

Documento de trabajo | Junio 2023

La transición energética en Colombia

Situación actual, proyecciones, desafíos,
narrativas y políticas públicas – en relación
con la transición energética en Alemania

Johannes Thema

María Cecilia Roa García



Universidad de
los Andes



Wuppertal
Institut

Editora:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal, Germany
www.wupperinst.org

Autores:

Johannes Thema
E-mail: johannes.thema@wupperinst.org
María Cecilia Roa García
E-mail: mc.roag@uniandes.edu.co

Este informe fue elaborado durante una visita de investigación al Centro Interdisciplinario de Estudios sobre Desarrollo (CIDER) de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, en marzo–mayo de 2023. Esta investigación ha sido realizada dentro del grupo de investigación junior *Energiesuffizienz*, financiado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación de Alemania dentro del Programa de Investigación para el Desarrollo Sostenible (grant no. 01UU2004B).

Los autores están en deuda con el invaluable apoyo e intercambio con expertos, investigadores, ministeriales y activistas colombianos que aportaron conocimientos, argumentos y pistas sobre dónde encontrar información. Sin su apoyo, este trabajo no habría sido posible.

Este informe fue publicado en inglés como Wuppertal Paper no. 200 en junio de 2023:

<https://wupperinst.org/a/wi/a/s/ad/8143>

The energy transition in Colombia. Current situation, projections, challenges, narratives and public policies – in relation to the energy transition in Germany.

Wuppertal/Bogotá, junio 2023

Fotografía portada: Cerro Aguanoso, Bogotá, Colombia. Johannes Thema

This work is licensed under Creative Commons Attributions 4.0 International license (CC BY 4.0).

The license is available at: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Contenido

