de demanda-emisiones utilizado en el sector de aire acondicionado residencial en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México. Elaboración propia.	25
Figura 3.2 Flujo de información para modelar los tres escenarios de emisión (A, B, C) y obtener forzamiento radiativo y temperatura como resultado. Elaboración propia.	27
Figura 4.1 Emisiones de GEI asociadas a HFCs en América Latina por tipo. Elaboración propia basada en datos EDGAR.....	30
Figura 4.2 Emisiones de GEI asociadas a HFCs por país. Elaboración propia basado en la fuente de datos EDGAR.....	32
Figura 4.3 Perfil de Emisiones de GEI asociados a HFC en América Latina hasta el 2050. Elaboración propia.	33
Figura 4.4 Penetración de unidades de AAR en Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México. Elaboración propia.	35
Figura 4.5 Proyección de unidades de AAR en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México. Elaboración propia.	36
Figura 4.6 Impacto total equivalente sobre el calentamiento global en equipos que utilizan R-290 y R-410 como refrigerante en distintos países. Elaboración propia.....	40
Figura 4.7 Contribución de las emisiones de AAR bajo distintos escenario en el forzamiento radiativo y anomalía de temperatura. Elaboración propia.....	42

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Compromisos de Reducción de Emisiones de HFCs según el Párrafo 1 del Artículo 5 – Grupo 1. Elaboración propia en base a la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal.....	19
Tabla 3.2 Comparación entre unidades split de aires acondicionados usando refrigerantes diferentes. Elaboración propia.	20
Tabla 4.1 Proyección de emisiones de GEI en el sector de AAR en América Latina medidas en Mt de CO ₂ eq. Elaboración propia.	37
Tabla 4.2 Proyección de emisiones de GEI en el sector de AAR en América Latina medidas en Mt de CO ₂ eq. Elaboración propia.	38

Nomenclatura

AAR	Aire acondicionado residencial
BUENAS	Bottom-Up Energy Analysis System
CFC	Clorofluorocarbonos
CDD	Días de enfriamiento (Cooling Degree Days)
CE	Consumo eléctrico
CO2-eq	Dióxido de carbono Equivalente
Dif	Difusión de unidades de aire acondicionado residencial
ED	Emisiones directas
EER	Relación de Eficiencia Energética (Energy Efficiency Ratio)
EI	Emisiones indirectas
EDGAR	The Emissions Database for Global Atmospheric Research
FaIR	Finite-Amplitude Impulse Response
GEI	Gases de efecto invernadero
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarbonos
IC	Intensidad de Carbono
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
Kg	Kilogramo
kW	Kilovatio
PIB	Producto Interno Bruto
PCG	Potencial de calentamiento global
PCG*	Potencial de Calentamiento Global para Gases de Vida Corta
Pop	Población
RE	Reducción de emisiones
Mt	Millón de Toneladas
TEWI	Impacto Total Equivalente sobre el Calentamiento Atmosférico (Total Equivalent Warming Impact)

UNFCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (United Nations Framework Convention on Climate Change)
α	Nivel de saturación de la difusión

1. Introducción

El cambio climático ha provocado consecuencias significativas en América Latina, como el aumento de la temperatura media, modificación en los patrones de precipitaciones y un incremento en la intensidad y frecuencia de desastres naturales, lo que ha generado un impacto económico, social y ambiental considerable (CEPAL, 2020Haz clic o pulse aquí para escribir texto.). Los gases de efecto invernadero (GEI), entre ellos los hidrofluorocarbonos (HFCs), son los responsables de este fenómeno, lo que resulta imprescindible regular sus emisiones para mitigar los efectos.

Los HFCs son un grupo de gases sintéticos, usados principalmente para la refrigeración, aires acondicionados, aerosoles y espumas aislantes. Estos gases empezaron a emplearse como alternativas a clorofluorocarbonos e hidroclorofluorocarbonos (CFCs y HCFCs), sustancias que dañan la capa de ozono, tras la entrada en vigor del Protocolo de Montreal en 1989. Su consumo ha aumentado drásticamente en las últimas décadas. En efecto, el crecimiento de los HFC es el más rápido entre los GEI. Si no se controlan, los HFC podrían convertirse en el 9-19% de las emisiones globales de GEI para 2050 (CCAC, 2016).

Aunque actualmente los HFC representan alrededor del 2% de los GEI totales, su impacto en el calentamiento global puede ser mil veces más que el dióxido de carbono y se proyecta que podrían contribuir hasta 0,4°C al calentamiento global para el año 2100 (Velders et al., 2022). Esto ha dado lugar a la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal que entró en vigor el 2019. Esta enmienda establece la reducción gradual del consumo de los HFC en un 80% para el 2045 en los países del Grupo 1 del Artículo 5, categoría que incluye a los 33 países de América Latina y el Caribe.

Según el estudio realizado por Velders et al. (2022), el 7% de las emisiones globales de HFC proviene de América Latina. Se espera que siga creciendo su consumo debido al crecimiento económico, crecimiento de población, urbanización, electrificación y cambio en el patrón de consumo de las personas.

Los hidrofluorocarbonos (HFC) pueden ser reemplazados por refrigerantes con un potencial de calentamiento global (PCG) bajo. Diversas investigaciones han explorado estas alternativas en múltiples aplicaciones, incluyendo sistemas de aire acondicionado, refrigeración comercial e

industrial. Entre las alternativas disponibles que han sido aplicadas, se encuentran los refrigerantes naturales como el amoníaco (R-717), agua (R-718) y dióxido de carbono (R-744). Así como también los hidrocarburos, propano (R-290), butano (R-600) y el isobutano (R-600a).

El propano (R-290) se ha aplicado con éxito en aires acondicionados residenciales en varios países. En Ghana (CCAC, 2019), se instalaron 380 unidades de aires acondicionados split¹ manufacturados por Midea y de una capacidad de 5,27 kW para introducirlos en el mercado y evaluar su eficacia. De la implementación, el Climate & Clean Air Coalition concluye que el uso del R-290 consume menos energía que con el refrigerante HFC R-410A y el HCFC R-22, que son comúnmente utilizados en esta aplicación. También se requiere menos carga de refrigerante con el R-290 (0,38 Kg) en contraste con el R-410A (1 Kg). Sin embargo, el uso del propano (R-290) tiene problemas de seguridad al ser inflamable por lo que se requiere la formación de técnicos en el área y por consiguiente un aumento en costo de instalación.

Wei et al. (2024) estudiaron los beneficios y desafíos del uso del refrigerante R-290 para equipos de aire acondicionado de habitaciones en California y concluyeron que, aunque los equipos presentan ligero aumento en costo, podrían reducir entre 15 y 64 millones de toneladas métricas de GEI.

El dióxido de carbono (R-744) puede utilizarse en grandes equipos de aire acondicionado. En el norte de Europa se han introducido enfriadoras refrigeradas por aire que utilizan este compuesto. En Chile, la investigación de Sacasas et al. (2022) centrada en la industria de la refrigeración de supermercados, estudia la adopción del refrigerante natural R-744 (CO₂) como alternativa sostenible a los HFC. Este estudio representa un esfuerzo innovador en la simulación de sistemas transcíticos² de R-744 en catorce localidades de Chile, destacando reducciones significativas del consumo energético de entre el 4% y el 12% anual, dependiendo de las condiciones climáticas.

El amoníaco (R-717) puede ser utilizado en enfriadoras en edificios y refrigeración urbana. Brossard

¹ Un aire acondicionado split es un sistema de refrigeración que consta de dos componentes principales: una unidad interior y una unidad exterior. Estos sistemas están diseñados específicamente para regular la temperatura de una sola habitación o área que tiene acceso a una pared exterior.

² Un sistema de refrigeración de CO₂ transcrito, utiliza el CO₂ como refrigerante trabajando por encima de su temperatura crítica.

Pérez et al. (1998), investigaron el reemplazo de los clorofluorocarbonos (CFC) por R-717 en países en vías de desarrollo. En Cuba, la aplicación de esta medida permitiría ahorrar hasta un 15% en electricidad y una disminución sustancial en los costos de reparación y mantenimiento de los aires acondicionados. El agua también puede ser utilizado como alternativa en enfriadoras, las cuales han sido desarrolladas en Alemania, haciendo la transición de la ventilación por ventanas como único método de refrigeración a enfriadoras R-718 alimentadas por paneles fotovoltaicos (CCAC, 2019).

Estudios han cuantificado los beneficios climáticos y económicos de adoptar refrigerantes de bajo PCG en diferentes sectores y regiones. En la bibliografía existente, se han identificado estudios que analizan el potencial de ahorro de emisiones de GEI. En particular, en este estudio de Shah et al. (2015) se determina que cambiar el stock mundial de aparatos de aire acondicionado de baja eficiencia y refrigerantes de alto PCG por tecnología más eficiente y refrigerantes de bajo PCG podrían evitar 98.000 millones de toneladas de CO₂ emisiones acumuladas para 2050. Sin embargo, los resultados están sujetos a incertidumbre asociada a las emisiones y proyecciones de crecimiento poblacional.

Un estudio similar se hace en las regiones de China, donde desarrollan un modelo de demanda-emisiones-costo para evaluar el potencial y los costos de la reducción de emisiones en diferentes regiones de China bajo diferentes escenarios. Este modelo proyectó la demanda de aires acondicionados residenciales (AAR) al 2050 y en base a esa estimación obtienen los perfiles de emisiones para distintos escenarios. Las principales reducciones acumuladas de emisiones directas e indirectas en el periodo de 2021 a 2060, serían de 6,4-7,4 Gt CO₂-eq y 1,6-1,8 Gt CO₂-eq respectivamente, atribuyéndose principalmente a la adopción de un refrigerante de bajo PCG y a la reducción de gases HFC acorde la Enmienda de Kigali (Jiang et al., 2023).

Miranda et al. (2023) utilizan el modelo Finite amplitude Impulse Response (FaIR) para ilustrar cómo la métrica existente que mide los gases fluorados (PCG₁₀₀) tergiversa el impacto de los refrigerantes sobre el cambio climático. Utilizando como ejemplo el HFC-134a un refrigerante de corta duración, y FaIR permitió generar nuevos perfiles de concentración, forzamiento radiativo y temperatura, en tres escenarios. Los resultados dejaron en evidencia que el equivalente de CO₂ comúnmente utilizado con su PCG₁₀₀ no representa las respuestas atmosféricas, y particularmente el calentamiento del HFC-134a de corta duración. Sin embargo, a través de la revisión de la literatura,

identifican otras métricas disponibles que podrían aplicarse a los gases fluorados y en particular se recomienda examinar el PCG*³ en trabajos futuros.

Sin embargo, la literatura carece de un enfoque específico de América Latina, donde factores como el crecimiento poblacional y las condiciones climáticas influyen en los perfiles de emisión y la adopción de tecnologías.

A partir de los antecedentes presentados, la presente investigación evalúa el efecto sobre el calentamiento global de la utilización de propano en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en el contexto de la Enmienda de Kigali sobre reducción de emisiones de compuestos hidrofluorocarbono (HFC). Se opta por estudiar esta transición en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México por tener los productos internos brutos (PIB) per cápita más altos de la región, lo que se correlaciona con un mayor consumo, y su patrón de consumo y desarrollo industrial son representativos de las tendencias generales de esta región. Además, estos países tienen las mayores emisiones de GEI asociadas a HFCs, por lo que las emisiones totales constituyen una proporción significativa del total regional.

³ El PCG* es una métrica de los gases de efecto invernadero, que considera a los gases de corta duración.

2. Objetivos

Objetivo General

Evaluar el efecto sobre el calentamiento global de la utilización de propano en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en el contexto de la Enmienda de Kigali sobre reducción de emisiones de compuestos hidrofluorocarbono (HFC).

Objetivos específicos

1. Establecer futuros perfiles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociados a refrigerantes hidrofluorocarbono (HFC) en América Latina, como resultado de la potencial implementación de la Enmienda de Kigali.
2. Implementar un modelo de demanda-emisiones para evaluar el potencial de reducción de emisiones de GEI en el sector de aire acondicionado residencial en América Latina, como resultado de la sustitución de HFCs por propano (R-290).
3. Cuantificar el efecto de la sustitución por propano de los refrigerantes HFC utilizados en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en el contexto de la Enmienda de Kigali, en términos de forzamiento radiativo y cambio en temperatura global, usando el modelo de cambio climático simple FaIR 2.2.

3. Metodología

En este capítulo se presentan las bases metodológicas utilizadas para realizar este trabajo. En primer lugar, se resume el procedimiento utilizado para establecer los futuros perfiles de emisiones de GEI, como resultado de la implementación de la Enmienda de Kigali. Luego, se entregan los antecedentes que permiten implementar un modelo de demanda-emisiones para evaluar el potencial de reducción de emisiones de GEI en el sector de aire acondicionado residencial en América Latina, como resultado de la sustitución de HFCs por propano (R-290). Finalmente, se presenta la metodología utilizada para cuantificar el efecto de la sustitución por propano de los refrigerantes HFC utilizados en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina.

3.1 Metodología análisis bibliométrico

Con el fin de situar este trabajo en el contexto del campo de investigación e identificar los vacíos en el área correspondiente, se realiza una revisión bibliográfica para analizar la transición a refrigerantes limpios en América Latina. Esta revisión incluye un análisis bibliométrico en formato de artículo académico, donde el detalle de la metodología y resultados se encuentran en el Anexo 4. Trata sobre investigaciones en torno a la transición a refrigerantes limpios hechas en América Latina y se espera presentarlo en una conferencia futura. Esta búsqueda bibliográfica se lleva a cabo en la plataforma Scopus⁴ mediante siete búsquedas sistemáticas. Estas búsquedas se estructuraron sobre la base de palabras claves entorno a los siguientes ítems:

1. Refrigerantes con PCG altos
2. Refrigerantes con PCG bajos
3. Países de Latino América (exceptuando las islas)
4. Refrigeración
5. Categorías para abordar la transición a sistemas de refrigeración sustentable:
 - Interacciones sociales
 - Gobernanza
 - Tecnología e Innovación
 - Diseño de infraestructura

⁴ Scopus es una base de datos que ofrece una visión general de la información científica interdisciplinaria global.

Estas últimas cuatro categorías se consideraron en base al marco teórico propuesto por Khosla et al. (2020) donde se plantea a la refrigeración como un sistema de componentes sociales y técnicos interconectados, y se argumenta que los comportamientos socioculturales determinan la demanda de refrigeración. Esta demanda se satisface con soluciones tecnológicas alineadas con los modelos de negocio del sector privado. Estos mercados están regulados por políticas gubernamentales y están integrados a las infraestructuras tecnológicas y sociales.

Esto llevó a encontrar sólo 15 artículos que investigan la transición a refrigerantes sustentables en América Latina, mientras que los artículos encontrados a nivel mundial (incluyendo América Latina) fueron 2.358. Específicamente para América Latina se encontraron artículos donde estudian la transición a hidrocarburos y amoníaco en Honduras y Cuba, respectivamente, mostrando resultados positivos en términos de viabilidad económica y técnica (Brossard Perez et al., 1998a; Leiva Carvajal et al., 2021a)

Las búsquedas también revelaron la falta de redes de colaboración entre autores de la región, lo que pone de manifiesto un vacío importante y una oportunidad para los investigadores latinoamericanos de contribuir al cumplimiento de los objetivos del Enmienda de Kigali. Además, algunos estudios se centran en la transición de los CFC a los HCFC, lo que puede sugerir que aún falta centrarse en la sustitución de los HFC (Brossard Perez et al., 1998a; Rodrigues, 2020)

3.2 Establecimiento de perfiles de emisiones

Para encontrar fuentes de información relacionada con el estado de los países latinoamericanos con respecto a políticas de regulación de emisiones se utilizan las plataformas Google Scholar y Scopus.

3.2.1 Emisiones históricas de HFC en Latino América

Para esta investigación se realiza una búsqueda exhaustiva para encontrar una fuente de emisiones de HFCs a nivel global y regional, para construir un análisis de la evolución de emisiones y a partir de ellos evaluar el efecto de las regulaciones internacionales en el cambio climático.

La fuente primaria de datos es la base de datos The Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR). EDGAR es una base de datos mundial e independiente sobre emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminación atmosférica en la Tierra. Esta base de datos proporciona estimaciones independientes de las emisiones en comparación con las notificadas por los Estados miembros europeos o por las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), utilizando estadísticas internacionales y una metodología coherente con las directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

EDGAR calcula las emisiones por categorías de fuentes con un enfoque genérico aplicado de forma coherente a todos los países del mundo y con distribución geográfica precisa en los lugares de emisión. Entre los gases fluorados incluidos en los cálculos de EDGAR se encuentran los hidrofluorocarbonos HFC, como el HFC-23, HFC-32, HFC-125, HFC-134a, HFC-143a, HFC-152a, HFC-227ea, HFC-236fa, HFC-245fa, HFC-365mfc y HFC-43-10-mee.

Esta fuente de datos resulta fundamental para esta investigación debido a su amplia cobertura tanto de gases como de países, además de abarcar un periodo significativo 1990 hasta el 2022. Esto lo convierte en una herramienta esencial para desarrollar los perfiles de emisión futuros.

Para completar los datos de EDGAR y obtener información sobre las emisiones de ciertos HFC en países específicos, se consultan los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero publicados por los gobiernos respectivos y recopilados por la CMNUCC. Estos inventarios ofrecen un desglose específico de las emisiones por tipo de GEI. Encontrar la información en los inventarios nacionales es crucial para complementar la información faltante. Se revisan específicamente las secciones relacionadas con los HFC de interés, las cuales se identifican bajo el código 2F según las directrices del IPCC establecidas en 2006 para reportes estándar. Esta sección, titulada *Uso de Productos Sustitutos para Sustancias que Dañan la Capa de Ozono*, aborda las emisiones asociadas al empleo de estos compuestos como reemplazos de CFCs y HCFCs.

3.2.2 Construcción de perfiles de emisiones

En primer lugar, se utilizan las emisiones entregadas por EDGAR y los Inventarios nacionales desde 1990 hasta 2022 y a partir de estas emisiones se generan tres escenarios hasta el 2050. Los escenarios son:

- Escenario A – Negocios como siempre: Emisiones siguen la tendencia de consumo actual de HFCs sin considerar ninguna regulación.
- Escenario B – Enmienda de Kigali: Disminución de 80% de emisiones de acuerdo con la Enmienda de Kigali
- Escenario C - Cambio escalón: Disminución de 80% en el año 2045, con una reducción de tipo cambio escalón.

Escenario A- Negocios como siempre

El escenario A se diseña según lo establecido en el informe “A Study of the Impacts of HFC Consumption trends in Article 5 Countries”(Climate & Clean Air Coalition (2022). En el establecen que el escenario se construye asumiendo que el consumo de HFC aumentará anualmente sin cesar, sin tener en cuenta los pasos de reducción progresiva de HFC de la Enmienda de Kigali. En general, el crecimiento del consumo de HFC en cada mercado es un factor de:

- la tasa de crecimiento económico
- la demanda de refrigeración, que podría estar en función de la propiedad per cápita de frigoríficos y aparatos de aire acondicionado, y de otros equipos que contengan/utilicen HFC en ese país
- las políticas y medidas adoptadas en el marco del plan de gestión de eliminación de los HCFC que puedan crear una demanda de sustitución de sistemas no basados en los HCFC.

Dados los múltiples factores que afectan a la futura demanda de HFC y el largo periodo para las proyecciones (2022-2050), el estudio de Climate & Clean Air Coalition considera diferentes opciones de tasas de crecimiento para modelar las proyecciones de consumo de HFC. Se elige la opción que supone una tasa de crecimiento de 10% durante los años 2022-2024 para compensar las

tasas de crecimiento más bajas entre 2020 y 2021 causadas principalmente por el impacto de COVID-19. Después de 2024, se supone que el consumo de HFC crece a una tasa de crecimiento del PIB + 4% hasta 2030. Después de 2030, se supone que la tasa de crecimiento es la misma que la tasa de crecimiento del PIB de cada país. Se emplean los datos del Fondo Monetario Internacional (IMF, 2024) para las tasas de crecimiento del PIB hasta el 2029. Para los años posteriores, se asume que el crecimiento permanecerá constante. Y con esto se establece que las emisiones siguen el mismo patrón que el consumo.

Escenario B – Enmienda de Kigali

El escenario B obedece a la reducción de emisiones establecido por la Enmienda de Kigali para los países al pertenecientes al Grupo 1 del Artículo 5 (Vienna Convention, 2016a). En la tabla 3.1 a continuación se presentan:

Tabla 3.1 Compromisos de Reducción de Emisiones de HFCs según el Párrafo 1 del Artículo 5 – Grupo 1. Elaboración propia en base a la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal.

Partes que operan al amparo del párrafo 1 del Artículo 5 - Grupo 1	
Nivel básico	Media de HFC para 2020-2022 + 65% nivel básico de HCFC
Congelación	1° de enero de 2024
Reducción del 10%	1° de enero de 2029
Reducción del 30%	1° de enero de 2035
Reducción del 50%	1° de enero de 2040
Reducción del 80%	1° de enero de 2045

Este escenario se construye asumiendo que se cumplen las metas anuales, generando una transición gradual en forma de rampa. Además, no se considera la base de los HCFC, ya que este estudio solo se focaliza en los HFC.