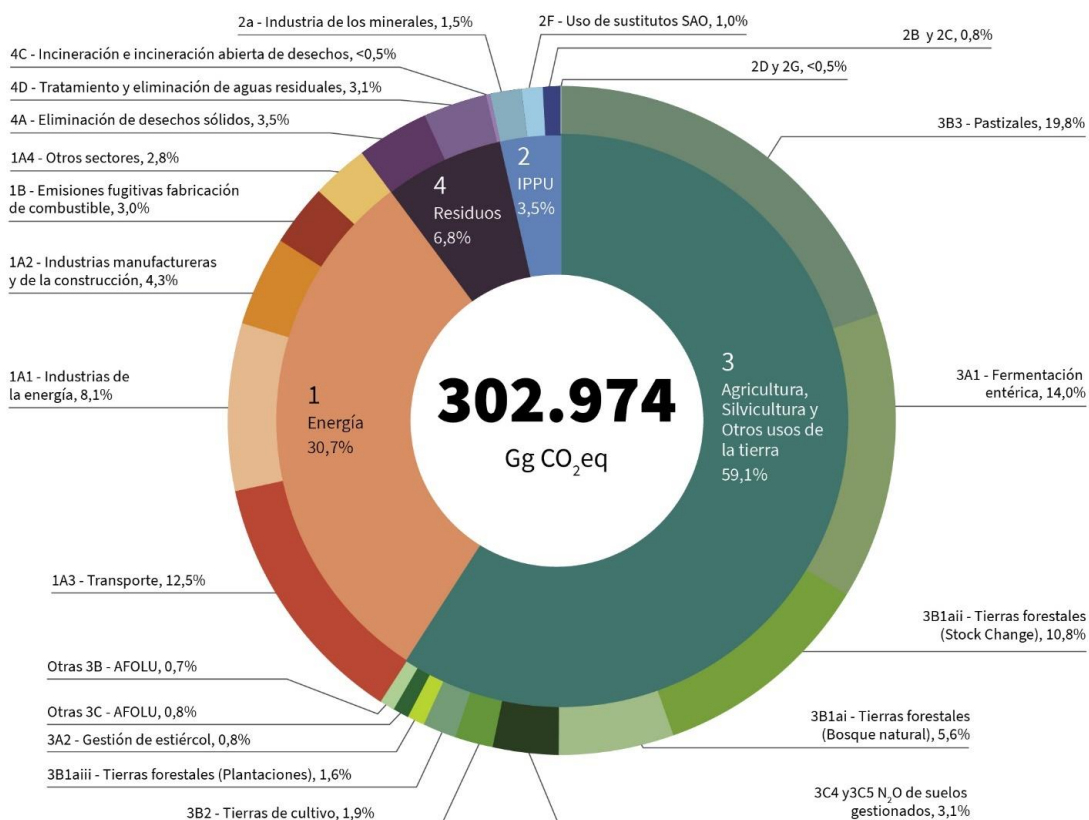
Resumen ejecutivo	4
Lista de abreviaciones, unidades y símbolos	9
Lista de tablas	10
Lista de figuras	10
1 Introducción: trasfondo y Emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en Colombia y Alemania	12
2 Análisis sectorial Colombia: situación y retos para la descarbonización	15
2.1 AFOLU: Agricultura, Silvicultura, uso de tierra	16
2.2 Transporte	17
2.3 Residencial	22
2.4 Industria	23
2.5 Generación de electricidad	24
2.6 Explotación y exploración de energía fósil	28
2.7 Importación/exportación: fuentes energéticas y otros bienes	30
3 Análisis sectorial Alemania: situación y retos para la descarbonización	33
3.1 AFOLU: Agricultura, Silvicultura, uso de tierra	33
3.2 Transporte	34
3.3 Residencial	37
3.4 Industria	38
3.5 Generación de electricidad	39
3.6 Importación/exportación de fuentes energéticas	41
4 Narrativas de la transición energética	43
4.1 Colombia	43
4.2 Alemania	46
5 Necesidad de Colombia de sustituir demanda nacional de fósiles y estimación de capacidad FNCER requerida	48
5.1 Opciones de descarbonización	48
5.2 Sitios, potenciales y desafíos de energía eólica y solar en Colombia	49
5.3 Estimación de capacidad FNCER requerida para la descarbonización	50
6 Desafíos e interconexiones de estrategias para la transición	53
6.1 Demanda en importación de energías verdes del Norte Global	53
6.2 Demanda en recursos para implementar la estrategia del Norte Global	54
6.3 Inversión y tecnología para la transición del Sur Global	55
6.4 Dependencia de Colombia de exportaciones fósiles y geopolítica de la transición	56
7 Reflexiones y conclusiones: transición justa y acción rápida	60
8 Bibliografía	62
Anexo: Estrategias y políticas públicas existentes y previstos	68
8.1 Colombia	68
8.2 Alemania / Unión Europea	69

Resumen ejecutivo

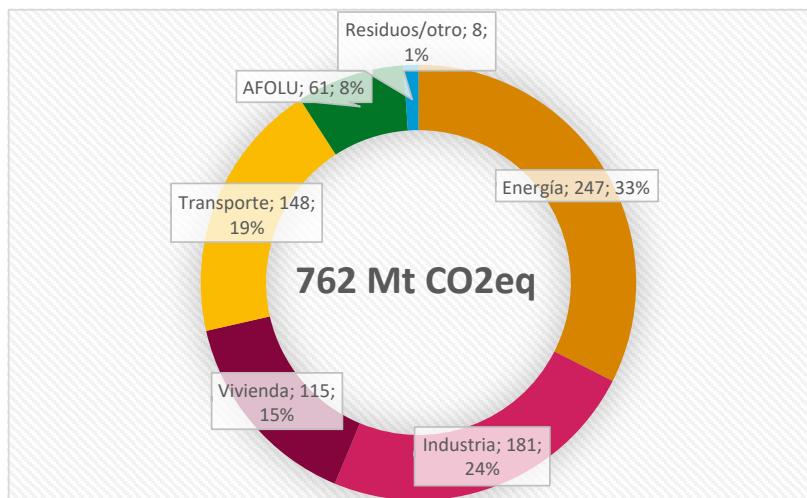
Este documento analiza los modelos de transición energética de dos países que mantienen un intercambio ecológicamente desigual (Infante-Amate et al., 2020) y que actualmente colaboran en la exploración de alternativas energéticas para la descarbonización. El énfasis del ejercicio está en un análisis de opciones para la descarbonización completa del sistema energético colombiano. Para esto, analiza la situación actual, los debates sobre políticas públicas y la ruta de la descarbonización emprendida por el Norte global, tomando como ejemplo Alemania como uno de los países con el que históricamente Colombia ha mantenido relaciones comerciales de energía y que actualmente financia proyectos de energías renovables. Cada país tiene condiciones particulares, por lo tanto, una generalización para los países del Sur y Norte Global no es posible, sin embargo, el análisis plantea algunas reflexiones sobre una transición energética justa a la escala global.

La composición de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) en los dos países muestra grandes diferencias. En Colombia sólo el 31% de las emisiones GEI proviene del sector de la energía (incluidos subsectores), y el 59% del sector AFOLU (Exec. fig. 1). Esto destaca la importancia de este sector en la mitigación de GEI, especialmente los sub-sectores de cambio en uso de tierra (pastizales, tierras forestales en la gráfica) y la ganadería (fermentación entérica - Exec. fig. 1). Los esfuerzos infructuosos en los últimos 20 años para controlar la deforestación como una de las mayores fuentes de emisión de GEI indican que es necesario reorientar los esfuerzos en el sector AFOLU y diversificar la estrategia para incluir otros sectores.

Exec. fig. 1: Emisiones GEI por sectores Colombia (2018)



Fuente: IDEAM et al. (2022, p. 95)

Exec. fig. 2: Emisiones GEI por sectores Alemania (2021)

Fuente: basado en datos de UBA (2022), gráfica adaptada por autor

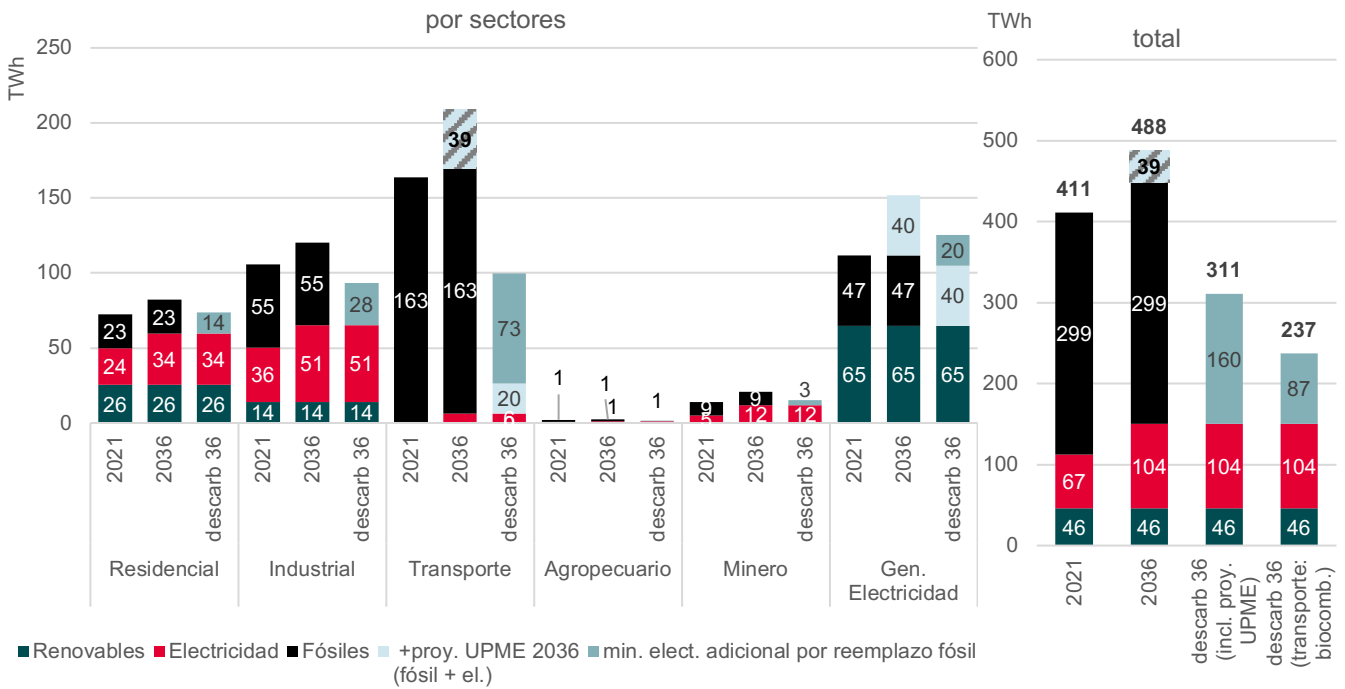
En Alemania como país del Norte Global, tanto con una alta industrialización como niveles de consumo, los sectores de energía, industria, residencia y transporte representan el 91%, AFOLU el 8%. Por esta razón la descarbonización en Alemania se enfoca principalmente en el consumo de energía. La comparación de emisiones per cápita muestra 6t/cap/a en Colombia y 9,1t/cap/a en Alemania, una diferencia sorpresivamente pequeña dada la diferencia en las economías y resalta la importancia del sector vinculado a los usos del suelo en Colombia.