Escenario C – Cambio escalón

El escenario C representa un cambio escalón considerando que se mantienen las emisiones del 2024 hasta el 2045 y en el mismo año se reducen las emisiones en un 80%, esto con el fin de observar el comportamiento de los gases y su efecto en términos de emisión de GEI, forzamiento radiativo y temperatura, con el fin de demostrar el efecto de no tomar acción a tiempo.

3.3 Demanda de Aires Acondicionados Residenciales (AAR)

Este estudio utiliza los aires acondicionados residenciales en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México considerando que representan las economías más grandes de América Latina, en términos económicos y de contribución al cambio climático. Tomando la información correspondiente a cada país se hace una proyección de la cantidad de unidades de aires acondicionados hasta el 2050 y con ello cuanto Mt de CO₂-eq podría mitigarse si se reemplazara el refrigerante que usa habitualmente, en este caso base se utiliza el R-410a por el propano (R-290). Este último ha sido probado en numerosas ocasiones en otros países ya que cuenta con las características para ser aplicado en este tipo de equipos. Los equipos utilizados en este estudio se basan en los modelos empleados en Ghana por el Climate&Clean Air Coalition, donde se realiza una transición similar (CCAC, 2019). En la tabla 3.2 se presentan las características técnicas principales:

Tabla 3.2 Comparación entre unidades split de aires acondicionados usando refrigerantes diferentes. Elaboración propia.

Capacidad de enfriamiento (kW)	5.3 (18,000 BTU/h)	
Funcionamiento	Velocidad fija	
Modelos comparados	LG	MiDEA
Refrigerante	R-410A	R-290
PCG ₁₀₀	2088	3
Carga inicial (kg)	1	0.38
EER (W/W)	3	3.5

Se utilizó este equipo porque en el estudio realizado por Shah et al. (2017) basado en la demanda global de aires acondicionados, se detalla el tipo de sistema, marcas comerciales y características del refrigerante utilizado en estos países latinoamericanos, coincidiendo con el caso seleccionado.

En primer lugar, en base a parámetros demográficos, climáticos y económicos se calcula la demanda de aires acondicionados residenciales (AAR) en base al Modelo Bottom-Up Energy Analysis System (BUENAS) por Mcneil et al. (2012) el cual es una herramienta para modelar la demanda de

energía de distintos equipos. BUENAS cubre una amplia gama de productos que consumen energía en el sector residencial, tales como: Televisores, Refrigeradores, Lavaplatos y Aire Acondicionado.

La demanda de AAR en una región determinada está dada por la población, el clima y las condiciones económicas. Teóricamente, la cantidad de AAR de un hogar en particular es igual al producto entre el número de hogares en la región y la razón de difusión de un electrodoméstico (número de aplicaciones en un hogar). Esto se basa en la siguiente ecuación:

$$Stock_{i,t} = Dif_{i,t} \cdot \frac{Pop_{i,t}}{N_{i,t}} \quad (1)$$

Donde Stock se refiere a cantidad de AAR, unidad; Dif se refiere a razón de difusión de AARs, unidades/hogares; Pop es la población; N se refiere a tamaño de hogares, personas/hogar; i y t se refiere al país y año respectivamente. Los datos históricos de la población y el tamaño de los hogares pueden encontrarse en la figura A-2.1 y tabla A-2.1 del Anexo 2.

El estudio muestra que la razón de difusión de electrodomésticos está relacionada a factores tales como el ingreso por hogar, razón de electrificación y condiciones climáticas en el área. Debido a la autocorrelación entre el ingreso por hogar y la razón de electrificación, se considera únicamente el ingreso por hogar como variable principal. Este parámetro se calcula utilizando el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita en Paridad de Poder Adquisitivo (PPP) reportado por el Fondo Monetario Internacional (FMI) (2024), ya que permite comparar la capacidad adquisitiva real entre diferentes países. Para obtener el ingreso por hogar, se multiplica el PIB per cápita por el número promedio de habitantes por hogar, información proporcionada por la Unidad de Población de las Naciones Unidas (Department of Economic and Social Affairs, 2022). Ante la falta de proyecciones específicas, se asume que la cantidad de habitantes por hogar se mantiene constante desde 2022 hasta 2050.

Los factores climáticos locales también determinan la saturación de aire acondicionado, específicamente los grados día de enfriamiento (CDD, por sus siglas en inglés), una métrica que mide la necesidad de refrigeración en función del número de grados que la temperatura promedio diaria supera los 18°C. Los CDD se acumulan anualmente para describir la demanda potencial de energía

de refrigeración. Los datos del Banco Mundial están disponibles hasta el 2020 (The World Bank, 2022); para años posteriores, se utiliza el mismo valor correspondiente al 2020.

$$Dif_{i,t} = \frac{\alpha_{i,t}}{1 + \gamma \cdot e^{(\beta_{i,t} \cdot I_{i,t})}} \quad (2)$$

Donde Dif es la razón de difusión de aire acondicionado, unidades/hogares; α indica el nivel de saturación de la razón de difusión la cual se calcula mediante la Ecuación (3); γ y β son coeficientes de regresión; I es el ingreso por hogar; i y t indican el país y año. Los parámetros utilizados para cada país están detallados en la figura A-2.2 y tabla A-2.7 del Anexo 2.

$$\alpha = ClimateMaximum = 1.0 - 0.949 \cdot (-0.00187 \cdot CDD) \quad (3)$$

Para las emisiones directas del sector, este estudio adopta las Directrices para los inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero publicadas por el IPCC en 2006 (IPCC, 2006), utilizando la fórmula del factor de emisión, es decir, el Nivel 2a. En el Nivel 2a, las emisiones de refrigerantes en cada año de observación t se dividen en emisiones iniciales (ED^{ini}), emisiones de funcionamiento (ED^{op}), emisiones de mantenimiento (ED^{man}) y emisiones al final de la vida útil (ED^f).

$$ED = ED^{ini} + ED^{op} + ED^{man} + ED^f \quad (4)$$

Este estudio solo considera las emisiones de operación anuales para estimar las emisiones directas de un equipo, aplicando un factor de emisión promedio de 5% obtenido de la IPCC. Por lo tanto, el cálculo de las emisiones directas es mediante la siguiente ecuación:

$$ED_{g,i,t} = ED_{g,i,t}^{op} \cdot PCG_{100} \cdot Stock_{i,t} \quad (5)$$

Donde ED indica las emisiones de GEI asociadas al refrigerante, en kg de CO_2 eq; g , i y t indican el tipo de refrigerante, el país, y el año.

Las emisiones indirectas del sector RAC, es decir, el CO_2 emitido por el consumo de energía durante el funcionamiento, se calculan como se indica en la Ecuación (6). La obtención del consumo

de electricidad y la intensidad de las emisiones de carbono depende del tiempo de operación de un AAR en cada país y la intensidad de las emisiones de carbono depende de la generación eléctrica de cada país.

$$EI_{g,i,t} = CE_{g,i,t} \cdot IC_{g,i,t} \quad (6)$$

Donde EI indica las emisiones indirectas de los AAR, en kg de CO₂ eq ; CE indica el consumo anual de electricidad de los AAR, en kWh; IC indica la intensidad de las emisiones de carbono del suministro eléctrico, en kg/kWh; g, i y t indican el tipo de refrigerante, el país y el año.

$$CE_{g,i,t} = Stock_{i,t} \cdot P_g \cdot TO_i \quad (7)$$

Donde P denota la potencia media de funcionamiento del AAR, en kW; TO denota el tiempo de operación anual del AAR, en h; g, i y t denotan el tipo de refrigerante, el país y el año, respectivamente.

La potencia media de funcionamiento de los AAR se obtiene a partir de la potencia frigorífica y el índice de eficiencia energética, como se muestra en la Ecuación (8). Este estudio calcula el tiempo de funcionamiento anual de los AAR en cada país basándose en el estudio de Shah et al. (N. M. W. V. E. L. A. A. P. Shah, 2015).

(8)

$$P_g = \frac{Q}{EER_g}$$

Donde Q denota la capacidad de refrigeración, kW; EER denota la relación de eficiencia energética, W/W; g denota el tipo de refrigerante.

El factor de intensidad de carbono del suministro eléctrico se obtuvo de la base de datos Ember (Ember; Energy Institute- Statistical Review of World Energy (2024), 2024) para los datos del 1990 hasta el 2022, luego para hacer las proyecciones a los años 2030, 2040 y 2050 se utilizaron las metas de descarbonización de la matriz eléctrica de cada país, la cual se puede encontrar en la tabla A-2.3 y A-2.4 del Anexo 2.

La reducción total de emisiones se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$RE_{j,t} = ET_t^A - ET_t^k \quad (9)$$

Donde ET denota las emisiones totales de GEI asociadas al Stock de AAR, CO₂ eq; ET^A se refiere a las emisiones totales según el Escenario A, ET^B se refiere a las emisiones totales según el escenario; t y k denota el año y el escenario respectivamente.

En la figura 3.1 se observan los elementos que se utilizaron para calcular la proyección de unidades de AAR, las emisiones de estos equipos y la cantidad de GEI a mitigar. Para aplicar los escenarios a la reducción total de emisiones se hizo lo siguiente:

- Escenario A: Las emisiones directas e indirectas se calcularon con el stock de AAR para cada año.
- Escenario B: se construye en acuerdo con el compromiso de congelar las emisiones del 2022. Durante el período 2022 hasta 2050, las emisiones provienen del stock existente de equipos residenciales de aire acondicionado que operan con R-410, al cual se le va aplicando los porcentajes de reducción en el año que corresponde. Para cumplir con las metas de reducción en el futuro, se utilizan los equipos adicionales que ingresan al mercado para adoptar gradualmente el refrigerante R-290.
- Escenario C: las emisiones desde el 2022 hasta el 2050 proviene de stock que opera en el 2022, y los equipos que ingresan al mercado se asume que utilizan R-290 como refrigerante.

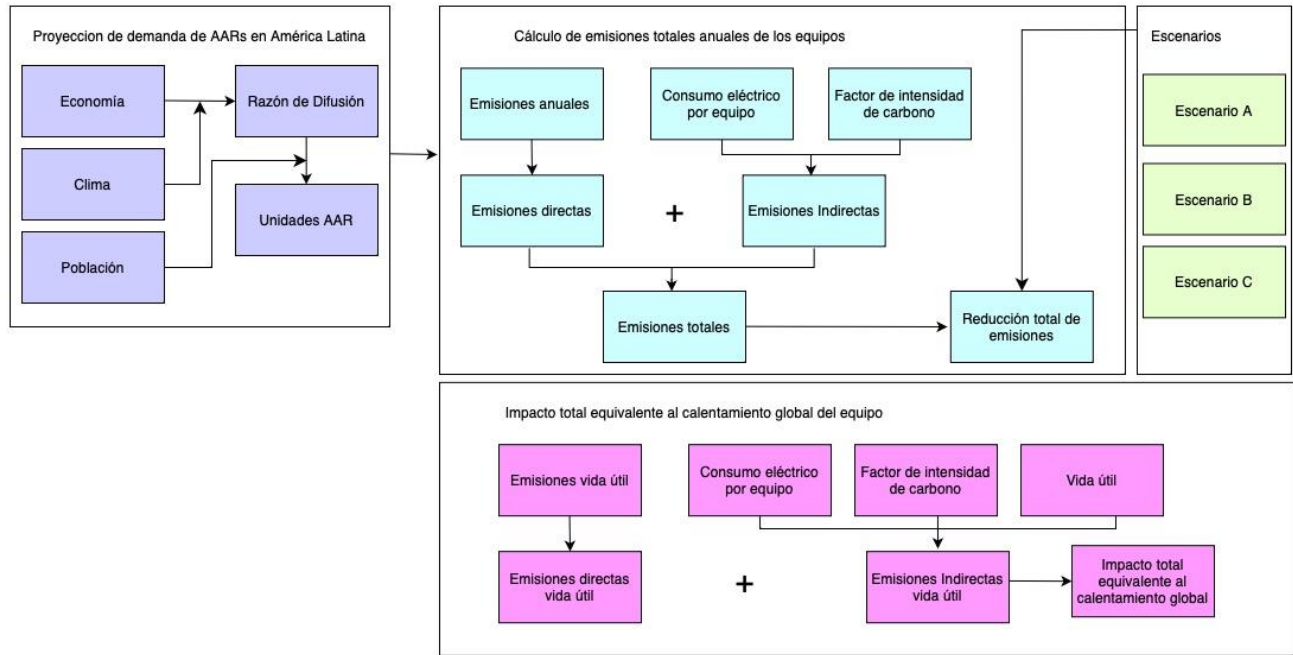


Figura 3.1 Modelo de demanda-emisiones utilizado en el sector de aire acondicionado residencial en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México. Elaboración propia.

El Impacto Total Equivalente sobre el Calentamiento Atmosférico (TEWI, por sus siglas en inglés) es una métrica que comprende las emisiones equivalentes totales de carbono resultantes de ambas emisiones directas de refrigerante y emisiones indirectas de GEI durante el ciclo de vida del equipo.

TEWI es definido por Gao et al. (Gao et al., 2022) así:

$$TEWI_{g,i} = (ED_{g,i}^{ini} + ED_{g,i}^{op} + ED_{g,i}^{man} + ED_{g,i}^f) \cdot PCG_{100} + CE_{g,i} \cdot IC_{g,i} \cdot n \quad (9)$$

Donde las emisiones directas en kg de CO₂ eq, están comprendidas por las emisiones iniciales (ED^{ini}), emisiones de funcionamiento (ED^{op}), emisiones de mantenimiento (ED^{man}) y emisiones al final de la vida útil (ED^f). Las emisiones indirectas están comprendidas por CE que indica el consumo anual de electricidad, en kWh; IC indica la intensidad de las emisiones de carbono del suministro eléctrico, en kg/kWh; g e i indican el tipo de refrigerante, y el país. En la tabla A-2.8 del Anexo se encuentra la tabla con los factores de emisión utilizados.

3.5 Uso del modelo de cambio climático simple FaIR 2.2

Para estimar el impacto del calentamiento global de las emisiones GEI asociadas a los HFCs emitidos de aires acondicionados residenciales en América Latina, se utiliza el modelo Finite-Amplitude Impulse Response (FaIR – Versión 2.2). Este modelo, desarrollado por Leach et al. (2021), está disponible en su repositorio oficial y es ampliamente reconocido por su capacidad de simular respuestas climáticas de contaminantes de corta vida (Cain et al., 2022).

Implementación técnica

El modelo se implementó en Python (versión 3.11) y se utilizaron las bibliotecas NumPy, Pandas y Matplotlib para el procesamiento de datos y visualización de resultados. Todo el código está documentado y disponible en la sección 3 del Anexo.

Entradas principales del modelo

1. Emisiones anuales de CO₂ equivalente:
 - Datos de emisiones en América Latina asociadas a sistemas de aire acondicionado residencial para el periodo 2000-2050. Estas emisiones fueron obtenidas a partir de las proyecciones realizadas en este estudio, considerando los escenarios A - Negocios como siempre, B - Enmienda de Kigali, C - Cambio escalón.
2. Características de los GEI asociados a los HFCs:
 - Tiempo de vida atmosférico, forzamiento radiativo por unidad de masa, y otras propiedades claves. Estos valores fueron obtenidos directamente de ejemplos proporcionados en el repositorio oficial del modelo. Para mayor detalle, estos se incluyen en la Tabla A-3.1 del Anexo 3.
3. Configuración del modelo:
 - Se utilizó un conjunto de parámetros y condiciones iniciales proporcionados en ejemplos del repositorio oficial, los cuales determinan cómo responde el modelo a diferentes escenarios de emisiones. Esto incluye el uso de forzamientos solares y volcánicos fijados

en cero ya que este estudio se enfoca solamente en el aporte de los GEI asociados a los HFCs.

FaIR utiliza un sistema de ecuaciones diferenciales para transformar emisiones en concentraciones, y estas en forzamiento radiativo y anomalías de temperatura. Las ecuaciones se pueden apreciar en la figura A-3.3 del Anexo. Este enfoque es una simplificación del ciclo del carbono y el sistema climático, está en acuerdo con otros modelos usados por el IPCC.

Los resultados esperados son el forzamiento radiativo y la anomalía de la temperatura. Estos valores fueron evaluados en los resultados bajo los tres escenarios definidos en este estudio, y sus diferencias permiten cuantificar el impacto de la implementación de la Enmienda de Kigali en América Latina.

En la figura 3.2 se muestra el flujo de información que se le entrega al modelo FaIR y los resultados que se obtienen a partir de él:

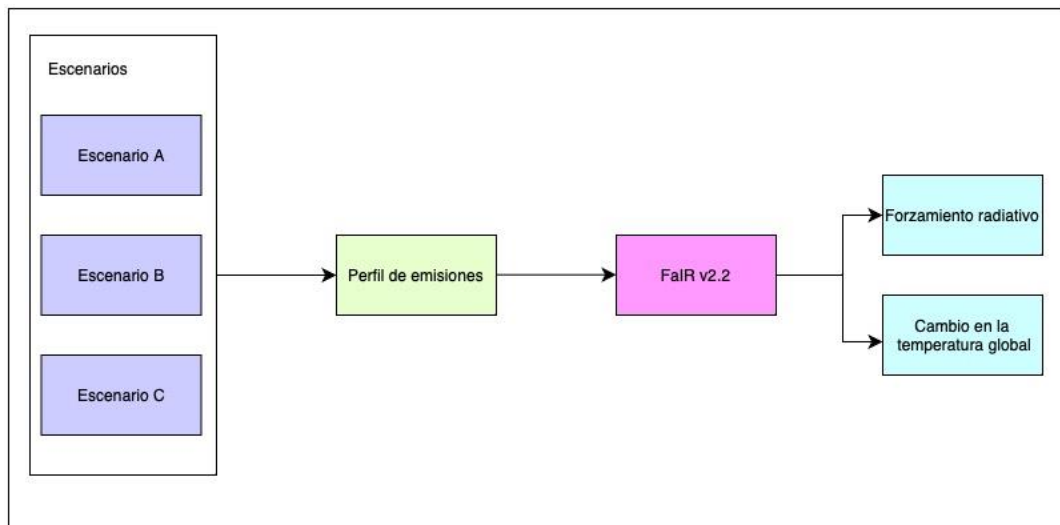


Figura 3.2 Flujo de información para modelar los tres escenarios de emisión (A, B, C) y obtener forzamiento radiativo y temperatura como resultado. Elaboración propia.

4. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados de esta investigación. En primer lugar, se presenta el estado de América Latina sobre la Enmienda de Kigali y la contribución de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a los HFC. Luego se presenta el perfil de emisiones en base a los tres escenarios establecidos. En la segunda parte, se presentan los resultados de implementar un modelo demanda-emisiones para evaluar el potencial de reducción de emisiones de GEI en el sector de aire acondicionado residencial en América Latina, como resultado de la sustitución de HFCs por propano (R-290). Finalmente, se presentan la cuantificación del efecto de la sustitución por propano de los refrigerantes HFC utilizados en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en términos de forzamiento radiativo y anomalía de la temperatura.

4.1 Contexto en América Latina sobre las emisiones de gases de efecto invernadero asociados a los HFC

4.1.1 Ratificación de la Enmienda de Kigali por países en América Latina

Del Secretariado de Ozono de las Naciones Unidas (Vienna Convention, 2016b), 163 países han ratificado la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal para reducir el consumo y la producción de HFC. En América Latina, todos los países a excepción de Guyana Francesa, Guyana y Surinam han avanzado en el proceso, con distintos niveles de adhesión, donde la amplia mayoría ha ratificado formalmente el consentimiento del Estado para cumplir con las obligaciones de la Enmienda.

Esto evidencia un alto nivel de compromiso en América Latina para implementar la Enmienda de Kigali. A partir de ello, cada país es responsable de diseñar estrategias para cumplir con la meta al 2045. Algunos países ya han presentado planes de implementación de este acuerdo, por ejemplo, Chile publicó este 2024 un plan enfocado en fortalecer las instituciones relacionadas con la supervisión, la verificación y el cumplimiento de la Enmienda de Kigali, además de crear y fortalecer capacidades para implementar nuevas alternativas (Sanchez, 2024). México además de presentar una hoja de ruta para la implementación de la Enmienda de Kigali, implementan tres medidas de mitigación en el Reporte de Inventario de GEI (Gobierno de México, 2022), como la sustitución de HFC-134a por

isobutano (R-600a) y propano (R-290) en sectores específicos. Colombia y Argentina también desarrollaron planes de mitigación. (Gobierno de Colombia, 2022).

En contraste con los países mencionados, no se ha encontrado una razón explícita por parte de Surinam de no ratificar el acuerdo. Pero en 2014, Surinam declaró tener una economía de carbono negativo, al estar cubierto en un 93% por bosques, que actúan como un sumidero de carbono masivo (Naciones Unidas, 2020). En el reporte de inventario de GEI del 2022, no reportan emisiones de HFC. Guyana, por su parte, no estima las emisiones de HFC, pero ha anunciado esfuerzos para recolectar datos de importaciones entre 2024 y 2026. Las emisiones de GEI de Guyana Francesa están incluidas en el inventario nacional de Francia, pero no cuenta con datos específicos para su territorio.

4.1.2 Emisiones de gases HFC en América Latina

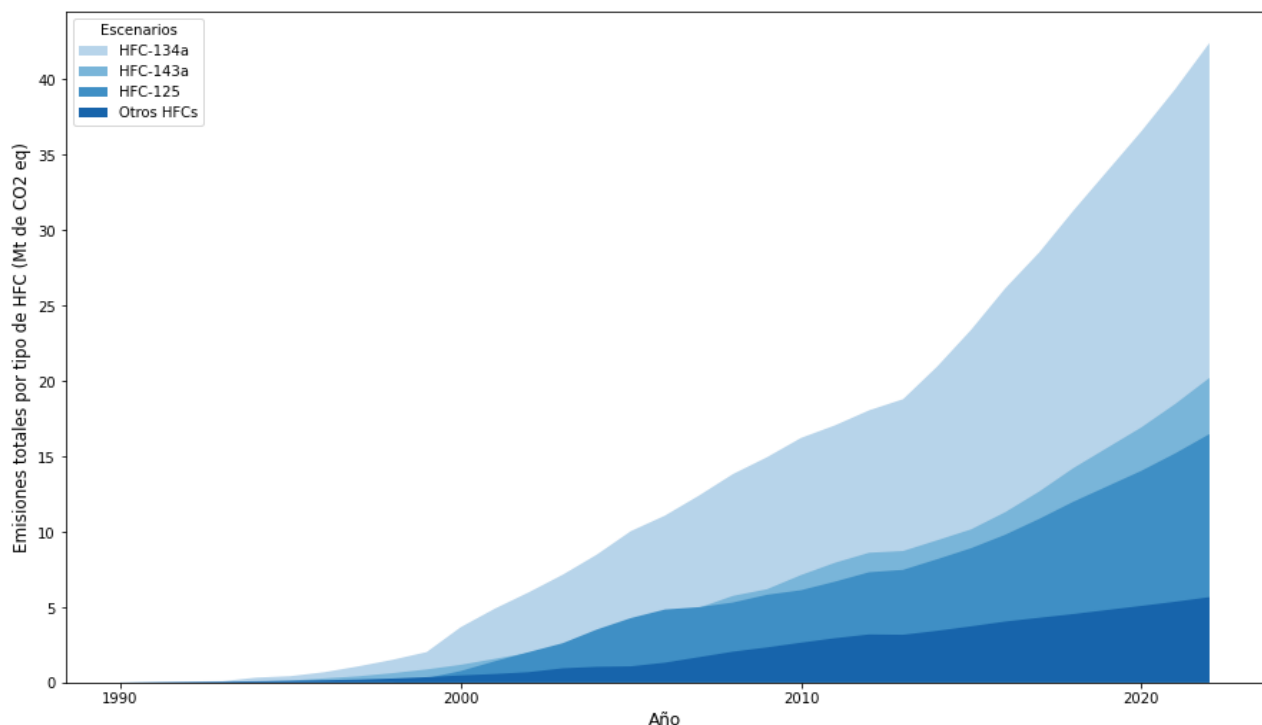
El perfil de GEI asociado a las emisiones de HFC en los países de América Latina se establece principalmente utilizando datos de la fuente EDGAR, complementados con información proveniente de los Inventarios Nacionales reportados por la UNFCCC. La tabla A-1.1 en el Anexo 1 resume la disponibilidad de datos por país y gas HFC. La información faltante en los datos de EDGAR, complementada por los reportes nacionales de GEI, se identifica con un marcador 'x' de color amarillo.

Se puede observar que EDGAR no cuenta con registros de emisiones para ciertos países, tales como Belice, Guyana Francesa, Guyana y Surinam. En el caso de Bolivia, solo se dispone de información para el HFC-134a, mientras que Brasil y Uruguay reportan emisiones de seis gases de los diez gases HFC. La mayoría de los países restantes (Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá, Paraguay y Perú) cuentan con datos para ocho de los diez gases HFC, con ausencia de información para el HFC-23 y HFC-4310mee. Para Argentina y Venezuela se tiene la información sobre todos los gases excepto el HFC-4310mee, mientras que México es el único país con registros completos de todos los gases HFC. En el caso de Belice, aunque no hay datos desglosados por gas, se dispone de la suma total de emisiones de GEI asociados a HFC.

La limitada información sobre ciertos gases, como el HFC-23 y HFC-4310mee, tiene explicaciones específicas. El HFC-23 se genera como un subproducto durante la producción del

HCFC-22, cuyo manejo esta estrictamente regulado por el Protocolo de Montreal. Estas regulaciones incluyen requisitos de capturar y destruir el HFC-23 generado, lo que explica su baja representación en los inventarios de emisiones (Environmental Investigation Agency, 2024). Por otro lado, el HFC-4310mee tiene aplicaciones limitadas, como en la limpieza de precisión y manufactura de productos electrónicos (European Chemicals Agency, s.f).

La Figura 4.1 a continuación presenta la contribución de GEI, asociadas a cada gas HFC, al total emitido entre 1990 y 2022. La línea de la parte superior representa las emisiones totales, calculadas como la suma de las contribuciones anuales de cada gas. Los resultados evidencian un crecimiento sostenido a lo largo de los años, especialmente a partir de los años 2000.



Se observa que el HFC-134a presenta el mayor aporte a las emisiones totales, seguido del HFC-125 y HFC-143a. En cambio, el resto de los HFC (HFC-32, HFC-152^a, HFC-245fa, HFC-227ea, HFC-245fa, HFC-365mfc) muestran un uso constante a lo largo del período analizado. Entre los gases representados, solo el HFC-134a es usado como fluido puro, mientras que el HFC-143a y HFC-125 forman parte de mezclas de HFC empleadas en los sectores de refrigeración y aire acondicionado. Las

mezclas más comunes de HFC son el R-404A, R-410A y R-407C, que contienen estos tres HFCs en distintas proporciones. El HFC-134a es usado en todas las aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado, ya sea doméstica, comercial, industrial y en transporte, representando el 26% del mercado de estos gases (CCAC, 2022). Además, se utiliza en aerosoles, solventes y espumas. El R-410A se destina principalmente a sistemas de aire acondicionado doméstico, comercial e industrial, mientras que el R-407 C se emplea en aire acondicionado industrial y de transporte, así como en refrigeración industrial. Por último, el R-404 A se usa principalmente en refrigeración comercial, industrial y transporte.

El aumento de emisiones en América Latina puede atribuirse al crecimiento de la población, la urbanización acelerada y la expansión de actividades industriales en la región. En la figura A-1.2 en el Anexo 1, se observa que el nivel de urbanización ha crecido en América Latina de un 71% en 1990 a un 81% en 2022. Además, la entrada en vigor del Protocolo de Montreal en 1989 promovió la reducción en la producción y consumo de CFCs y HCFCs, lo que incrementó el uso de HFCs como alternativas. Esto resalta la efectividad de las regulaciones políticas para mitigar las emisiones de estos compuestos. En el futuro, la Enmienda de Kigali podría desempeñar un papel crucial en la reducción de emisiones de HFCs alineándose con los objetivos globales de mitigación del cambio climático (CCAC, 2016).

Contribución por país

La Figura 4.2 muestra la tendencia general de la contribución de GEI asociadas a HFC en América Latina, evidenciándose un incremento progresivo en las emisiones de todos los países desde el año 2000. En cuanto a la contribución de emisiones, se destaca que México lidera la región superando los 20 Mt de CO₂ equivalente en 2022, seguido de cerca por Brasil y Argentina, con emisiones de aproximadamente 15 Mt de CO₂ equivalente. Este patrón refleja no solo el tamaño de las economías, sino también del crecimiento de la industria de refrigeración y acondicionamiento climático, impulsado por la urbanización y el aumento del PIB per cápita en la región, que pasó de \$2.800 a \$10.190 dólares estadounidenses de 1990 a 2022 (ver figura A-1.1 del Anexo).

Por otro lado, países como Chile y Colombia presentan emisiones moderadas, entre los 6 y 10 Mt de CO₂ equivalente, mientras que las menores emisiones provienen de Nicaragua, Honduras y

Uruguay. Aunque estos últimos mantienen un crecimiento constante, sus emisiones son de una menor magnitud, lo que puede atribuirse a poblaciones pequeñas y economías menos industrializadas.

Las tendencias observadas subrayan la necesidad de realizar todos los esfuerzos necesarios para garantizar la ejecución y cumplimiento de la Enmienda de Kigali, considerando que estos gases tienen un alto potencial de calentamiento global (PCG), que puede llegar a ser hasta mil veces más que el CO₂.

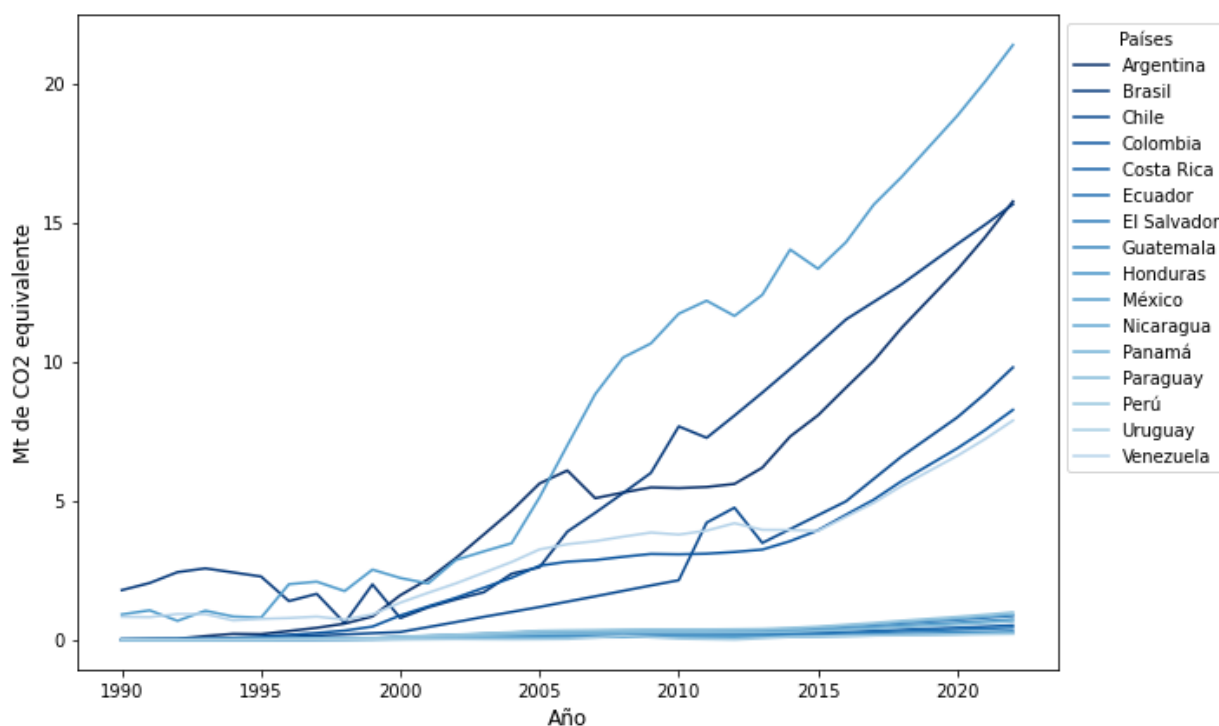


Figura 4.2 Emisiones de GEI asociadas a HFCs por país. Elaboración propia basado en la fuente de datos EDGAR.

4.2 Perfil de emisiones

Objetivo específico 1: Establecer futuros perfiles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociados a refrigerantes hidrofluorocarbono (HFC) en América Latina, como resultado de la potencial implementación de la Enmienda de Kigali.

En la figura 4.3 se observa el perfil de emisiones de GEI asociadas a HFC en América Latina según los escenarios especificados en la sección 3.2.2. A continuación se describen las principales características de cada escenario:

- Escenario A – Negocios como siempre: basado en las proyecciones de crecimiento del PIB en América Latina, estima que las emisiones alcanzarían los 128 Mt de CO₂ eq para 2050.
- Escenario B – Enmienda de Kigali: Representa una reducción progresiva, destacando el impacto positivo de la implementación del acuerdo. Según este escenario con la implementación de este acuerdo podrían llegar a mitigarse 111 Mt de CO₂ eq, en comparación con el escenario no regulado.
- Escenario C: se implementa para representar una falta de acción temprana y sus impactos significativos en la acumulación de GEI en la atmósfera, con él se mitigarían 35 Mt de CO₂ eq al 2045.

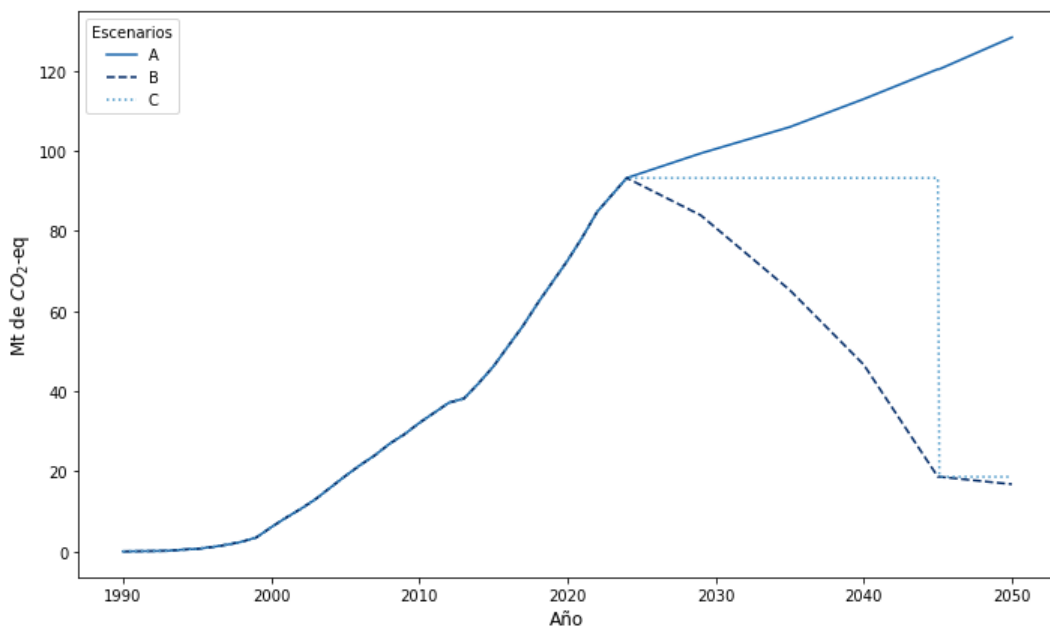


Figura 4.3 Perfil de Emisiones de GEI asociados a HFC en América Latina hasta el 2050. Elaboración propia.

Los últimos dos escenarios destacan la importancia de actuar de manera oportuna. Un retraso en la implementación de regulaciones contribuye a una acumulación de estos gases en la atmósfera. Según Velders et al. (Velders et al., 2022) la Enmienda de Kigali evitará casi el 90% del aumento de

temperatura asociado a los HFC. Tal como mencionó Vincent Biruta, presidente de la Reunión de las Partes y Ministro de Recursos Naturales de Ruanda: “*La Enmienda de Kigali es el paso de mitigación del cambio climático más significativo que el mundo haya dado jamás y nos acerca a mantenernos por debajo de 1.5 °C*”(CCAC, 2016). Además, la transición gradual permite una transición menos disruptiva para los países. La adopción inmediata de la Enmienda de Kigali no solo permite mitigar el calentamiento global, sino que también permite una transición tecnológica más equilibrada. Esta enmienda, también es el camino para lograr los objetivos del Acuerdo de París.

4.3 Implementación de modelo para evaluar el potencial de reducción de emisiones GEI en el sector de aire acondicionado residencial en América Latina

Objetivo específico 2: Implementar un modelo de demanda-emisiones para evaluar el potencial de reducción de emisiones de GEI en el sector de aire acondicionado residencial en América Latina, como resultado de la sustitución de HFCs por propano (R-290).

4.3.1 Proyección de Demanda de Aire Acondicionado Residencial

La demanda de unidades de equipos de aire acondicionado de uso residencial (AAR) depende de factores demográficos, climáticos y económicos. Las figuras 4.4 y 4.5, muestran la difusión de AAR y la proyección de unidades de AAR, respectivamente en cinco países latinoamericanos: Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México. Estos países fueron elegidos por ser los que más contribuyen a las emisiones de GEI asociados a HFC.

En la figura 4.4 se observa cómo la difusión de AAR varía según el país, donde México lidera las proyecciones para el año 2050, alcanzando un 98%. El país con menos difusión de AAR es Chile, que alcanza un 25%. La difusión de AAR refleja el impacto combinado de los ingresos por hogar y los grados día de enfriamiento (CDD). México no cuenta con el ingreso más alto entre estos países, es el tercero después de Chile y Argentina, pero si tiene altos valores de CDD, mientras que Chile, a pesar de su alto ingreso por hogar, tiene un bajo CDD, lo que se refleja en una baja difusión de AAR al 2050. En promedio, los cinco países estudiados alcanzarían una difusión del 77% para 2050, creciendo desde el 46% actual.

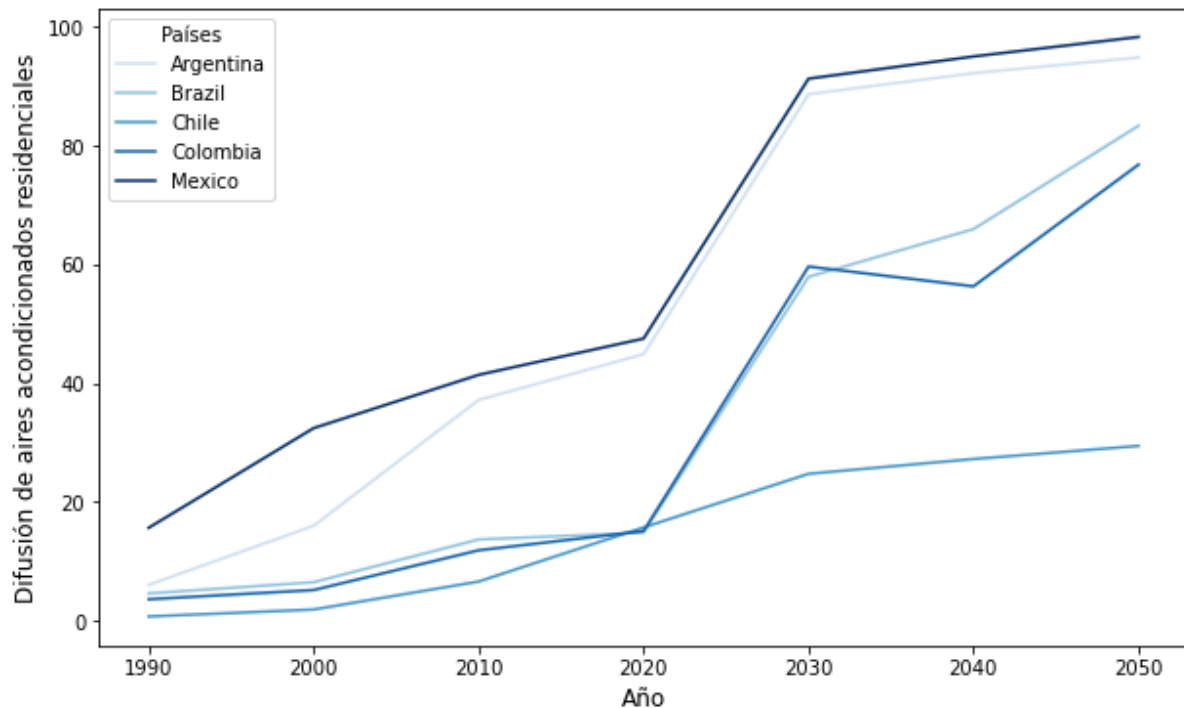


Figura 4.4 Penetración de unidades de AAR en Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México. Elaboración propia.

En la figura 4.5 se evidencia que el stock de unidades de aire acondicionado residencial aumentará significativamente hasta el 2050. En 1990, se estima que existían 5 millones de unidades, cifra que creció a 39 millones estimadas para 2022, luego según las proyecciones, este stock alcanzará 148 millones de unidades en 2050, casi cuatro veces más que en 2022. Brasil y México lideran el stock de unidades de AAR, debido al tamaño de sus poblaciones, las condiciones climáticas y el ingreso por hogar. En contraste, Chile, debido a sus características climáticas, exhibe una demanda considerablemente menor y constante en el tiempo.