Este informe analiza por cada sector la situación actual, las proyecciones existentes y opciones de descarbonización. El análisis detallado de los consumos de energía sectoriales en Colombia muestra los sectores con más alto consumo de energía fósil (en este orden): transporte (combustibles), industria (gas, carbón), generación de electricidad (gas, carbón) y residencial (gas). Demostramos cómo la UPME proyecta un aumento en demanda de combustibles y electricidad y calculamos la cantidad de energía eléctrica teóricamente necesaria para sustituir las fuentes fósiles en cada sector (Exec. fig. 3, izquierda).

En dos escenarios hipotéticos para Colombia estimamos la electricidad total requerida para una descarbonización 1) completamente por vía electrificación y 2) asumiendo que el sector de transporte se descarbonice por otra fuente (biocombustibles) (Exec. fig. 3, derecha).

Estimamos la capacidad (GW_p) requerida para suplir la demanda en cuatro escenarios hipotéticos de 1) sólo eólica, 2) sólo solar PV, 3) 50% ambas tecnologías y 4) 50% eólica y solar (por simplicidad, no analizamos otras fuentes como la geotérmica o maremotriz), pero con transporte no suplido por electricidad, sino por biocombustibles, reduciendo la demanda eléctrica en 73 TWh. Los resultados se entienden como la capacidad mínima requerida, bajo supuestos optimistas sobre aumentos en la eficiencia energética mediante la electrificación y sobre el rendimiento de capacidades instaladas de generación eólica y solar.

Exec. fig. 3: Demanda nacional 2021/2036 y mínima generación eléctrica adicional requerida por sustitución de fósiles, por sectores (izq.) y total (der.)



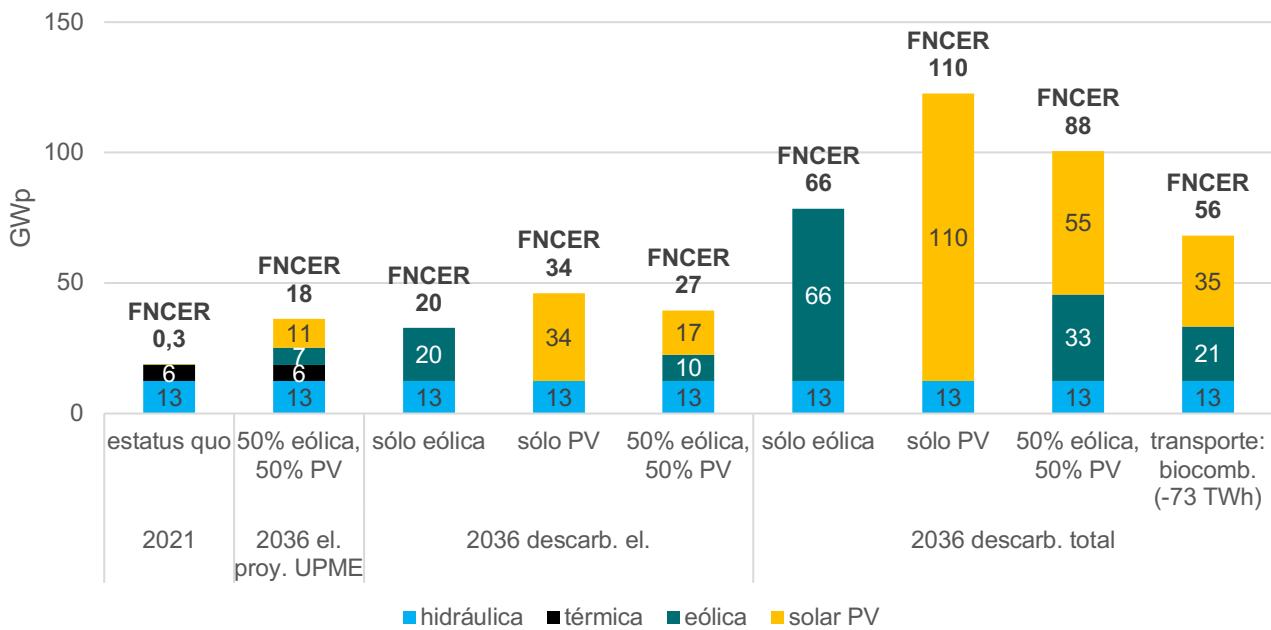
Fuente de datos: UPME (2023b), cálculos por el autor

Nota: esgrafiado = proyección incremento fósil, 2036 incluye incremento en demanda (UPME, 2022), descarb 36 incluye incremento de demanda eléctrica proyectada hasta 2036 (UPME, 2022) y la demanda adicional de electricidad para el reemplazo de demanda fósil en 2036. En el sector electricidad, “renovables” incluye hidroenergía.

En figura total, excl. hidroenergía. Descarb 36 incluye incremento de demanda eléctrica y fósiles sustituidos. Descarb 36 (transporte biomasa) asume la descarbonización de transporte por otras fuentes no eléctricas y por ende una demanda eléctrica 73 TWh menor.

La UPME publica proyecciones de demanda de los próximos 15 años. La última proyección incluye un aumento en la demanda de energía a suministrar hasta 2036, en nuestro escenario 50% eólica y PV. En comparación con el actual parque de plantas hidráulicas y térmicas (fósiles) que suma una capacidad de 19 GW (XM, 2023), se necesitarían 10-14 GW de FNCER para reemplazar las plantas térmicas actuales. Con el aumento en el consumo, sólo para descarbonizar el sector eléctrico se necesitaría entre 20 GW (sólo eólica) y 34 GW (sólo PV).

Exec. fig. 4: Estimación de capacidad instalada necesaria (GWp) para la descarbonización, asumiendo electrificación por eólica/PV/mixto/transporte por biocombustible



Fuente: cálculos propios basados en datos de UPME (2023a, 2022, 2023b), para cálculo consultar autor.

Si todos los consumos fósiles de todos sectores proyectados por la UPME (2022) hasta 2036 se cambiaran por energía eléctrica, el parque FNCER adicional tendría que alcanzar 66-110 GW. Si el sector transporte (por ejemplo) se supliera por fuentes distintas a la electricidad (biocombustibles), esto reduciría el consumo eléctrico y consecuentemente la capacidad adicional necesaria a unos 56 GW, pero por otro lado requeriría la sustitución de los 163+39 TWh/a de combustible fósil por biocombustibles.

Sin emplear un modelo del sistema eléctrico detallado, esta primera estimación de requerimientos demuestra los desafíos de descarbonizar el sistema energético colombiano entero a corto o mediano plazo, porque las mejores áreas potenciales de eólica están localizadas en territorios indígenas y con una situación social, ambiental y política que no es afín al proyecto de la descarbonización. También demuestra, que una descarbonización únicamente por vía eléctrica va a ser complicada y que Colombia tendría que complementar las estrategias de fuentes eólicas y solares urgentemente con otras renovables como la biomasa y la geotermia. Si la meta es la descarbonización completa de la economía colombiana, se necesitan estudios del potencial FNCER antes de exportar cantidades significativas de energía a otros países. Estimaciones disponibles indican un potencial total alrededor de las capacidades requeridas para sustituir la demanda fósil nacional.