El stock de estos equipos ha experimentado un crecimiento significativo, aumentando ocho veces entre 1990 y 2022. Se espera que esta tendencia continúe, con un incremento del 60% para 2030 y 14% para el 2050. Este aumento está principalmente impulsado por la capacidad adquisitiva de los hogares, que determina la compra de los equipos, y por el incremento de las temperaturas globales.

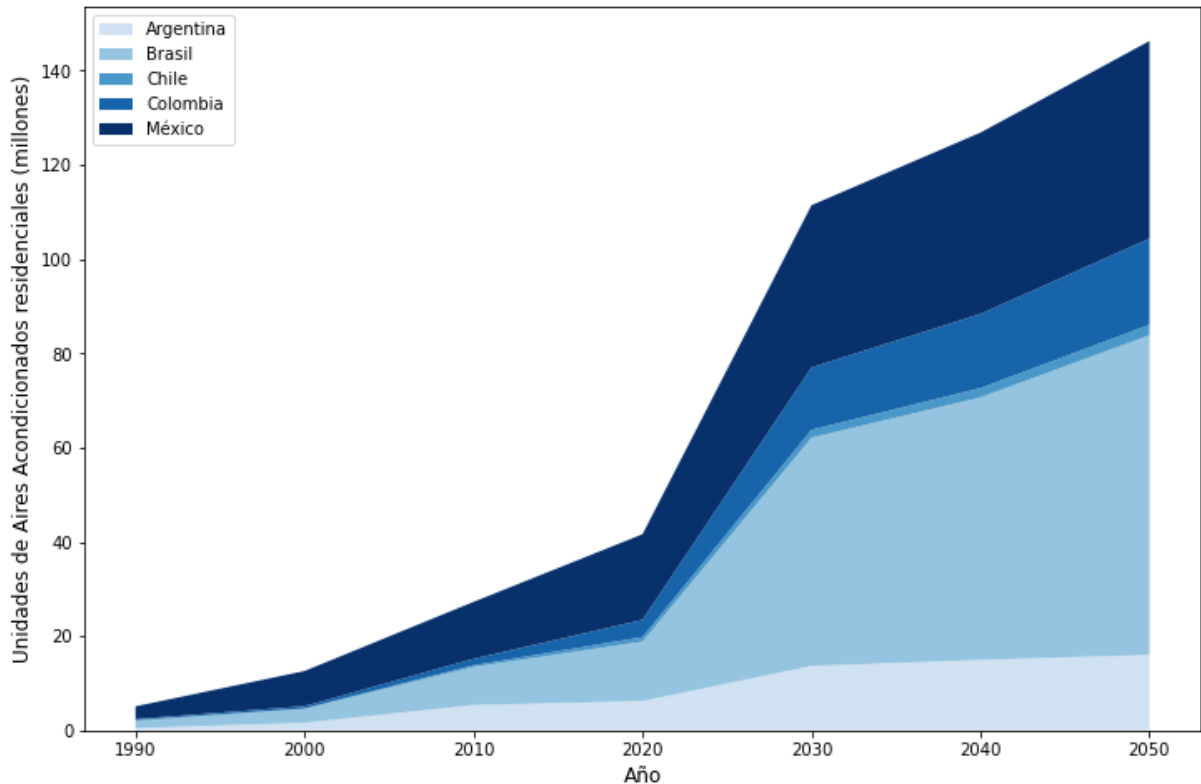


Figura 4.5 Proyección de unidades de AAR en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México. Elaboración propia.

El crecimiento proyectado está alineado con estudios previos, aunque existen discrepancias en el periodo posterior a 2030. Estas discrepancias pueden atribuirse a los supuestos utilizados en las proyecciones demográficas y económicas por los estudios por Shah et al. (2015) y la Agencia de Energía Internacional (IEA, 2018), además que se hicieron en 2015 y 2018, respectivamente, lo que sugiere que podrían basarse en datos que ya no reflejan las condiciones actuales. Comparando con estudios internacionales, el crecimiento de la difusión y del stock de AAR en Latinoamérica es destacable, pero moderado con respecto a países como China e India, donde el tamaño de población, urbanización y temperaturas extremas ha llevado a alcanzar el 100% de difusión en la actualidad.

4.3.2 Gases de efecto invernadero mitigado en el reemplazo del refrigerante R-410A por propano (R-290)

El Potencial de Calentamiento Global a 100 años (PCG_{100}) es una métrica mide el impacto climático de diversas sustancias en relación con el CO_2 . En este estudio, se evalúa el beneficio climático del reemplazo del refrigerante R-410A ($PCG_{100} = 2.088$) por el R-290 ($PCG_{100} = 3$) en

equipos de aire acondicionado residencial. Para este análisis, se asume que todos los hogares emplean equipos del tipo split de velocidad fija como caso base. Este análisis considera tanto las emisiones directas provenientes de las fugas anuales de refrigerantes estipuladas por la IPCC (2006), como las emisiones indirectas relacionadas con el consumo de electricidad de los equipos utilizados en el caso base, que se emplean para realizar las comparaciones en este estudio.

En la tabla 4.1 se presentan las emisiones totales proyectadas para los años 2030, 2040 y 2050 bajo los tres escenarios descritos anteriormente. En el escenario A se observa que las emisiones aumentan significativamente hasta el 2030, y luego disminuyen moderadamente hasta el 2050, llegando a 46,64 Mt de CO₂ eq, lo que se debería a la descarbonización del suministro eléctrico de los países. Con el escenario B, debido a las emisiones indirectas aumentarían a 72,92 Mt de CO₂ eq en el 2030, pero luego en una disminución progresiva se emitirían solamente 29,81 Mt de CO₂ eq al 2050. En el escenario C también se refleja una reducción drástica como el de Kigali, pero con diferencias intermedias en el 2030 y 2040, representando el impacto de no realizar una transición progresiva. En las tablas A-2.9 y A-2.10 del Anexo 2 se puede ver el desglose de las emisiones directas e indirectas respectivamente. Aunque el R-410a tiene un PCG más alto que el propano (R-290), las emisiones directas provienen de fugas de refrigerante, las cuales son pequeñas (entre 0,38 y 1 kg de refrigerante). Se observa que las emisiones indirectas son mucho mayores debido a la gran cantidad de electricidad consumida al año por los equipos.

Tabla 4.1 Proyección de emisiones de GEI en el sector de AAR en América Latina medidas en Mt de CO₂ eq.
Elaboración propia.

Escenarios	2022	2030	2040	2050
A	36,34	56,66	52,77	46,64
B	36,34	72,92	39,52	29,81
C	36,34	59,08	80,08	29,81

En la tabla 4.2 se presenta la cantidad de emisiones GEI mitigadas con los escenarios B – Enmienda de Kigali y C - Cambio escalón con respecto al escenario A - Negocios como siempre. Para 2030, la implementación de la Enmienda no lograría mitigar los GEI debido a las emisiones indirectas. En el escenario B se emitirían 16,6 Mt de CO₂ eq más, mientras que el escenario C contribuiría 2,41 Mt de CO₂ eq. No obstante, gracias a la disminución de un 50% de las emisiones, para 2040 se

lograrían mitigar 13,24 Mt de CO₂ eq en el escenario con la Enmienda de Kigali, mientras que en el escenario de cambio escalón, no se mitigarían GEI. Para 2050, ambos escenarios convergen en la mitigación de 16,83 Mt de CO₂ eq, exclusivamente en el área de aire acondicionado residencial.

Tabla 4.2 Proyección de emisiones de GEI en el sector de AAR en América Latina medidas en Mt de CO₂ eq.
Elaboración propia.

Escenarios	2022	2030	2040	2050
B	-	-16,26	13,24	16,83
C	-	-2,41	-27,31	16,83

Estos resultados demuestran una oportunidad clave para lograr una mitigación sustancial, destacado la importancia de avanzar hacia la transición de manera oportuna. El escenario A, muestra una trayectoria insostenible de crecimiento en emisiones GEI y el escenario C destaca como una transición temprana y planificada puede lograr una reducción significativa en las emisiones antes de 2050. Además, se observa que una reducción gradual de los HFC podría generar mayores beneficios si se complementa con estrategias que mejoren la eficiencia de los equipos que los utilizan, ya que las emisiones indirectas juegan un papel fundamental en la generación total de GEI.

4.3.3 Comparación del impacto total equivalente durante la vida útil del equipo de aire acondicionado residencial en países seleccionados

La figura 4.6 muestra el impacto total equivalente sobre el calentamiento global a lo largo del ciclo de vida de los equipos de aire acondicionado residencial para cinco países de América Latina: Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México. Se compara el impacto climático de los dos tipos de refrigerantes utilizados como caso base:

- R-410A (fabricado por LG con eficiencia de 3 W/W)
- R-290 (fabricado por Midea con eficiencia de 3,5 W/W)

Las emisiones generadas durante el ciclo de vida de estos equipos están compuestas por sus emisiones directas (asociadas al PCG) como por las indirectas (asociadas al consumo energético, influenciado por la eficiencia del equipo, horas de uso anuales y años de vida útil).

Se observa que las emisiones directas del R-410A son consistentemente mayores que las de R-290 en todos los países, aunque las emisiones directas son relativamente pequeñas por lo que no son perceptibles en la figura.

En cuanto a las emisiones indirectas, los equipos con R-290 muestran la ligera ventaja en eficiencia energética sobre los que usan R-410 A, con una destacada mejora en Brasil y Chile, donde la intensidad de carbono de la matriz eléctrica es más baja en comparación a otros países. En México, el impacto de las emisiones indirectas es especialmente notable para el equipo que usa R-410A, ya que es el país con mayor factor de intensidad al carbono y también el que presenta más horas de uso anual. Brasil muestra el menor impacto total para ambos refrigerantes, favorecido por tener la matriz eléctrica más limpia.

Los equipos que emplean el R-290 no solo logran reducir significativamente las emisiones directas, sino que también contribuyen a la disminución de las emisiones indirectas debido a su mayor eficiencia energética. Esto resalta la necesidad de desarrollar el uso de refrigerantes de bajo PCG en la transición hacia tecnologías más limpias, además de desarrollar equipos que sean más eficientes.

El factor de intensidad de carbono tiene un peso considerable en las emisiones indirectas, lo que implica que países como México y Colombia deben priorizar el despliegue de energías renovables para maximizar los beneficios de equipos más eficientes. El uso de R-290 ofrece ventajas importantes, ya que se requiere una carga de refrigerante menor en comparación con el R-410 A, se (0,38 kg frente a 1 kg respectivamente), y es un 14% más eficiente energéticamente. La desventaja que tiene el propano es ser inflamable, por lo que debe ser tratado de forma cuidadosa por un personal entrenado para asegurar la prevención de fugas y una operación segura.

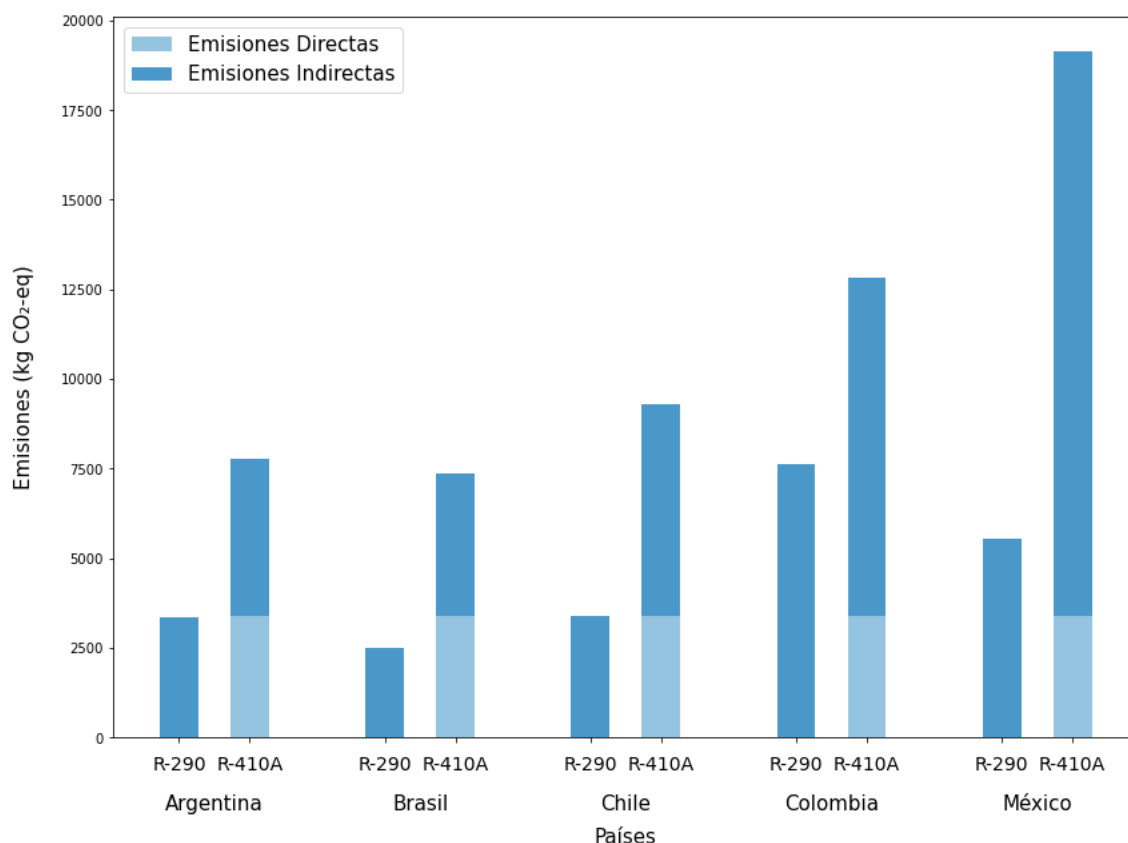


Figura 4.6 Impacto total equivalente sobre el calentamiento global en equipos que utilizan R-290 y R-410 como refrigerante en distintos países. Elaboración propia.

4.4 Cuantificación de la sustitución por propano (R-290) en términos de forzamiento radiativo y cambio de temperatura global.

Objetivo específico 3: Cuantificar el efecto de la sustitución por propano de los refrigerantes HFC utilizados en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en el contexto de la Enmienda de Kigali, en términos de forzamiento radiativo y cambio en temperatura global, usando el modelo de cambio climático simple FaIR 2.2 .

Para determinar la contribución del efecto de la sustitución por propano de los refrigerantes HFC utilizados en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en el contexto del Enmienda de Kigali, se utiliza el modelo de cambio climático FaIR 2.2. Los gráficos generados

muestran los cambios en las emisiones de CO₂ equivalente, el forzamiento radiativo y la anomalía de temperatura global desde el año 2000 hasta 2050 en los tres escenarios (A,B,C). A partir de las emisiones directas provenientes del sector estudiado, se obtiene el forzamiento radiativo que sigue un patrón similar al de las emisiones. En el escenario A, se observa cómo el forzamiento radiativo presenta un incremento constante durante los años, alcanzando $4,3 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2}$ al 2050. En contraste, los escenarios B y C demuestran el impacto positivo de las estrategias de mitigación. En el escenario B, el forzamiento radiativo se reduce en $3,1 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2}$ con respecto al A, mientras que el escenario C logra una disminución levemente mayor de $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2}$.

Cabe señalar que estos valores difieren de los reportados por Velders et al. (2022), quienes realizaron su investigación basados en emisiones provenientes de distintas fuentes y un modelo climático distinto (MAGICC6), lo que puede explicar las discrepancias observadas. La magnitud de estos resultados es menor que los reportados en su estudio, ya que en el estiman que un 6% del forzamiento radiativo proviene de América Latina, y que el 37% del forzamiento radiativo proviene de los aire acondicionados estacionarios, donde no especifican cuantos son residenciales dentro de ese porcentaje. Siguiendo estos cálculos el forzamiento radiativo de los aire acondicionados estacionarios en América Latina debería ser alrededor de $3,42 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$.

La anomalía de la temperatura sigue un patrón similar al de las emisiones y forzamiento radiativo. En el escenario A, las emisiones podrían contribuir $3 \cdot 10^{-4} \text{ °C}$ al aumento de la temperatura global, mientras que con los escenarios de mitigación B y C, se podría evitar una contribución de $2 \cdot 10^{-4}$ y $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ °C}$, respectivamente, al 2050. Es decir, una contribución del 66 y 60% respectivamente.

Comparativamente, Velders et al. (2022) proyectaron que los HFC globales podrían contribuir entre $0,10 \text{ °C}$ y $0,12 \text{ °C}$ para el 2050. También estimaron que un 6% del forzamiento radiativo proviene de América Latina, y que el 38% proviene de los aires acondicionados residenciales. Este porcentaje sugiere que las emisiones de la región aportarían entre $2,3 \cdot 10^{-3}$ y $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ °C}$ al 2050. Al no saber cuál es el porcentaje de los aires acondicionados residenciales dentro del porcentaje de aire acondicionados estacionarios, no es posible determinar si se encuentra en el rango. Para contextualizar la relevancia de estos valores, el IPCC estima que los gases de efecto invernadero contribuyan entre $1,4\text{-}4,4 \text{ °C}$ al calentamiento global en el 2100.

A pesar de que los resultados de la contribución del área estudiada no son numéricamente significativos, se logra comprobar el impacto que tendría la implementación de la Enmienda de Kigali con respecto al calentamiento global. También, es importante destacar que el uso del Potencial de Calentamiento Global (PCG) a 100 años, como se recomienda en el IPCC, puede no reflejar de manera adecuada el comportamiento de los gases fluorados, dado que esos gases son de vida corta, con una permanencia en la atmósfera de 21,7 años en promedio (Janos Maté, n.d.). En este sentido, según Miranda et al. (2023), el GWP no representa las respuestas climáticas a las emisiones de estos gases, dado que no considera su corta duración en la atmósfera.

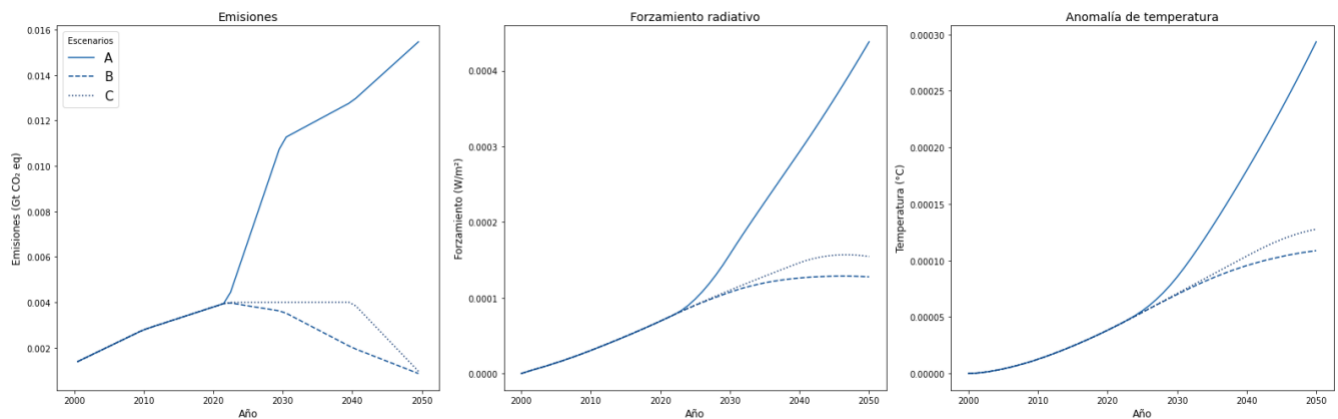


Figura 4.7 Contribución de las emisiones de AAR bajo distintos escenarios en el forzamiento radiativo y anomalía de temperatura. Elaboración propia

5. Conclusión

Este estudio evalúa la utilización de propano en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina sobre el calentamiento global, en el contexto de la Enmienda de Kigali para la reducción de emisiones de compuestos hidrofluorocarbono (HFC). La revisión de la literatura identifica al HFC-134a, HFC-143A y HFC-125 como los gases más utilizados en la región, debido a sus diversas aplicaciones en el sector de aire acondicionado y refrigeración. Se identifica que los países que más contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero asociados a los HFC son Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México, debido a su gran población, su economía y condiciones climáticas.

Este trabajo establece futuros perfiles de emisiones de GEI asociados a refrigerantes HFC en América Latina, como resultado de la implementación de la Enmienda de Kigali. Se establecen tres escenarios: el escenario A se construye en base a factores económicos, como el crecimiento del PIB, y proyecta 128 Mt de CO₂ eq al 2050; el escenario B considera la disminución progresiva de emisiones de HFC según la Enmienda de Kigali, lo que podría resultar en un ahorro de 111 Mt de CO₂ eq; y el escenario C contempla una acción tardía con respecto a la meta del 2045 de la Enmienda de Kigali, en forma de escalón.

Se estima que, en función de factores económicos, climáticos y demográficos, para 2050 habrá un total de 148 millones de unidades de aire acondicionado residencial, siendo México el país con más unidades y Chile el que tendrá menos. Dada la incertidumbre del crecimiento económico y las condiciones climáticas, el factor más crítico que influye en los resultados de esta proyección es la tendencia de los futuros cambios de población. En los escenarios A y B, las emisiones de GEI del sector de AAR alcanzarán su punto máximo en 2030 con unas emisiones anuales de GEI de 56,66 y 72,92 Mt CO₂-eq respectivamente. Con la implementación de la Enmienda de Kigali, se podrían mitigar 16,83 Mt CO₂-eq en el 2050.