El análisis de las narrativas de la transición energética muestra que en ambos países domina un discurso basado en soluciones tecnológicas de sustituir fuentes fósiles por “verdes”, en Colombia a veces la sola adición de fuentes renovables. Encontramos narrativas adicionales en ambos países más de nichos de ONGs o de la academia que se enfocan más en recursos naturales, justicia global y la reducción del consumo.

Damos una a visión general a las políticas públicas para la transición en Colombia y Alemania. Colombia tiene primeras hojas de ruta para pocos sectores (eólica, hidrógeno) y está trabajando en otros, pero las políticas sectoriales están aún desarticuladas, no tienen metas de descarbonización completa y carecen de una visión sistémica. En Alemania existen visiones sistémicas y estrategias sectoriales, pero la implementación consecuente falta, y los planes de una transición energética

nacional suponen importaciones de grandes cantidades de energía sin analizar qué significa para la transición energética de los países exportadores.

Concluimos que para que una transición energética pueda ser exitosa, no es suficiente comprenderla como descarbonización tecnológica, sino que se necesita cambiar causas estructurales detrás de las emisiones. Se requiere un análisis sistémico que informe estrategias y acción política sectorial con caminos claros hasta una descarbonización completa de todos los sectores. Además, las estrategias sectoriales y nacionales necesitan articulación global para evitar desarrollos defectuosos: si el Norte Global basa su descarbonización en estructuras de importación de energías renovables del Sur, pone en riesgo la transición allá. Y si las estructuras de las relaciones comerciales internacionales no cambian, una transición energética quedará difícil en muchos países del Sur Global – la soberanía energética y tecnológica será clave para una transición justa.

Es necesario establecer un diálogo entre todos los actores de una transición energética, y especialmente asegurar la participación de las comunidades locales en los lugares de realización de proyectos – no sólo en consultas sino en materia de decisiones, propiedad y beneficios.

Finalmente, para reducir las emisiones elevadas del sector AFOLU, se requiere una comprensión de la deforestación y cambios en uso de tierra no como fenómenos locales o nacionales, sino en los contextos globales del mercado de las drogas ilícitas, el acaparamiento y la especulación con la tierra, el crecimiento en la demanda de carne y el comercio de madera. Esto permitiría desarrollar soluciones dirigidas a causas estructurales.

Finalmente, los retos analizados son grandes y requieren profundos cambios políticos y de infraestructura lo cual requerirá tiempo. Esto indica una necesidad de acción política inmediata.

Lista de abreviaciones, unidades y símbolos

Abreviaciones

Abr.	ES	EN
ACPM	Aceite combustible para motores	Diesel
AFOLU	Agricultura, forestales y cambios en uso de tierra	Agriculture, forestry and land-use change
BEV	Vehículo eléctrico de batería (EN)	Battery electric vehicle
FNCER (NC-RES)	Fuentes no convencionales de energía renovable (excl. Hidroeléctrica)	Non-conventional renewable energy sources (excl. hydropower)
GEI	Gases a efecto invernadero	Greenhouse gas emissions
GLP	Gas líquido de petróleo	Liquefied petroleum gas (LPG)
ICE	Motor de combustible	Internal Combustion Engine
PM	Materia particulada	Particulate matter
PND	Plan Nacional de Desarrollo	National Development Plan
NAMA	Acción de Mitigación Apropriada Nacional	National Appropriate Mitigation Action
SIN	Sistema integrado nacional (de electricidad)	Integrated national system of electricity
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética	Mining and Energy Planning Unit Colombia

Unidades y símbolos

Abr.	ES	EN
a	Año	Annum (year)
USD	US dólar	US dollar
%	Por ciento	Per cent
€	Euro	Euro
°C	Grados Celsius	Degrees Celsius
Cap	cabeza	capita
CO ₂	Dióxido de carbono	Carbon dioxide
CO ₂ eq	Equivalentes de CO ₂	Carbon dioxide equivalents
g	Gramos	Gram
Gg	Giga gramos = mega kilo = kilo tonelada	Giga gram
GJ	Giga julios (1000 MJ)	Giga joule
Gt	Giga tonelada	Giga tonne
GWh	Hora gigavatio	Gigawatt hour
h	Hora	Hour
H ₂	Hidrógeno	Hydrogen
kg	Kilogramo	Kilogram
km	Kilometro	Kilometre
kt	Kilotonelada	Kilotonne
kW	Kilovatio	Kilowatt
kWh	Hora kilovatio	Kilowatt hour
l	Litro	Litre
m	Millón	Million
MBL	Millones de barriles	Million barrels
MJ	Mega (millones de) julios	Megajoule
Mt	Mega tonelada	Mega tonne
p.a.	Por año	per annum
pkm	Kilómetros de pasajero	Passenger kilometres
PJ	Peta julios (1000 TJ)	Peta joule
PV	Fotovoltaica	Photovoltaic
t	Tonelada	tons
TJ	Tera julios (1000 GJ)	Terajoule
Tkm	Kilómetros de tonelada (carga)	Ton kilometres (freight)
TWh	Hora Tera vatio	Terawatt hour

Lista de tablas

Tab. 1: CAPEX de instalaciones para generación eléctrica por tecnología (2020)-----	27
Tab. 2: Proyectos de expansión fija (2020)-----	27
Tab. 3: Políticas de transición energética en Colombia, documentos claves-----	68
Tab. 4: Políticas de transición energética en Alemania, documentos seleccionados-----	69
Tab. 5: Políticas de transición energética en la Unión Europea, documentos seleccionados-----	70

Lista de figuras

Fig. 1: Emisiones GEI por sectores Colombia (2018)-----	14
Fig. 2: Emisiones GEI por sectores Alemania (2021)-----	14
Fig. 3: Consumo de fuentes de energía por sectores (2020)-----	15
Fig. 4: Consumo de energía por fuentes y uso por sector (2020)-----	16
Fig. 5: GEI del sector de transporte (2018)-----	18

Fig. 6: Energía primaria y secundaria en el sector transporte	19
Fig. 7: Parque automotor registrado en el registro único nacional de tránsito (RUNT)	19
Fig. 8: Proyección de demanda combustibles	19
Fig. 9: Consumo energético modo carretero	20
Fig. 10: Proyecciones de crecimiento acumulado por tecnología 2022-2030	21
Fig. 11: Consumo de energía en el sector residencial 2021	23
Fig. 12: Consumo de energía en el sector industrial 2021	23
Fig. 13: Capacidad instalada por tipo de generación	25
Fig. 14: GWh _{el} generados por fuente de carbón	25
Fig. 15: Matriz energética de generación de electricidad 2006-2021	26
Fig. 16: Energía en firme y proyección de demanda 2020-2034	26
Fig. 17: Capacidad de transporte 2022-2023 (29 marzo 2023) asignada por recurso	28
Fig. 18: Extracción e utilización de fuentes fósiles 2021 (MJ)	29
Fig. 19: Importaciones/exportaciones de energía (PJ)	31
Fig. 20: Exportaciones (izq.) e importaciones (der.) 2022, valor en bn USD	31
Fig. 21: Exportaciones e importaciones 2006-2022	32
Fig. 22: Colombia's potential future trade balance in transition-exposed sectors (WB2C) including a growth in transition-related exports and the impact of lower domestic oil and gas consumption	32
Fig. 23: Diagrama sankey Alemania 2020	33
Fig. 24: Emisiones de AFOLU según categoría CRF y metas de la ley de mitigación climática	34
Fig. 25: Consumo energético en el sector transporte por fuente de energía (PJ)	34
Fig. 26: Km viajado (personas) por modo de transporte (bn PKM)	35
Fig. 27: Parque vehicular por tipo de motor en escenarios principales	35
Fig. 28: Proyecciones de demanda de transporte (PKM pasajeros izq. y TKM carga der., escenarios principales)	36
Fig. 29: Carga transportada por modo de transporte (bn TKM)	36
Fig. 30: Consumo residencial de energía por fuentes	37
Fig. 31: Proyecciones del consumo residencial por fuentes en escenarios principales (energía final)	38
Fig. 32: Consumo de energía por fuente en el sector de industria	39
Fig. 33: Proyección de consumo energético final en principales escenarios	39
Fig. 34: Generación de electricidad por tecnología/ fuentes energéticas 2022	40
Fig. 35: Proyecciones de capacidades de energías renovables instaladas en principales escenarios	40
Fig. 36: Proyecciones de generación de electricidad por fuentes de energía en principales escenarios	41
Fig. 37: Generación de energía primaria en Alemania e importación neta (PJ)	41
Fig. 38: Importaciones de carbón por país de origen	42
Fig. 39: Importaciones energéticas netas proyectadas en escenarios principales 2021-2050	42
Fig. 40: Vectores PtX por origen (doméstico/importado)	43
Fig. 41: Potenciales de energía eólica (izq.) y solar (der.) en Colombia	49
Fig. 42: Demanda nacional 2021/2036 y mínima generación eléctrica adicional requerida por sustitución de fósiles, por sectores (izq.) y total (der.)	51
Fig. 43: Estimación de capacidad instalada necesaria (GW _p) para la descarbonización, asumiendo electrificación por eólica/PV/mixto/transporte por biocombustible	52
Fig. 44: Producción y demanda de importación de hidrógeno en 2050	53
Fig. 45: Demanda anual de recursos críticos para tecnologías de la transición energética: 2018 y 2040 SSP1 (kt/a)	54
Fig. 46: Composición de la canasta del intercambio comercial entre Alemania y Colombia (2021)	58
Fig. 47: Valor intercambio comercial Colombia-Alemania	59