Por lo tanto, se concluye que la principal estrategia futura para reducir los GEI de este sector será centrarse en las emisiones asociadas al consumo de electricidad para operar los sistemas de aire acondicionado. Mejorar la eficiencia energética de estos equipos será esencial para disminuir este tipo de emisiones. La transición hacia refrigerantes de bajo PCG, combinada con mejoras en la eficiencia

energética de los equipos, puede proporcionar un beneficio aún mayor. En este sentido, se recomienda realizar estudios económicos y sociales sobre la viabilidad de la transición. Además, esta investigación reconoce la limitación de usar sólo un tipo de aire acondicionado residencial por lo que se sugiere ampliar el análisis para más alternativas en futuras investigaciones.

El impacto de la sustitución de los refrigerantes HFC por propano en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en el contexto de la Enmienda de Kigali, calculado con el modelo de cambio climático simple FaIR v2.2, muestra una contribución al 2050 de $4,3 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2}$ y $3 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$ en el escenario A, y $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2}$ y $1 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$ en el escenario B, mostrando una contribución de mitigación de 66% de la temperatura.

En conclusión, la transición a refrigerantes limpios contribuirá significativamente al objetivo de neutralidad de carbono, pero dependerá de las políticas públicas y la cooperación internacional. A pesar de los desafíos, América Latina presenta oportunidades únicas, como el acceso a energías renovables, pero se deben aplicar estrategias para aprovechar su máximo uso. Es fundamental tener en cuenta que las suposiciones que se utilizó para el estudio deberían ser analizadas y verificadas en investigaciones futuras.

6. Referencias

- Sanchez, A. (2024). Plan de Implementación de la Enmienda de Kigali en Chile, Fase I.. Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Chile. Disponible en: https://ozono.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/05/Presentacion-LANZAMIENTO-KIP-CHILE_MAYO2024_VF.pdf
- Brossard Perez, L. F., Barbosa Cortez, L. A., & Zukowski Jr., J. C. (1998). Ammonia as a CFC Alternative for Developing Countries: Its Problems and Solutions. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 29(2), 67–70. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0345763125&partnerID=40&md5=ab175f394e5743360a38792437ec28b3>
- Cain, M., Jenkins, S., Allen, M. R., Lynch, J., Frame, D. J., Macey, A. H., & Peters, G. P. (2022). Methane and the Paris Agreement temperature goals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 380(2215). Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0456>
- Climate & Clean Air Coalition (CCAC). (2016). Acuerdo histórico sobre los HFC alcanzado en Kigali. Disponible en: <https://www.ccacoalition.org/es/news/historical-agreement-hfcs-reached-kigali>
- Climate & Clean Air Coalition (CCAC). (2022). A Study on the Impacts of HFC Consumption Trends in Article 5 Countries. Disponible en: <https://www.ccacoalition.org/resources/study-impacts-hfc-consumption-trends-article-5-countries>
- Climate & Clean Air Coalition (CCAC). Lower-GWP Alternatives in Stationary Air Conditioning a Compilation of Case (2019). Disponible en: https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/HFCreport2019_web.pdf
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2020). The economics of climate change in Latin America and the Caribbean. In CEPAL. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/3e136513-76a4-4dd4-b1d5-a118c4e2a45c/content>
- Mcneil, M., Letschert, V., de la Rue du Can, S., Ke, J. (2012). Bottom-Up Energy Analysis System - Methodology and Results. Disponible en: <http://escholarship.org/uc/item/9z48p6t0>
- Department of Economic and Social Affairs, U. N. (2022). Household Size & Composition, 2022. United Nations. Disponible en: <https://www.un.org/development/desa/pd/data/household-size-and-composition>
- Ember (2024); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024) – with major processing by Our World in Data. “Carbon intensity of electricity generation – Ember and Energy Institute” [dataset]. Ember, “Yearly Electricity Data”; Energy Institute, “Statistical Review of World Energy”. Disponible en: <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity>
- Environmental Investigation Agency. (2024). Critical climate targets are being jeopardised by rogue HFC-23 greenhouse gas emissions. Environmental Investigation Agency. Disponible en: <https://eia-international.org/news/critical-climate-targets-are-being-jeopardised-by-rogue-hfc-23-greenhouse-gas-emissions/>

- European Chemicals Agency. (s.f.). HFC-4310mee Substance Infocard. European Chemicals Agency. Disponible en: <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.101.932>
- Gao, E., Zhang, Z., Deng, Q., Jing, H., Wang, X., & Zhang, X. (2022). Techno-economic and environmental analysis of low-GWP alternative refrigerants in cold storage unit under year-round working conditions. *International Journal of Refrigeration*, 134, 197–206. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.11.007>
- Gobierno de Colombia. (2022). Implementación de la Enmienda de Kigali (Reducción consumo HFC) En Colombia y Sectores Involucrados. En Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Disponible en: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/3847-aprobada-la-enmienda-de-kigali-en-comision-segunda-del-senado>
- Gobierno de México. (2022). México: Tercer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2022). Disponible en: <https://unfccc.int/documents/512231>
- IEA. (2018, May 15). Global air conditioner stock, 1990-2050. IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-air-conditioner-stock-1990-2050>
- International Monetary Fund. (2024). GDP per capita, current prices. International Monetary Fund. Disponible en: <https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPDPC@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD>
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 3(7). Disponible en: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol3.html>
- Janos Maté, D. K. (n.d.). The Benefits of Basing Policies on the 20 Year GWP of HFCs. Disponible en: <https://Ozone.Unep.Org/System/Files/Documents/Benefits%20of%20Basing%20Policies%20on%2020%20GWP%20of%20HFCs.Pdf>
- Jiang, P., Li, Y., Bai, F., Zhao, X., An, M., & Hu, J. (2023). Coordinating to promote refrigerant transition and energy efficiency improvement of room air conditioners in China: Mitigation potential and costs. *Journal of Cleaner Production*, 382, 134916. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134916>
- Khosla, R., Miranda, N. D., Trotter, P. A., Mazzone, A., Renaldi, R., McElroy, C., Cohen, F., Jani, A., Perera-Salazar, R., & McCulloch, M. (2020). Cooling for sustainable development. *Nature Sustainability*, 4(3), 201–208. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00627-w>
- Leach, N. J., Jenkins, S., Nicholls, Z., Smith, C. J., Lynch, J., Cain, M., Walsh, T., Wu, B., Tsutsui, J., & Allen, M. R. (2021). FaIRv2.0.0: a generalized impulse response model for climate uncertainty and future scenario exploration. *Geoscientific Model Development*, 14(5), 3007–3036. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3007-2021>
- Leiva Carvajal, D., Reyes Duke, A., Carrasco Bardales, A., & Amador Iscoa, P. (2021). Technical and economic review of the reconversion of refrigerants in an air conditioner: HFCF to HC in Honduras. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 776(1). Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/776/1/012013>
- Miranda, N. D., Giovani Palafox-Alcantar, P., Khosla, R., & McCulloch, M. D. (2023). Metrics for the emissions of F-gas refrigerants. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, 103348. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103348>

- Naciones Unidas. (2020, February 20). La gran importancia de Surinam para afrontar el cambio climático. Noticias ONU. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2020/02/1469182#:~:text=Surinam%20está%20cubierto%20en%20un,de%20carbono%20significa%20menos%20calentamiento>.
- Rodrigues, L. ; A. A. (2020). Environmental responsibility: The contribution from IFBA-Campus Salvador to the environment through the recycling of refrigerants fluids attended by Brazilian Program of HCFC Elimination. *Reativar Ambiental*, 8(4), 275–284.
- Sacasas, D., Vega, J., & Cuevas, C. (2022). An annual energetic evaluation of booster and parallel refrigeration systems with R744 in food retail supermarkets. A Chilean perspective. *International Journal of Refrigeration*, 133, 326–336. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.10.010>
- Shah, N., Khanna, N., Karali, N., Park, W., Qu, Y., & Zhou, N. (2017). Opportunities for Simultaneous Efficiency Improvement and Refrigerant Transition in Air Conditioning. Disponible en: <https://doi.org/10.2172/1838320>
- Shah, N. M. W. V. E. L. A. A. P. (2015). Benefits of Leapfrogging to Superefficiency and Low Global Warming Potential Refrigerants in Room Air Conditioning. Disponible en: <https://international.lbl.gov/publications/benefits-leapfrogging-superefficiency>
- The World Bank. (2022). Cooling Degree Days. The World Bank. Disponible en: <https://esgdata.worldbank.org/data/indicators?lang=en&ind=EN.CL.C.CDDY.XD&transform=level&income=all®ion=all&year=2019>
- Velders, G. J. M., Daniel, J. S., Montzka, S. A., Vimont, I., Rigby, M., Krummel, P. B., Muhle, J., O'Doherty, S., Prinn, R. G., Weiss, R. F., & Young, D. (2022). Projections of hydrofluorocarbon (HFC) emissions and the resulting global warming based on recent trends in observed abundances and current policies. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(9), 6087–6101. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/acp-22-6087-2022>
- Vienna Convention. (2016a). Resumen de medidas de control establecidas por el Protocolo de Montreal Anexo F: Hidrofluorocarbonos (HFCs). Protocolo de Montreal. Disponible en: <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/amendments/kigali-amendment-2016-amendment-montreal-protocol-agreed>
- Vienna Convention. (2016b). Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa Ozono. UN Environment Programme. Disponible en: <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/amendments/kigali-amendment-2016-amendment-montreal-protocol-agreed>
- Wei, M., Ding, C., Rosenquist, G., Coughlin, K., Cubero, E., Burke, T., & Abdelaziz, O. (2024). Benefits and challenges in deployment of low global warming potential R290 refrigerant for room air conditioning equipment in California. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 70, 103937. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103937>

Anexos

Los siguientes anexos contienen la información complementaria organizada según los objetivos específicos de la investigación. Incluyen datos utilizados, resultados intermedios, entre otros.

Anexo A-1: Información complementaria para el Objetivo específico 1

Objetivo específico 1: Establecer futuros perfiles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociados a refrigerantes hidrofluorocarbono (HFC) en América Latina, como resultado de la potencial implementación de la Enmienda de Kigali.

PIB per cápita de América Latina

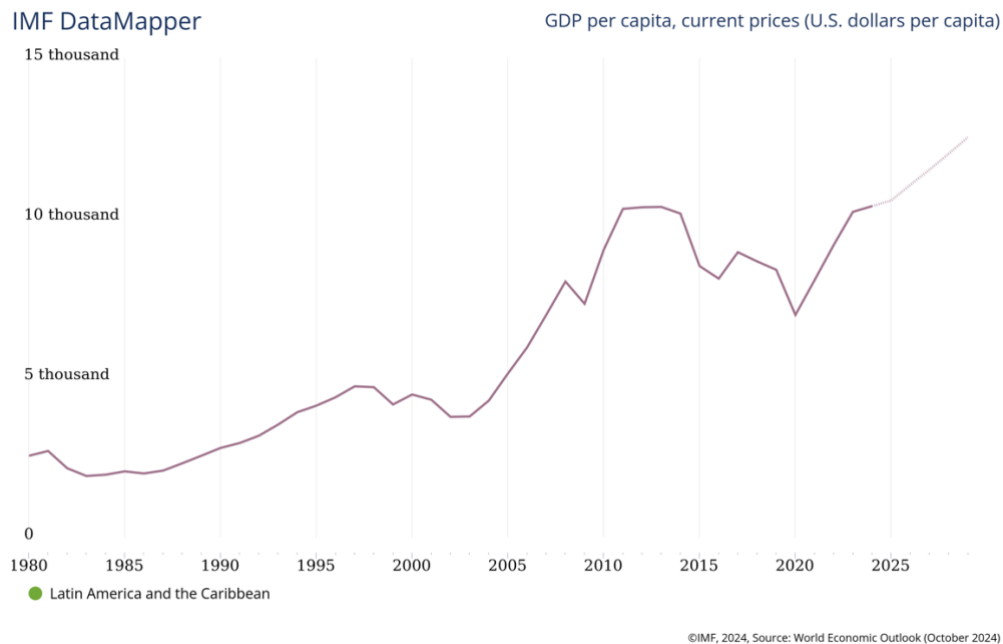


Figura A-1.1. PIB per cápita en América Latina. Por IMF (2024)

Porcentaje de población viviendo en zonas urbanas en América Latina

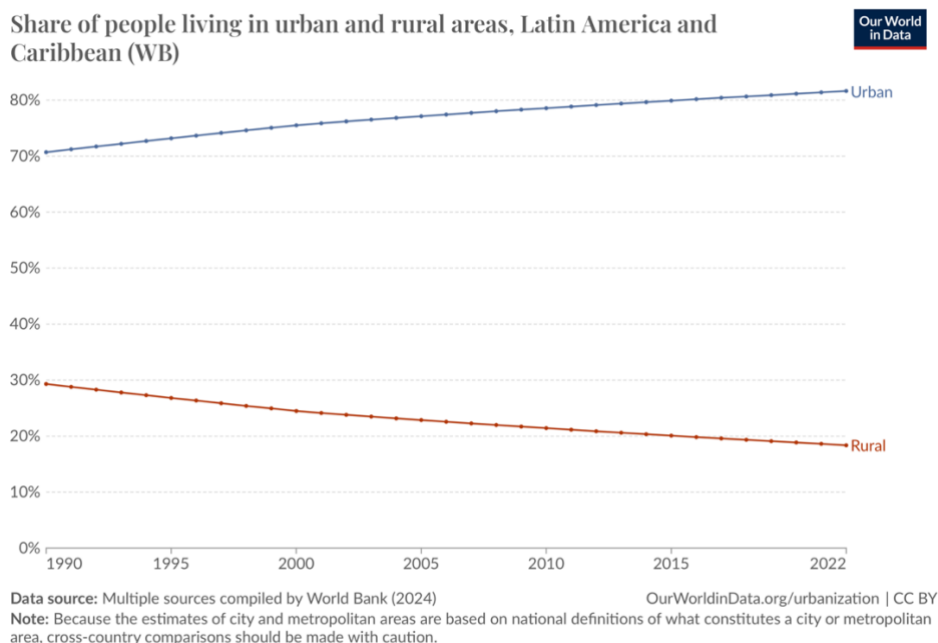


Figura A-1.2. Porcentaje de población viviendo en zonas urbanas en América Latina

Disponibilidad de datos de emisiones

País	HFC-125	HFC-134a	HFC-143a	HFC-152a	HFC-227ea	HFC-23	HFC-245fa	HFC-32	HFC-365mfc	HFC-4310mee
Argentina	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Belize										
Bolivia		x								
Brasil	x	x	x	x	x	x		x	x	
Chile	x	x	x	x	x		x	x	x	
Colombia	x	x	x	x	x		x	x	x	
Costa Rica	x	x	x	x	x		x	x	x	
Ecuador	x	x	x	x	x		x	x	x	
El Salvador	x	x	x	x	x		x	x	x	
Guyana Francesa										
Guatemala	x	x	x	x	x		x	x	x	
Guyana										
Honduras	x	x	x	x	x		x	x	x	
México	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Nicaragua	x	x	x	x	x		x	x	x	
Panamá	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Paraguay	x	x	x	x	x		x	x	x	
Peru	x	x	x	x	x		x	x	x	
Suriname										
Uruguay	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Venezuela	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

Tabla A-1.1. Disponibilidad de datos de emisiones por cada país. Elaboración propia en base a EDGAR e Inventarios nacionales reportados a la UNFCCC.

Anexo A-2: Información complementaria para el Objetivo específico 2

Objetivo específico 2: Implementar un modelo de demanda-emisiones para evaluar el potencial de reducción de emisiones de GEI en el sector de aire acondicionado residencial en América Latina, como resultado de la sustitución de HFCs por propano (R-290).

Tamaño promedio de personas por hogar

Tabla A-2.1. Tamaño promedio de personas por hogar. Elaboración propia en base a datos de Naciones Unidas (2022)

Países	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Argentina	3.9	3.6	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
Brasil	4.2	3.8	3.3	2.8	2.8	2.8	2.8
Chile	4.0	3.6	3.2	3.1	3.1	3.1	3.1
Colombia	4.6	4.2	3.8	2.9	2.9	2.6	2.6
México	4.9	4.3	3.9	3.6	3.6	3.6	3.6

Proyección de población en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México

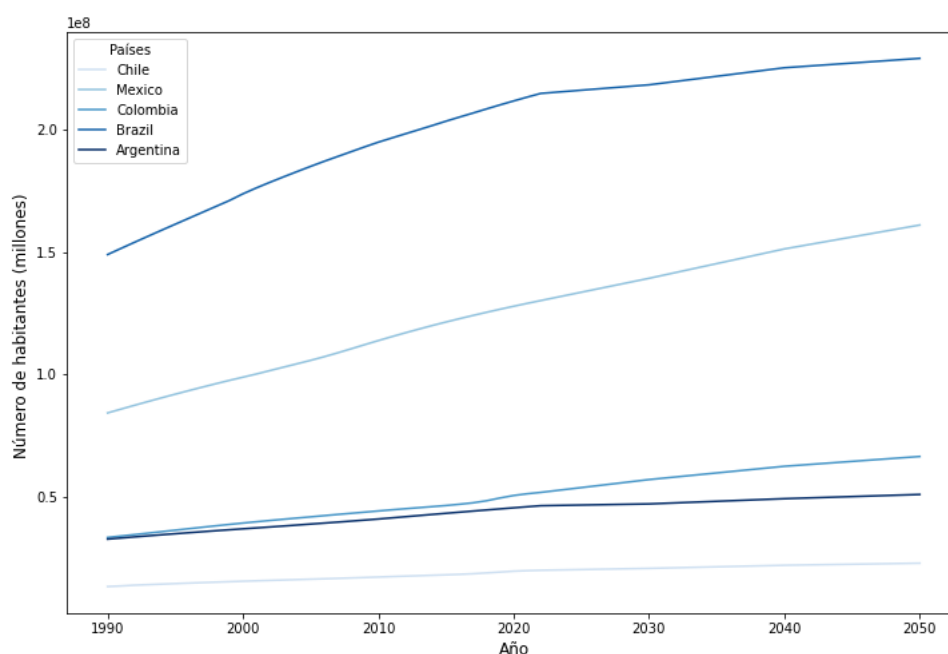


Figura A-2.1. población en	Air Conditioner		$\ln \gamma$	β_{Inc}	β_{Elec}	β_{Urb}
	α	ClimateMax	Coefficient	4.843	-6.9E-05	
	Observations	24	Standard Error	0.503	9.82E-06	
	R^2	0.69	t-Stat	9.635	-7.04	

Proyección de Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México según el escenario *Upper 80*. Elaboración propia en base a datos de Naciones Unidas (2023)

Figura A-2.2. Parámetros para el cálculo de la difusión. Mcneil et al. (2010)

Horas de uso de aire acondicionado residencial por día y por año

Tabla A-2.2. Horas de uso de aire acondicionado residencial. Elaboración propia en base a datos de la investigación de Shah et al. (2015)

País	Horas por día	Horas por año
Argentina	1.7	626
Brasil	4.6	1,679
Chile	2.1	766.5
Colombia	5.3	1,934.5
México	5	1,825

Factor de intensidad de carbono del suministro eléctrico de cada país

Los factores para los año 2030 y 2050 se calculan en base a las metas de descarbonización de cada país. Para el año 2040 se hace una interpolación entre los datos de los años 2030 y 2050.

Tabla A-2.3. Factor de intensidad de carbono del suministro eléctrico de cada país. Elaboración propia en base a datos de Ember (2024).

Países	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Argentina	0.355	0.35	0.354	0.2478	0.1239	0
Brasil	0.089	0.096	0.098	0.049	0.0245	0
Chile	0.38	0.35	0.291	0.0582	0.0291	0
Colombia	0.189	0.159	0.26	0.13	0.065	0
México	0.525	0.543	0.438	0.2628	0.2409	0.219

Metas de descarbonización de la matriz eléctrica

Tabla A-2.4. Metas de descarbonización de la matriz eléctrica. Elaboración propia en base a datos de gobiernos de los países.

Países	2030	2050	Fuente
Argentina	30%	100%	Acción climática: Argentina avanza con su estrategia nacional 2030 a. (2022, 1 noviembre). Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/noticias/accion-climatica-argentina-avanza-con-su-estrategia-nacional-2030-2050-contra-el-cambio
Brasil	50%	100%	Brasil tendrá 50% da matriz energética limpa até 2030. (2022, 31 oktober). Ministério Do Meio Ambiente E Mudança Do Clima. https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/brasil-tera-50-da-matriz-energetica-limpa-ate-2030
Chile	80%	100%	Ministerio de Energía de Chile. (2023). <i>Plan de Descarbonización</i> . https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/20230801_jornada_mesa_descarbonizacion_vfinal.pdf
Colombia	51%	100%	<i>Estrategia Colombia Carbono Neutral - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible</i> . (2023b, juli 13). Ministerio de Ambiente Y Desarrollo Sostenible. https://carbononeutral.minambiente.gov.co/
México	40%	50%	De Energía, S. (z.d.). <i>Reporte Anual del Potencial de Mitigación de GEI en el Sector Eléctrico y su metodología</i> . gob.mx. https://www.gob.mx/sener/documentos/reporte-anual-del-potencial-de-mitigacion-de-gei-en-el-sector-electrico-y-su-metodologia-230858

Grados día de enfriamiento (CDD)

Tabla A-2.5. Factor de grados día de enfriamiento. Elaboración propia en base a datos de World Bank Data.

Países	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Argentina	1165	1048	1207	1419	1419	1419	1419
Brasil	2388	2558	2686	2976	2976	2976	2976
Chile	79	69	87	124	124	124	124
Colombia	3624	3572	4124	4292	4292	4292	4292
México	2388	2558	2870	2976	2976	2976	2976

Proyección del grado de urbanización de los países

Tabla A-2.6. Factor de grados día de enfriamiento. Elaboración propia en base a datos de World Bank Data.

Países	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Argentina	87.0	89.1	90.8	92.1	93.2	94.3	95.2
Brasil	73.9	81.2	84.3	87.1	89.3	91.0	92.4
Chile	83.3	86.1	87.1	87.7	88.8	90.3	91.8
Colombia	69.5	74.0	78.0	81.4	84.3	86.7	88.8
México	71.4	74.7	77.8	80.7	83.5	86.0	88.2

Ingreso por hogar de los países

Tabla A-2.7. Ingreso por hogar. Elaboración propia en base a datos de Naciones Unidas (2024) e IMF (2024).

Ingreso del hogar	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Argentina	\$ 32,178	\$ 48,705	\$ 65,127	\$ 69,137	\$ 112,077	\$ 123,078	\$ 142,970
Brasil	\$ 26,422	\$ 31,668	\$ 43,648	\$ 44,976	\$ 74,959	\$ 79,899	\$ 93,675
Chile	\$ 23,704	\$ 40,381	\$ 60,665	\$ 78,234	\$ 124,721	\$ 142,132	\$ 168,396
Colombia	\$ 22,633	\$ 28,058	\$ 41,168	\$ 45,204	\$ 75,903	\$ 73,920	\$ 87,582
México	\$ 46,006	\$ 59,774	\$ 65,316	\$ 68,894	\$ 104,624	\$ 113,355	\$ 129,781

Factores de emisión utilizados para el cálculo de las emisiones directas a lo largo del ciclo de vida

Tabla A-2.8. Factor de emisión. Elaboración propia en base a datos de IPCC (2006)

Segmento de emisión	Factor de emisión	Fuente de datos
Emission inicial	0.30%	IPCC (2006)
Emission operación	5%	
Emisión mantención	80%	
Emisión final de vida	80%	

Emisiones directas

Tabla A-2.9. Emisiones directas del sector AAR (Mt de CO₂ eq). Elaboración propia.

Escenarios	2022	2030	2040	2050
A	3.99	11.19	12.84	15.60
B	3.99	3.60	2.00	0.80
C	3.99	4.00	4.00	0.80

Emisiones indirectas

Tabla A-2.10. Emisiones indirectas del sector AAR (Mt de CO₂ eq). Elaboración propia.

Escenarios	2022	2030	2040	2050
A	32.35	45.47	39.93	31.04
B	32.35	69.32	37.52	29.00
C	32.35	55.08	76.08	29.00

Anexo A-3: Información complementaria para el Objetivo específico 3

Objetivo específico 3: Cuantificar el efecto de la sustitución por propano de los refrigerantes HFC utilizados en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en el contexto de la Enmienda de Kigali, en términos de forzamiento radiativo y cambio en temperatura global, usando el modelo de cambio climático simple FaIR 2.2 .


```

import numpy as np
import pandas as pd
from fair import FAIR
from fair.io import read_properties
from fair.interface import initialise

# Inicializar el objeto FAIR
f = FAIR()

# Definir el horizonte temporal
f.define_time(2000, 2050, 1)

# Definir escenarios y configuraciones
f.define_scenarios(["A", "B", "C"])

#Parámetros de configuración
parametros = '/Users/danichiangp/Documents/Memoria de Titulo/configs.csv'
df_configs = pd.read_csv(parametros, index_col=0)

df_configs.index = df_configs.index.astype(str)

configs = df_configs.index
f.define_configs(configs)

# especies
species, properties = read_properties('/Users/danichiangp/Downloads/propiedades co2.csv')
f.define_species(species, properties)

# Método de gases de efecto invernadero
f.ghg_method = 'Myhre1998'

f.allocate()

# Cargar los datos de emisiones
emissions_data = pd.read_csv('/Users/danichiangp/Downloads/ACR co2.csv')

# Llenar el modelo con datos del archivo CSV
f.fill_from_csv(emissions_file='/Users/danichiangp/Downloads/ACR co2.csv')

# Definir condiciones iniciales
initialise(f.forcing, 0)
initialise(f.concentration, 278.3)
initialise(f.temperature, 0)
initialise(f.cumulative_emissions, 0)
initialise(f.airborne_emissions, 0)
initialise(f.ocean_heat_content_change, 0)

f.fill_species_configs('/Users/danichiangp/Downloads/propiedades co2.csv')

# Ejecutar el modelo
f.run()

```

Figura A-3.1. Código en Python para implementar el modelo FaIR 2.2


```

#Graficar

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

hfcs = 'CO2'
scenarios = ("A", "B", "C")
fig, axs = plt.subplots(1, 3, figsize=(22,7), sharex=True)

blue_colors = plt.cm.Blues(np.linspace(0.8,1, len(scenarios)))

# Establecer los estilos de línea para cada escenario
line_styles = {'A': '-', 'B': '--', 'C': ':'}

# Gráfico 1: Emisiones
for i, scenario in enumerate(scenarios):
    axs[0].plot(f.timepoints, f.emissions.loc[dict(scenario=scenario, specie=hfcs, config=configs)],
                label=scenario, color=blue_colors[i], linestyle=line_styles[scenario])
axs[0].set_title('Emisiones')
axs[0].set_xlabel('Año')
axs[0].set_ylabel('Emisiones (Gt CO2 eq)')

# Gráfico 3: Forzamiento radiativo
for i, scenario in enumerate(scenarios):
    axs[1].plot(f.timebounds, f.forcing.loc[dict(scenario=scenario, specie=hfcs, config=configs)],
                color=blue_colors[i], linestyle=line_styles[scenario])
axs[1].set_title('Forzamiento radiativo')
axs[1].set_xlabel('Año')
axs[1].set_ylabel('Forzamiento (W/m2)')

# Gráfico 4: Anomalía de temperatura
for i, scenario in enumerate(scenarios):
    axs[2].plot(f.timebounds, f.temperature.loc[dict(scenario=scenario, layer=0)],
                color=blue_colors[i], linestyle=line_styles[scenario])
axs[2].set_title('Anomalía de temperatura')
axs[2].set_xlabel('Año')
axs[2].set_ylabel('Temperatura (°C)')

# Añadir la leyenda solo al primer subplot
axs[0].legend(title='Escenarios', fontsize=15)

# Ajustar el diseño del gráfico
plt.tight_layout()

plt.show()

```

Figura A-3.2. Código en Python para graficar los resultados de la implementación del modelo FaIR 2.2.

Tabla A-3.1. Propiedades del CO₂ utilizadas para realizar la simulación.

name	CO2
type	co2
input_mode	emissions
greenhouse_gas	1
aerosol_chemistry_from_emissions	0
aerosol_chemistry_from_concentration	0
partition_fraction0	0.2173
partition_fraction1	0.224
partition_fraction2	0.2824
partition_fraction3	0.2763
unperturbed_lifetime0	1000000000
unperturbed_lifetime1	394.4
unperturbed_lifetime2	36.54
unperturbed_lifetime3	4.304
tropospheric_adjustment	0.05
forcing_efficacy	1
forcing_temperature_feedback	0
forcing_scale	1
molecular_weight	44.009
baseline_concentration	278.3
forcing_reference_concentration	277.15
forcing_reference_emissions	0
iirf_0	29
iirf_airborne	0.000819
iirf_uptake	0.00846
iirf_temperature	4
baseline_emissions	0
g1	11.4126224
g0	0.01017829
greenhouse_gas_radiative_efficiency	0.0000133
contrails_radiative_efficiency	0
erfari_radiative_efficiency	0
h2o_stratospheric_factor	0
lapse_radiative_efficiency	0
land_use_cumulative_emissions_to_forcing	nan
ozone_radiative_efficiency	0
cl_atoms	0
br_atoms	0

fractional_release	0
aci_scale	nan
aci_shape	0
ch4_lifetime_chemical_sensitivity	0
lifetime_temperature_sensitivity	nan

Tabla A-3.2. Configuración de parámetros utilizados para realizar la simulación.

	478982
gamma_autocorrelation	3.78637721
ocean_heat_capacity[0]	4.64586415
ocean_heat_capacity[1]	5.45544533
ocean_heat_capacity[2]	33.0699861
ocean_heat_transfer[0]	0.67244479
ocean_heat_transfer[1]	2.08957176
ocean_heat_transfer[2]	0.76078965
deep_ocean_efficacy	1.14151351
sigma_eta	0.11211166
sigma_xi	0.41276366
forcing_4co2	7.05503505
iirf_0[CO2]	34.8463914
iirf_uptake[CO2]	-0.0020171
iirf_temperature[CO2]	1.00899792
iirf_airborne[CO2]	0.0043455
erfari_radiative_efficiency[BC]	0.03524083
erfari_radiative_efficiency[OC]	-0.0045643
erfari_radiative_efficiency[Sulfur]	-0.0062007
erfari_radiative_efficiency[NOx]	-0.0001043
erfari_radiative_efficiency[VOC]	1.67E-05
erfari_radiative_efficiency[NH3]	-0.0006282
erfari_radiative_efficiency[CH4]	-4.01E-06
erfari_radiative_efficiency[N2O]	-5.23E-05
erfari_radiative_efficiency[Equivalent effective stratospheric chlorine]	-9.37E-06
aci_shape[Sulfur]	3.36E-07
aci_shape[BC]	0.06027317
aci_shape[OC]	2.87E-07
aci_scale	-5.0786823
ozone_radiative_efficiency[CH4]	0.00015423
ozone_radiative_efficiency[N2O]	0.001106

ozone_radiative_efficiency[Equivalent effective stratospheric chlorine]	4.56E-06
ozone_radiative_efficiency[CO]	-0.0002373
ozone_radiative_efficiency[VOC]	0.00022489
ozone_radiative_efficiency[NOx]	0.00053395
forcing_scale[CH4]	1.10252088
forcing_scale[N2O]	0.94932315
forcing_scale[CFC-11]	1.03163908
forcing_scale[CFC-12]	1.03163908
forcing_scale[CFC-113]	1.03163908
forcing_scale[CFC-114]	1.03163908
forcing_scale[CFC-115]	1.03163908
forcing_scale[HCFC-22]	1.03163908
forcing_scale[HCFC-141b]	1.03163908
forcing_scale[HCFC-142b]	1.03163908
forcing_scale[CCl4]	1.03163908
forcing_scale[CHCl3]	1.03163908
forcing_scale[CH2Cl2]	1.03163908
forcing_scale[CH3Cl]	1.03163908
forcing_scale[CH3CCl3]	1.03163908
forcing_scale[CH3Br]	1.03163908
forcing_scale[Halon-1211]	1.03163908
forcing_scale[Halon-1301]	1.03163908
forcing_scale[Halon-2402]	1.03163908
forcing_scale[CF4]	1.03163908
forcing_scale[C2F6]	1.03163908
forcing_scale[C3F8]	1.03163908
forcing_scale[c-C4F8]	1.03163908
forcing_scale[C4F10]	1.03163908
forcing_scale[C5F12]	1.03163908
forcing_scale[C6F14]	1.03163908
forcing_scale[C7F16]	1.03163908
forcing_scale[C8F18]	1.03163908
forcing_scale[NF3]	1.03163908
forcing_scale[SF6]	1.03163908
forcing_scale[SO2F2]	1.03163908
forcing_scale[HFC-125]	1.03163908
forcing_scale[HFC-134a]	1.03163908
forcing_scale[HFC-143a]	1.03163908
forcing_scale[HFC-152a]	1.03163908

forcing_scale[HFC-227ea]	1.03163908
forcing_scale[HFC-32]	1.03163908
forcing_scale[HFC-365mfc]	1.03163908
forcing_scale[HFC-4310mee]	1.03163908
forcing_scale[HFC-23]	1.03163908
forcing_scale[HFC-236fa]	1.03163908
forcing_scale[HFC-245fa]	1.03163908
forcing_scale[Stratospheric water vapour]	1.24747894
forcing_scale[Land use]	0.73363876
forcing_scale[Volcanic]	0.80502885
forcing_scale[Solar]	0.89870829
forcing_scale[Light absorbing particles on snow and ice]	1.24326035
forcing_scale[CO2]	0.93472476
baseline_concentration[CO2]	280.23835
seed	192469581
stochastic_run	TRUE
use_seed	TRUE

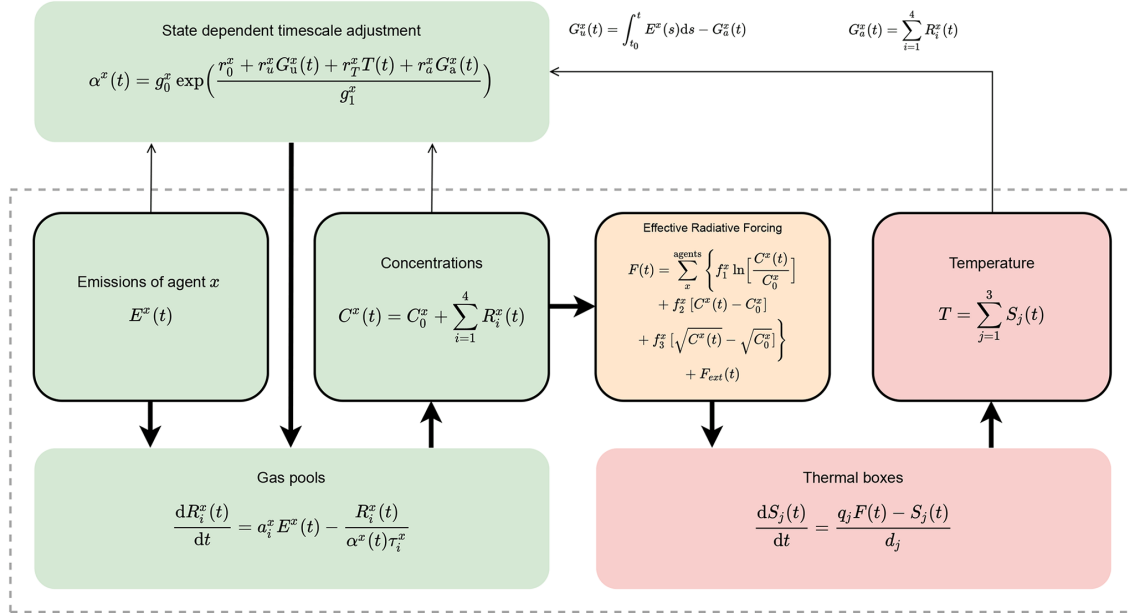


Figura A-3.3. Ecuaciones que usa FaIR para llevar a cabo la simulación. Obtenido de Leach et al. (2021)

Anexo 4: Análisis Bibliométrico

The state of transitioning to sustainable refrigerants in Latin America

Daniela Chiang ^a, Nicole Miranda ^b, Claudio Zaror ^a

^a Departamento de Ingeniería Civil Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile.

^b Energy and Power Group, Department of Engineering Sciences, University of Oxford, United Kingdom.

Abstract

This work synthesizes evidence in the academic literature on the transition to cleaner refrigerants in Latin America, following the commitments to the Montreal Protocol by 197 countries, from which 17 belong to Latin America. Since its establishment in 1987, the Montreal Protocol has been amended five times to include new ozone-depleting substances for controlling their production and consumption. The most recent Kigali amendment (2016), however, was to control and reduce the production and consumption of hydrofluorocarbons (HFCs), which do not damage the ozone layer but have a high global warming potential.

This study focuses specifically on Latin America due to its vulnerable ecosystems and communities affected by climate change. Seven systematic searches were conducted on Scopus. These searches are composed of various items, including words related to high GWP refrigerants, sustainable refrigerants, Latin American countries, words related to cooling, and words related to five categories in which a refrigerant can be studied: social interactions, technological innovation, business models, governance, and infrastructural design. This led to finding only 15 articles that investigate the transition to more sustainable refrigerants in Latin America, while the articles found globally (including Latin America) were 2,358. Notable articles were found, where they study the transition to hydrocarbons and ammonia in Honduras and Cuba, respectively, showing positive results in terms of economic and technical viability (Brossard Perez et al., 1998b; Leiva Carvajal et al., 2021b).

The searches also revealed a lack of collaboration networks among authors in the region, highlighting a significant gap and an opportunity for Latin American researchers to contribute towards meeting the Kigali Amendment objectives. Additionally, some studies focus on the transition from CFCs to HCFCs, which may suggest that the focus on replacing HFCs is still lacking (Arango-Aramburo et al., 2020; Rodrigues, 2020). While progress is evident, there remains a delay in aligning with the signed agreements.

Keywords:

Refrigerants

Latin America

Bibliometric Analysis

Montreal Protocol

Kigali Amendment

1. Introduction

This work aims to answer the research question: How are Latin American countries transitioning from the use of HFCs refrigerants to more sustainable ones? It does so by systematically

searching and synthesizing evidence in the academic literature. This work aims to answer the research question: How are Latin American countries transitioning from the use of HFC refrigerants to more sustainable ones? It does so by systematically

searching and synthesizing evidence in the academic literature.

The Montreal Protocol highlights the importance of understanding that the decrease in ozone concentration in the stratosphere is caused by emissions of industrially produced halogenated hydrocarbons, such as chlorofluorocarbons (CFCs) and hydrochlorofluorocarbons (HCFCs). In its fifth amendment (Kigali), HFCs with a high global warming potential (GWP) were included as a focus for elimination. Refrigerants will be key to cooling people given increasing temperatures and heat waves due to climate change. The transition to more sustainable refrigerants is a crucial measure to mitigate negative environmental impacts in Latin America.

Alarmingly, climate projections for this region show that CO₂ emissions will drive more frequent, intense, and prolonged heat waves. Temperatures are expected to rise by between 1.7°C and 6.7°C in South America, extreme climate events will change, and some regions may experience higher temperatures (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2020). Thus, it is essential to understand the status of Latin American countries in the transition to more sustainable refrigerants in accordance with the Kigali Amendment to the Montreal Protocol, which has been signed by all countries in the region.

Figure 1 below illustrates the positioning of this research within the literature, specifically focusing on bibliometric analyses of cooling technologies. A well-executed bibliometric analysis involves a systematic methodology, identifies trends in the literature, and evaluates the impact of authors and studies. This is exemplified in the works of Khosla et al. (Khosla et al., 2020) and Miranda et al. (Miranda et al., 2021). Among the articles reviewed, most bibliometric studies are categorized by technology (or groups of technologies). Only one article was found that focuses on a sub-component. This document provides a literature review on air conditioning in green and smart buildings; however, no studies specifically addressing refrigerants were identified. This highlights the critical need for further research in this area.

The methodology is presented in Section 2, explaining that seven searches will be performed in Scopus. Each search is based on the levers of change to attain sustainable cooling, following Khosla et al. (Khosla et al., 2020). Section 3 presents results and discussions, by each of the seven searchers.

2. Methodology

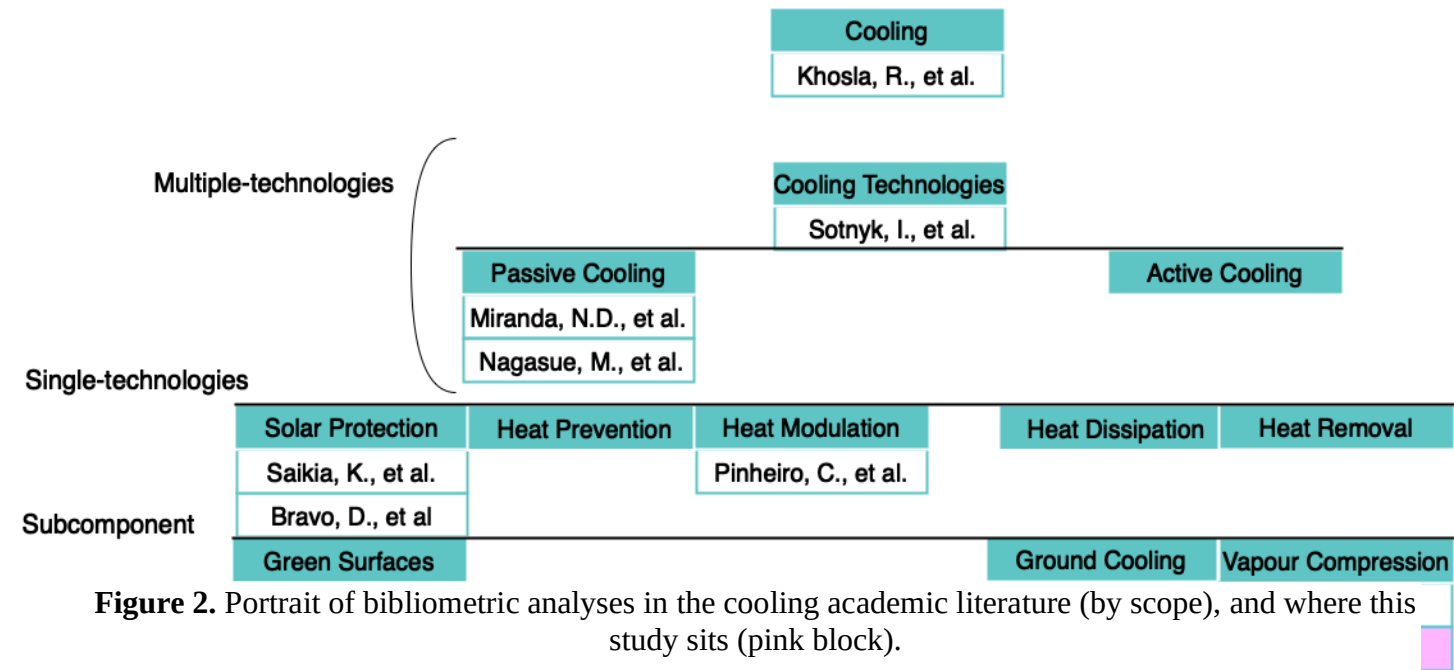


Figure 2. Portrait of bibliometric analyses in the cooling academic literature (by scope), and where this study sits (pink block).

This section illustrates the methodology to conduct the bibliometric analysis of academic articles related to how are Latin American countries transitioning from the use of HFCs refrigerants to more sustainable ones. The objective is to identify relevant studies and analyze them in terms of content. This section also presents the statistical analysis tools used from VosViewer.

To find the adequate literature, Scopus is used because it offers extensive coverage of scientific literature on various disciplines. The structure of the seven searches, and search words are shown in Figure 2. Seven systematic searches were performed based on finding five categories of words in the title, abstract and/or keywords. The five categories are the following:

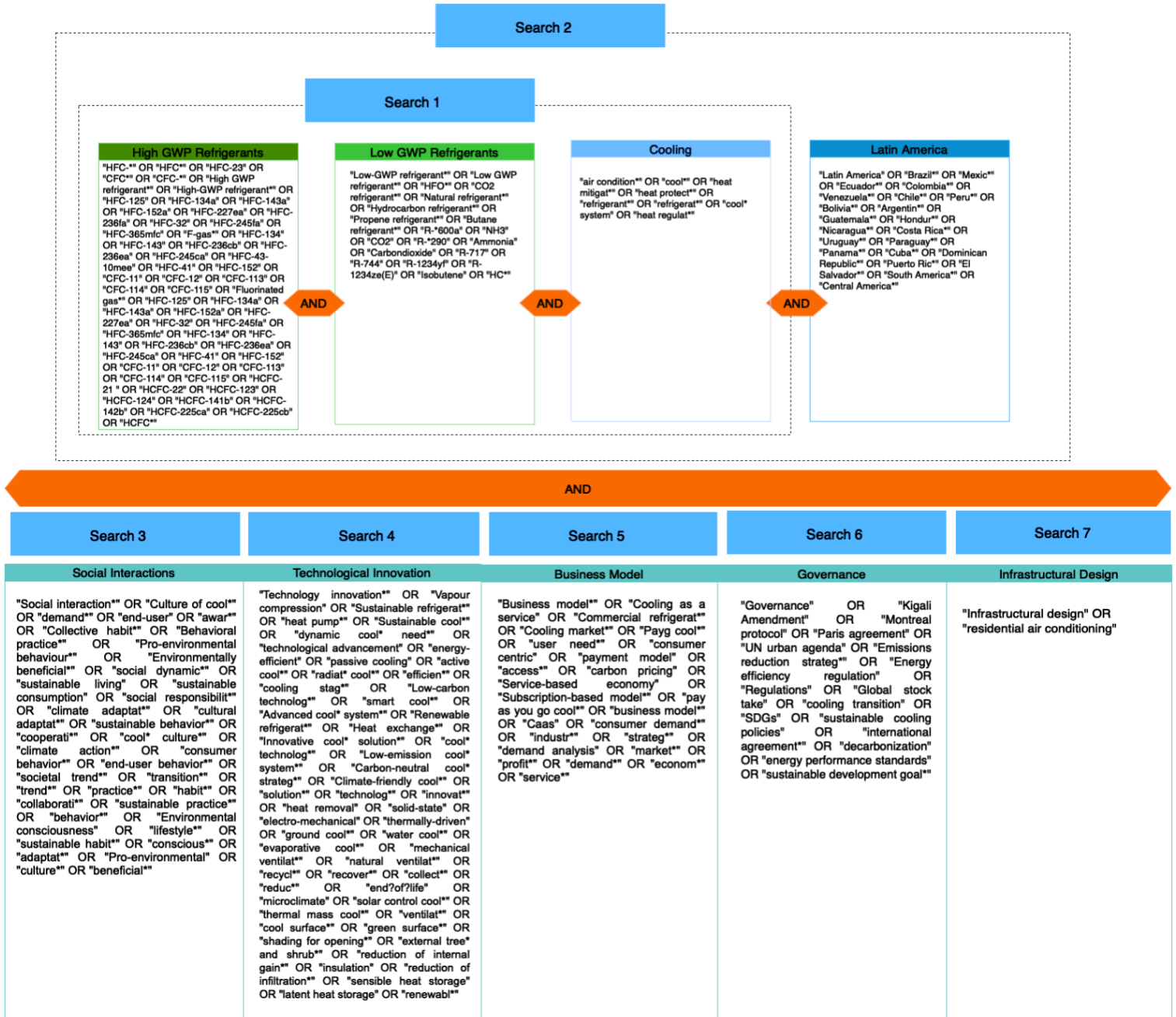


Figure 2. Structure of the seven searches on Scopus

2.1 Document Search

The first search category are the refrigerants with High GWP, which are targeted for replacement. In this case HFCs are considered, but HCFCs and

CFCs were also included in case Latin American countries continue to use them.

strength and originality of the research presented lies.

- The second category of the search terms are refrigerants that are expected replacements because they are more sustainable having a lower GWP.

- The third category are common words related to cooling.

- The fourth category are search terms that identify the region, such as the countries that comprise Latin America.

- The fifth search item is used to identify a lever of change, based on Khosla et al. [2]. This approach follows an established framework that clarifies the perspective from which refrigerants are examined.

The first search performed consists of the first to the third category of words to find out many documents are related to the transition to sustainable refrigerants.

The second search is to understand how many documents are related to the transition to better refrigerants in Latin America. For this it used the first to the fourth categories of words and excluding the levers of change. The next five searches are conducted after identifying an encompassing set of five levers capable of driving sustainable system change, as defined by Khosla et al. (Khosla et al., 2020). This comes from considering cooling as a system of interconnected social and technical components, it is argued that socio-cultural behaviors shape cooling demand. This demand is met by technological solutions aligned with companies business models. These markets are regulated by policies and are part of infrastructures. Therefore, it is identified five interconnected levers as social interactions, technology innovation, business models, governance, and infrastructure design. So, these five searches consist of the first four category of words: High GWP refrigerants, Low GWP refrigerants, Cooling and Latin America, plus each lever of change by its own.

2.1 Methodology for results analysis

In this study, VosViewer was used to perform a collaborative analysis of the authors of the articles identified in the seventh search. VosViewer is a software tool used for constructing and visualizing bibliometric

networks. For the analysis, the articles were exported in RIS format from Scopus into VosViewer. This software was also used for analyzing the co-occurrence of keywords of the articles from the second search to identify significant associations and thematic clusters within the bibliometric data. The processing, resulting in two network figures (one on authors, and another on word correlations) that will be discussed in the Section 3.1.

3. Results

3.1. Search 1 & 2: Refrigerants studies worldwide and in Latin America

Figure 3 presents the number of documents found after conducting the first and second searches.

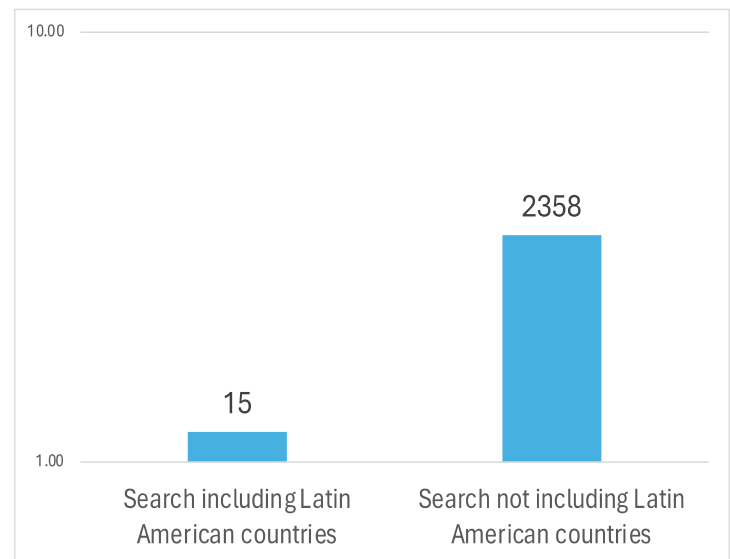


Figure 3. Documents found from Search 1 (global) and Search 2 (Latin America). Note: logarithmic scale on y-axis.

In the search specific to Latin America, Figure 3 shows a big disparity, which is alarming given that most Latin American countries have signed up for Kigali Amendment.

Figure 4 presents a collaboration network among authors in Latin America reporting on refrigerant transitions. The researchers and academics compose nine independent clusters. Overall, it is apparent that the nodes representing authors are linked by a single document each, without interconnections to other

clusters. These results demonstrate a lack of wider collaboration, which could be beneficial to advance in the knowledge and find solutions for transitioning to better refrigerants in Latin America.

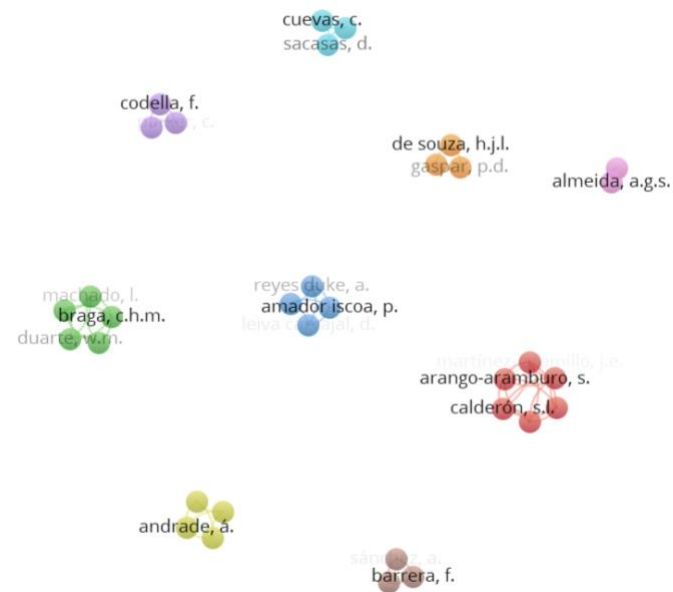


Figure 4. Collaboration network between authors

Figure 5 shows the network of keywords found in the documents. The words are those mentioned at least twice in the articles. The central keyword is "refrigerants," which is connected 10 other keywords. Three main clusters are identified and indicate the topics covered in the publications. The green cluster emphasizes technical and practical aspects of refrigerants such as 'air conditioning'. The red cluster relates to environmental impact and regulations, while the blue cluster focuses on energy aspects. Additionally, the lines between each keyword indicate the frequency of co-occurrence in

the literature.

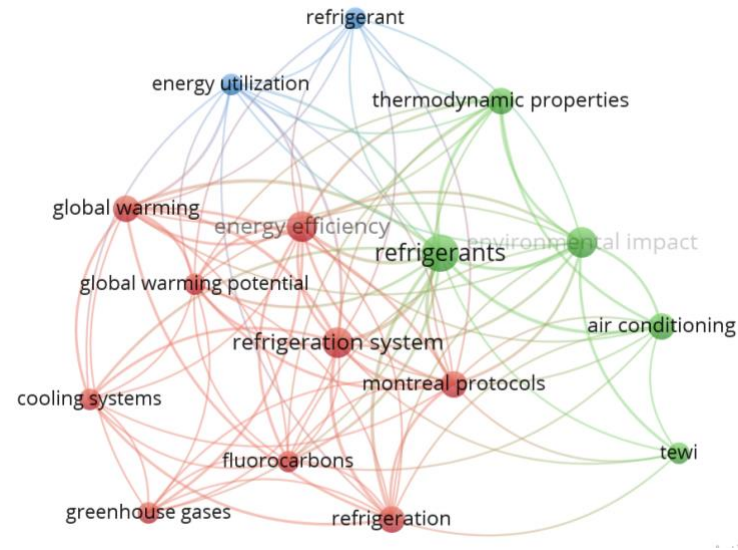


Figure 5. Network of keywords obtained from searching documents of Latin-American research on refrigerant transition Search 2. Item's label and circle size are based on its weight with higher weight resulting in larger label and circle. Item color indicates a cluster, and lines between items signify links (i.e. where authors have collaborated).

3.2 Searches using levers of change.

The papers found for each lever (searches 3 to 8) are shown in Figure 6. The highest number of documents were found for Technology and Innovation and Business Models. In the case of the Infrastructural Design lever, no documents were found because it refers to passive cooling techniques, such as shading and vegetation, instead of using refrigerants in active cooling systems. However, the documents identified are recurrent across these searches.

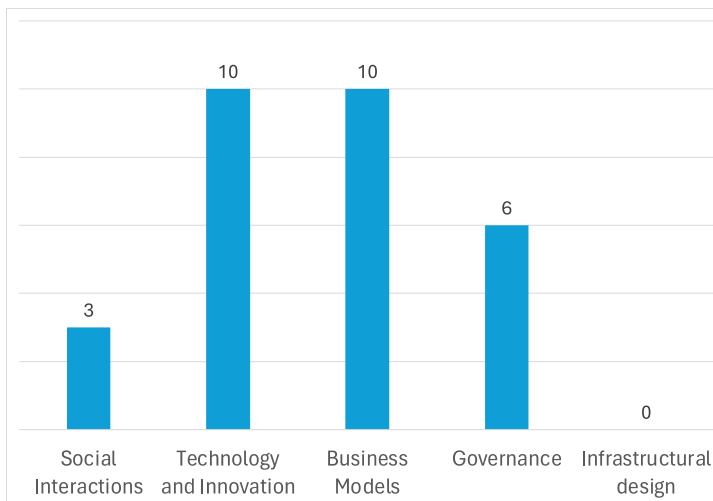


Figure 6. Documents found from Search 3 to Search 7

The following section will present the results for each search by lever.

3.3 Searches by each lever of change

3.3.1 Search 3: Social Interactions

Three documents were found by this search. Within these, Santos et al. (Santos et al., 2022a) discusses the environmental and energy impacts of storing COVID-19 vaccines, highlighting the significant energy demand and greenhouse gas emissions associated with vaccine coolers. It evaluates various COVID-19 vaccines (Moderna, Janssen, CoronaVac, Pfizer, AstraZeneca–Oxford–Covishield, and Sputnik V) in terms of carbon dioxide emissions using the Total Equivalent Warming Impact (TEWI) methodology. The study explores different refrigerants, from halogenated to natural fluids like propane. This study relates to Latin America because it is studied how are Pfizer vaccines stored in Brazil. Furthermore, this article underscores social responsibility and pro-environmental behavior by proposing optimization indexes to support decisions on selecting vaccines based on energy consumption and environmental impact.

Brossard Perez et al. (Brossard Perez et al., 1998b), also found in this search, investigate's the replacement of CFC refrigerants with ammonia in developing countries. In Cuba, the application of this measure allowed for savings of up to 15% in electricity consumption and a substantial decrease in repair and maintenance costs in air conditioners. The

authors associate the adoption of ammonia as a refrigerant with various social interactions, emphasizing its role in fostering pro-environmental behavior, sustainable consumption, social responsibility, and cooperative behavior. It involves cultural adaptation and changes in practice, reflecting a broader transition towards environmentally sustainable trends in Latin America.

The last article found in this search by Hufford et al. (Hufford et al., 2012a) discusses how to avoid negating the climate benefits achieved under the Montreal Protocol, Canada, Mexico, and the United States have proposed an amendment to phase down HFC consumption and reduce emissions of HFC-23. The adoption of these measures in this article involves international cooperative behavior and requires cultural adaptation.

This search, therefore, shows different dimensions to the social aspects of refrigerant transitions in Latin America. These studies collectively demonstrate that the transition to sustainable refrigerants not only involve economic and technical aspects but also significant social dimensions. It highlights the interconnectedness of environmental sustainability, social responsibility, and cooperative behavior.

3.3.2 Search 4: Technology and Innovations

Ten documents were identified in this search. The articles previously found under "Social Interactions" search also appeared in this search but they can be analyzed from a technological perspective.

Santos et al.(Santos et al., 2022b) article was found for social interactions, but it is also highly technical because it examines the environmental and energy impacts of storing COVID-19 vaccines in Brazil, promoting climate-friendly solutions by identifying refrigerants and cooling strategies that reduce the carbon footprint of vaccine storage. The focus on the evaporation temperature of refrigerants to optimize cooler sizing, highlights the importance of efficient heat exchange in refrigeration technology.

Hufford et al. (Hufford et al., 2012a) article focuses on a proposal for the Montreal Protocol from the governments of the United States of America, Canada, and Mexico to phase down the consumption

and production of HFCs and reduce HFC-23 byproduct emissions discusses the environmental impact of HFCs. It encourages to develop climate-friendly alternatives to improve energy efficiency and integrating renewable technologies as innovation plays a key role in advancing environmental goals under international agreements (e.g. Montreal Protocol). The abstract emphasizes the need for technological innovation in developing climate-friendly alternatives to HFCs.

Brossard Perez et al. (Brossard Perez et al., 1998b) addresses technical challenges but also contribute to energy-efficient cooling systems by reducing energy consumption and improving heat transfer in heat exchangers. Ammonia offers a sustainable solution for both domestic and commercial applications. However, the article also acknowledges challenges, including high compressor discharge temperatures and water condensation issues for the use of ammonia.

Rodrigues (Rodrigues, 2020) addresses the Brazilian Program of HCFCs Elimination (PBH) aim to phase out these high GWP refrigerants by 2040. To support PBH goals, IFBA-Campus Salvador established a recycling unit at their Refrigeration Center, to focus on mitigating environmental impacts and reducing costs associated with new refrigerants. The implementation led to the development of a systematic collection and recycling protocol, resulting in the recovery of 12.80 kg of HCFC-22 and 1.62 kg of HFC-134a. This initiative made saved in costs of new refrigerant purchases and prevented the release of approximately 72.25 tons of CO₂ equivalents into the atmosphere. The success of this project shows the role of technological innovation in recycling and reduction of environmental impact.

Sacasas et al. (Sacacas et al., 2022b) focuses on the supermarket refrigeration industry, specifically on the adoption of natural refrigerant R744 (CO₂) as a sustainable alternative to HFCs. This study represents an innovative effort in simulating transcritical R744 systems across fourteen locations in Chile, highlighting significant energy consumption reductions of 4% to 12% annually, depending on climate conditions. This study employs an energy-efficient solution in the use of carbon dioxide instead of HFCs.

Arango-Aramburo et al. (Arango-Aramburo et al., 2020) employs Colombia's energy system model to assess the impact of two proposed Nationally Appropriate Mitigation Actions (NAMAs). The first NAMA focuses on replacing old refrigerators using CFC compounds with more efficient models utilizing HCFC compounds, while the second NAMA targets expanding renewable energy sources to off-grid areas. A scenario integrating both NAMAs reveals a potential to prevent the emission of 4.71 million tons of CO₂ equivalent by 2040, highlighting the significant mitigation potential of these initiatives.

Goetzler et al. (Goetzler & Dieckmann, 2002) discusses the regulatory issues related to the GWP of fluorocarbon refrigerants United States, Canada and Mexico. Although it is based on regulations, there's a second part of the study where it evaluates A3 refrigerants performance, benefits, risks, and costs. Particularly, the interest is in using flammable alternatives such as propane, isobutane, and blends of hydrocarbons for air conditioning and refrigeration systems. By studying these alternative refrigerants and tackling challenges through innovation, the article aims to promote cooling systems with lower emissions.

Barrera et al. (Barrera et al., 2018) makes a comprehensive analysis and comparison of refrigerants meant to replace HCFC R-22 in actual refrigeration systems. It examines in detail the thermodynamic properties and performance characteristics of these refrigerants within the vapor compression cycle. The study explores innovative approaches to improving system efficiency and minimizing environmental impact. This research contributes to the continuous effort in developing and implementing refrigeration technologies that are friendly to the environment, supporting global initiatives like the Montreal Protocol aimed at sustainability and protecting the climate.

Codella et al. (Codella et al., 2023) focuses on modeling and comparing various refrigeration systems, including HFCs, HFOs, transcritical CO₂, and propane, across different system architectures and climate conditions in Latin America. By evaluating system performance, greenhouse gas emissions, and lifetime costs, the research emphasizes the importance of technological

innovation in optimizing energy efficiency and environmental sustainability. Specifically, advanced system architectures utilizing low GWP HFOs are identified as offering significant benefits, illustrating how innovation in refrigeration technology can contribute to mitigating climate change impacts effectively.

The final article from Serrato et al. (Serrato et al., 2019) experimentally evaluates the performance of an air-conditioning prototype using HC-290 (propane) as a refrigerant, compared to the traditional HFC-410A in Colombia. The research involved three tests on a fixed-split air-conditioning unit to assess its Energy Efficiency Ratio (EER). The experimental analysis revealed significant operative differences favoring HC-290 over HFC-410A in terms of environmental and energy performance.

This search highlights various alternatives for replacing halogenated refrigerants, such as ammonia, CO₂, and propane, with positive outcomes reported in both economic and technical aspects. The studies underscore advancements in technology and regulation toward more sustainable refrigeration systems and demonstrate multiple pathways for transitioning away from halogenated refrigerants. With further research and exploration of large-scale application methods, it is possible to achieve the goals outlined in the Kigali Amendment.

3.3.3 Search 5: Business Models

In this search, 10 articles were identified, some of which were also found in previous searches. In the transition to new refrigerants, besides the environmental aspect, there is a beneficial economic consideration, as sustainable alternatives offer both energy efficiency and economic savings. Here it is examined the business perspective they discuss.

Santos et al. (Santos et al., 2022b) study related to vaccine storage highlights the relationship between energy demand of vaccine coolers and ongoing operational costs. Efficient refrigerants and cooling systems can significantly reduce these costs.

Research conducted at IFBA-Campus Salvador by Rodrigues (Rodrigues, 2020) indicates that recycling refrigerants provides an economic advantage through cost reduction.

Leiva Carvajal et al. (Leiva Carvajal et al., 2021b) explores the conversion of an air conditioning system from using R22 to R290 in Honduras, aiming for improved environmental sustainability. Results indicate that while R290 outperforms R22 in parameters like capacity flow mass rate and refrigerant effect, indicating better overall performance initially. An economic analysis reveals a cost benefit ratio greater than 1, indicating long-term profitability. Additionally, emission calculations demonstrate significantly lower emissions for R290 compared to R22, reinforcing its environmental benefits. Economic terms such as cost benefit ratio underscore the financial viability of transitioning to R290, aligning environmental sustainability with economic efficiency in air conditioning technology.

In the study of supermarket refrigeration systems in Chile (Sacacas et al., 2022b), economic analysis reveals that in the desert and warm climates (Arica, Antofagasta, Santiago), the parallel compression system (BP) recovers its higher capital expenditures compared to booster compression (BB) within 20 years due to operational savings. Conversely, in other cities, the BB system proves more economically viable.

Similar economic analyses are found in other articles such as (Goetzler & Dieckmann, 2002; Hufford et al., 2012b; Martins et al., 2024; Serrato et al., 2019), highlighting economic benefits from replacing high GWP refrigerants.

Boschi et al. (Boschi et al., 2010) discusses Brazil's transition from ozone-depleting CFCs to alternative refrigerants like R134a and hydrocarbons, which are more environmentally friendly. Despite having an extended deadline for this transition, Brazil initiated it earlier than required, demonstrating its commitment to environmental sustainability. The article addresses safety concerns associated with hydrocarbon use in domestic appliances and how Brazilian companies have managed these concerns in manufacturing and after-sales service.

13 articles are compiled in the 2020 6th International Conference on Advances in Environment Research ("2020 6th International Conference on Advances in Environment Research," 2021), covering various

topics related to environmental and wastewater treatment technologies. Leiva Carvajal et al. [1] article is mentioned in this conference.

The search reveals that transitioning to sustainable refrigerants, such as R290, CO₂, and hydrocarbons, offers significant economic and environmental benefits. Studies show that these alternatives not only improve energy efficiency and reduce emissions but also provide cost savings over time, as seen in various applications including vaccine storage and air conditioning systems. Regional analyses further highlight that the economic viability of different systems varies based on local climates and conditions. Overall, these findings underscore the economic feasibility and environmental advantages of adopting new refrigerants, demonstrating progress in aligning sustainability with cost-efficiency.

3.3.4 Search 6: Governance

In this search, six documents were identified, all of which have also been found in previous searches. These documents reference the Montreal Protocol or national policies in place for emission reduction goals outlined by this protocol and its Kigali Amendment.

In the study by Hufford et al. (Hufford et al., 2012b) the proposed amendment by the governments of United States, Canada and Mexico is discussed to phase down HFC consumption and reduce HFC-23 byproduct emissions, proposing an emission reduction strategy.

Arango-Aramburo et al. (Arango-Aramburo et al., 2020) do not mention the Montreal Protocol but instead discuss Colombia's energy efficiency policies, evaluating and analyzing their feasibility.

Barrera et al. (Barrera et al., 2018) emphasize the importance of transitioning away from HCFC refrigerants in Mexico, which are scheduled for discontinuation under the Montreal Protocol.

Brossard Perez et al. (Brossard Perez et al., 1998b) note that many countries are considering phasing out the production of R-22, despite it not being explicitly prohibited by the Montreal Protocol.

Similarly, Martins et al. (Martins et al., 2024) study alternative refrigerants to replace R22 and mention the Montreal Protocol, highlighting its role in encouraging industries to develop refrigeration systems using low GWP refrigerants.

Lastly, Codella et al. (Codella et al., 2023) discuss the Kigali Amendment to the Montreal Protocol, which aims to mitigate climate change effects by setting a path to reduce global greenhouse gas emissions.

These studies collectively illustrate the various ways in which the Protocol and its amendments influence refrigerant policies and practices worldwide. For Latin America further studies are needed to assess how all policies will unfold in respect to emissions and global warming.

3.3.5 Search 7: Infrastructural design

No documents were found for this search. This is expected as the lever of infrastructure design refers to passive ways of cooling spaces (e.g. shading, vegetation) rather than the use of refrigerants in active cooling technologies.

4 Conclusion

This research has identified a notable disparity in the academic literature concerning the shift towards sustainable refrigerants in Latin America with respect to the world. Despite the significance of this transition, only 15 documents were identified on this subject within the region (through a systematic search) in contrast to the 2,358 documents retrieved globally.

It is observed that some studies [1] [2] investigate the transition from CFCs to HCFCs, which may suggest that the focus on replacing HFCs is still lacking. While it is encouraging that progress is being made, there remains a delay in aligning with the signed agreements. Moreover, the absence of collaborative efforts among Latin-American researchers underscores the urgency of addressing this issue.

The study acknowledges the geographical limitations, which inevitably restrict the scope of the research. For future studies, it is recommended to expand the search criteria and explore other platforms to address this information gap. Such efforts are crucial for understanding how the achievement of the Montreal Protocol and its Kigali Amendment by Latin American countries can contribute to global GHG emission reductions and mitigation of atmospheric warming. It is believed that the contribution of Latin America to global reductions of GHGs through achieving the Kigali Amendment to the Montreal protocol will be substantial.

5 References

- 2020 6th International Conference on Advances in Environment Research. (2021). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 776(1).
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85107203179&partnerID=40&md5=fae4597fe5e6681e4e132332ef41de77>
- Agustín Sánchez Guevara. (2024, June). *PLAN DE IMPLEMENTACIÓN DE LA ENMIENDA DE KIGALI EN CHILE, FASE I*. Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Chile.
- Arango-Aramburo, S., Veysey, J., Martínez-Jaramillo, J. E., Díez-Echavarría, L., Calderón, S. L., & Loboguerrero, A. M. (2020). Assessing the impacts of nationally appropriate mitigation actions through energy system simulation: a Colombian case. *Energy Efficiency*, 13(1), 17–32.
<https://doi.org/10.1007/s12053-019-09826-7>
- Barrera, F., Flores, V., & Sánchez, A. (2018). Selection of the refrigerant that represents the lowest energy consumption and least ecological impact of a refrigeration system in the substitution of refrigerant R22 analyzing a real case. *ECOS 2018 - Proceedings of the 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85064166979&partnerID=40&md5=84b87d7e1bdc37410ce0b85531775ae6>
- Boschi, A. A., Neto, M. M., & Fusco, J. P. A. (2010). The application of 100% ecological gas on the Brazilian home appliances. *Proceedings of APMS 2010 - International Conference on Advances in Production Management Systems*.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84894122319&partnerID=40&md5=b73a800809dc42645af3a2170c27fef>
- Brossard Perez, L. F., Barbosa Cortez, L. A., & Zukowski Jr., J. C. (1998a). Ammonia as a CFC Alternative for Developing Countries: Its Problems and Solutions. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 29(2), 67–70.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0345763125&partnerID=40&md5=ab175f394e5743360a38792437ec28b3>
- Brossard Perez, L. F., Barbosa Cortez, L. A., & Zukowski Jr., J. C. (1998b). Ammonia as a CFC Alternative for Developing Countries: Its Problems and Solutions. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 29(2), 67–70.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0345763125&partnerID=40&md5=ab175f394e5743360a38792437ec28b3>
- Cain, M., Jenkins, S., Allen, M. R., Lynch, J., Frame, D. J., Macey, A. H., & Peters, G. P. (2022). Methane and the Paris Agreement temperature goals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 380(2215).
<https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0456>
- CCAC. (2016, October 15). *Acuerdo histórico sobre los HFC alcanzado en Kigali*.
<https://www.ccacoalition.org/es/news/historic-l-agreement-hfcs-reached-kigali>
- Climate & Clean Air Coalition (CCAC). (2022). *A Study on the Impacts of HFC Consumption Trends in Article 5 Countries*.
<https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/FINAL%20HFC%20CONSUMPTION%20TRENDS-corrected%20Aug2022.pdf>
- Codella, F., Parker, C., & Saab, S. (2023). Evaluation of Advanced Architectures for

- Commercial Refrigeration Systems using Low Global Warming Potential Refrigerants. *ASHRAE Transactions*, 129, 208–221. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85171174749&partnerID=40&md5=a393c8a0473dc84bdf4ff0e9bdca2adf>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2020). The economics of climate change in Latin America and the Caribbean. In *CEPAL*.
- de la Rue du Can, S. (2012). *Bottom-Up Energy Analysis System - Methodology and Results*. Department of Economic and Social Affairs, U. N.
- (2022). *Household Size & Composition, 2022*. United Nations.
- Ember; Energy Institute- Statistical Review of World Energy (2024). (2024). *Emissions intensity*. Ember.
- Environmental Investigation Agency. (2024, October 25). *Critical climate targets are being jeopardised by rogue HFC-23 greenhouse gas emissions*. Environmental Investigation Agency.
- European Chemicals Agency. (n.d.). *HFC-4310mee Substance Infocard*. European Chemicals Agency.
- Gao, E., Zhang, Z., Deng, Q., Jing, H., Wang, X., & Zhang, X. (2022). Techno-economic and environmental analysis of low-GWP alternative refrigerants in cold storage unit under year-round working conditions. *International Journal of Refrigeration*, 134, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.11.007>
- Gobierno de Colombia. (2022). IMPLEMENTACIÓN DE LA ENMIENDA DE KIGALI (REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE HFC) EN COLOMBIA Y SECTORES INVOLUCRADOS. In *Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible*.
- Gobierno de México. (2022). *México: Tercer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2022)*.
- Goetzler, W. J., & Dieckmann, J. (2002). Assessment of the commercial implications of ASHRAE A3 flammable refrigerants in air-conditioning and refrigeration systems. *ASHRAE Transactions*, 108 PART 2, 757–767. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0036455381&partnerID=40&md5=8ac966a49863c6e8dc50ddd808ab610c>
- Hufford, D., Newberg, C., Godwin, D., & Rim, E. (2012a). Benefits of addressing HFCs under the Montreal Protocol. *ASHRAE/NIST Refrigerants Conference: Moving Towards Sustainability*, 30–48. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938879720&partnerID=40&md5=508ad2f778a2ef84febd10aed83eb056>
- Hufford, D., Newberg, C., Godwin, D., & Rim, E. (2012b). Benefits of addressing HFCs under the Montreal Protocol. *ASHRAE/NIST Refrigerants Conference: Moving Towards Sustainability*, 30–48. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938879720&partnerID=40&md5=508ad2f778a2ef84febd10aed83eb056>
- IEA. (2018, May 15). *Global air conditioner stock, 1990-2050*. IEA.
- International Monetary Fund. (2024). *GDP per capita, current prices*. International Monetary Fund.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 3(7).
- Janos Maté, D. K. (n.d.). *The Benefits of Basing Policies on the 20 Year GWP of HFCs*. . <https://Ozone.Unep.Org/System/Files/Documents/Benefits%20of%20Basing%20Policies%20on%2020%20GWP%20of%20HFCs.Pdf>
- Jiang, P., Li, Y., Bai, F., Zhao, X., An, M., & Hu, J. (2023). Coordinating to promote refrigerant transition and energy efficiency improvement of room air conditioners in China: Mitigation potential and costs. *Journal of Cleaner Production*, 382, 134916. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134916>
- Khosla, R., Miranda, N. D., Trotter, P. A., Mazzone, A., Renaldi, R., McElroy, C., Cohen, F., Jani, A., Perera-Salazar, R., & McCulloch, M. (2020). Cooling for sustainable development. *Nature Sustainability*, 4(3), 201–208. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00627-w>
- Leach, N. J., Jenkins, S., Nicholls, Z., Smith, C. J., Lynch, J., Cain, M., Walsh, T., Wu, B., Tsutsui, J., & Allen, M. R. (2021). FaIRv2.0.0: a generalized impulse response model for

- climate uncertainty and future scenario exploration. *Geoscientific Model Development*, 14(5), 3007–3036.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-3007-2021>
- Leiva Carvajal, D., Reyes Duke, A., Carrasco Bardales, A., & Amador Iscoa, P. (2021a). Technical and economic review of the reconversion of refrigerants in an air conditioner: HFCF to HC in Honduras. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 776(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/776/1/012013>
- Leiva Carvajal, D., Reyes Duke, A., Carrasco Bardales, A., & Amador Iscoa, P. (2021b). Technical and economic review of the reconversion of refrigerants in an air conditioner: HFCF to HC in Honduras. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 776(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/776/1/012013>
- LOWER-GWP ALTERNATIVES IN STATIONARY AIR CONDITIONING A COMPILATION OF CASE STUDIES (2019). https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/HFCreport2019_web.pdf
- Martins, L. V. S., Braga, C. H. M., Pabon, J. J. G., Machado, L., & Duarte, W. M. (2024). Assessment of total equivalent warming impact (TEWI) of alternative refrigerants for retrofit of R22 in single split air conditioning system. *Journal of Building Engineering*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109085>
- Miranda, N. D., Giovani Palafox-Alcantar, P., Khosla, R., & McCulloch, M. D. (2023). Metrics for the emissions of F-gas refrigerants. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, 103348. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103348>
- Miranda, N. D., Renaldi, R., Khosla, R., & McCulloch, M. D. (2021). Bibliometric analysis and landscape of actors in passive cooling research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111406. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111406>
- Naciones Unidas. (2020, February 20). *La gran importancia de Surinam para afrontar el cambio climático*. Noticias ONU.
- Rodrigues, L. ; A. A. (2020). Environmental responsibility: The contribution from IFBA-Campus Salvador to the environment through the recycling of refrigerants fluids attended by Brazilian Program of HCFC Elimination. *Reativar Ambiental*, 8(4), 275–284.
- Sacasas, D., Vega, J., & Cuevas, C. (2022a). An annual energetic evaluation of booster and parallel refrigeration systems with R744 in food retail supermarkets. A Chilean perspective. *International Journal of Refrigeration*, 133, 326–336. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.10.010>
- Sacasas, D., Vega, J., & Cuevas, C. (2022b). An annual energetic evaluation of booster and parallel refrigeration systems with R744 in food retail supermarkets. A Chilean perspective. *International Journal of Refrigeration*, 133, 326–336. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.10.010>
- Santos, A. F., Gaspar, P. D., & de Souza, H. J. L. (2022a). Evaluating the Energy Efficiency and Environmental Impact of COVID-19 Vaccines Coolers through New Optimization Indexes: Comparison between Refrigeration Systems Using HFC or Natural Refrigerants. *Processes*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/pr10040790>
- Santos, A. F., Gaspar, P. D., & de Souza, H. J. L. (2022b). Evaluating the Energy Efficiency and Environmental Impact of COVID-19 Vaccines Coolers through New Optimization Indexes: Comparison between Refrigeration Systems Using HFC or Natural Refrigerants. *Processes*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/pr10040790>
- Serrato, D., Andrade, Á., Restrepo, Á., & Tibaquirá, J. E. (2019). Experimental assessment of an air – conditioning prototype working with HC-290 under different refrigerant load conditions. *ECOS 2019 - Proceedings of the 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 1137–1152. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079673246&partnerID=40&md5=5f546759f7d236e066a582bae1f7c42a>
- Shah, N., Khanna, N., Karali, N., Park, W., Qu, Y., & Zhou, N. (2017). *Opportunities for Simultaneous Efficiency Improvement and Refrigerant Transition in Air Conditioning*. <https://doi.org/10.2172/1838320>
- Shah, N. M. W. V. E. L. A. A. P. (2015). *Benefits of Leapfrogging to Superefficiency and Low Global Warming Potential Refrigerants in Room Air Conditioning*.

- The World Bank. (2022). *Cooling Degree Days*.
The World Bank.
- Velders, G. J. M., Daniel, J. S., Montzka, S. A.,
Vimont, I., Rigby, M., Krummel, P. B., Muhle,
J., O'Doherty, S., Prinn, R. G., Weiss, R. F., &
Young, D. (2022). Projections of
hydrofluorocarbon (HFC) emissions and the
resulting global warming based on recent
trends in observed abundances and current
policies. *Atmospheric Chemistry and Physics*,
22(9), 6087–6101. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6087-2022>
- Vienna Convention. (2016a). *Resumen de medidas de control establecidas por el Protocolo de Montreal Anexo F: Hidrofluorocarbonos (HFCs)*. Protocolo de Montreal.
- Vienna Convention. (2016b). *Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa Ozono*. UN Environment Programme. <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/amendments/kigali-amendment-2016-amendment-montreal-protocol-agreed>
- Wei, M., Ding, C., Rosenquist, G., Coughlin, K., Cubero, E., Burke, T., & Abdelaziz, O. (2024). Benefits and challenges in deployment of low global warming potential R290 refrigerant for room air conditioning equipment in California. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 70, 103937. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103937>

ANEXO 5: FORMATO RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Química
Carrera	: Ingeniería Civil Química
Nombre del memorista	: Daniela Chiang Peña
Título de la memoria	: El efecto de la transición a refrigerantes limpios en América Latina
sobre el calentamiento global	
Fecha de la presentación oral	
Profesor(es) Guía	: Claudio Zaror
Profesor(es) Revisor(es)	: Tatiana Bustamante
Concepto	:
Calificación	:

Resumen

Esta investigación evalúa el efecto sobre el calentamiento global de la utilización de propano en sistemas de aire acondicionado residencial en América Latina, en el contexto de la Enmienda de Kigali, que busca reducir un 80% las emisiones de compuestos de hidrofluorocarbonos (HFC) para 2045. Estos gases sintéticos podrían ser responsables de hasta 0,4°C del calentamiento global al 2100, pero pueden ser reemplazados por refrigerantes con un potencial de calentamiento global (PCG) bajo, tales como el propano, que ya ha sido aplicado exitosamente en varios países. Para ello, se implementa un modelo de proyección de emisiones basado en datos históricos y futuros escenarios, combinado con un modelo de demanda-emisiones de aire acondicionado residencial, y un modelo climático para estimar impactos en el calentamiento global. En los resultados se muestra que la adopción de la Enmienda de Kigali podría reducir hasta 16,8 Mt de CO₂-eq en 2050, mitigando un calentamiento atmosférico de $2 \cdot 10^{-4}$ °C. Además, se evidencia que el mayor impacto proviene de las emisiones indirectas, esto representa un gran desafío para la transición. Este estudio destaca lo potencialmente beneficioso, en términos de mitigación de GEI, que sería implementar la Enmienda de Kigali. Se concluye que es necesario adoptar refrigerantes de bajo PCG, mejorar la eficiencia energética de los equipos, y avanzar hacia matrices eléctricas más limpias para maximizar los beneficios climáticos de esta transición.