1 Introducción: trasfondo y Emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en Colombia y Alemania

Trasfondo

Colombia, como muchos países latinoamericanos y del Sur Global, se enfrenta a una multitud de crisis y retos políticos que incluyen temas sociales, ecológicos, económicos, finanzas públicas, de seguridad y orden público interno. A estos problemas se suma el cambio climático con sus impactos y necesidades de adaptación y de mitigación. Todas estas crisis, que son comunes a muchos de los países del Sur Global, confluyen en el que es quizás el mayor desafío global de la historia humana, que es la transición energética como respuesta a la crisis climática resultante del proyecto histórico de la modernidad/colonialidad (Escobar, 2022). Colombia como parte del acuerdo de París 2015 y las siguientes Conferencias de las Partes (COP), se comprometió a la descarbonización y así a una transición energética a más tardar hasta mediados de este siglo.

Sin embargo, hay una multitud de razones para que los países emprendan una transición energética. No es solamente cumplir con los acuerdos climáticos internacionales, reducir las emisiones significativas o reducir los impactos ambientales y sociales adversos de la extracción de fuentes fósiles (que no se analizan en este documento). Una transición energética está ligada a muchos de los temas mencionados arriba. Entre otros, Colombia en un futuro cercano corre el riesgo de convertirse en importador de fuentes fósiles y perder ingresos por su exportación, perder competitividad de su industria si no se descarboniza, y desaprovechar las ventajas de un transporte descarbonizado. Y de forma más sistémica, la transición energética desde el Sur Global es una oportunidad para cuestionar la geopolítica histórica en la que se enmarcan las relaciones comerciales Norte-Sur y el mismo modelo de desarrollo basado en el crecimiento infinito (Nirmal & Rocheleau, 2019).

Este documento analiza los modelos de transición energética de dos países que mantienen un intercambio ecológicamente desigual (Infante-Amate et al., 2020) y que actualmente colaboran en la exploración de alternativas energéticas para la descarbonización. El énfasis del ejercicio está en un análisis de opciones para la descarbonización completa del sistema energético colombiano. Para esto, analiza la situación actual, los debates sobre políticas públicas y la ruta de la descarbonización emprendida por el Norte global, tomando como ejemplo Alemania como uno de los países con el que históricamente Colombia ha mantenido relaciones comerciales de energía y que actualmente financia proyectos de energías renovables. Cada país tiene condiciones particulares, por lo tanto, una generalización para los países del Sur y Norte Global no es posible, sin embargo, el análisis plantea algunas reflexiones sobre una transición energética justa a la escala global.

Usamos principalmente dos marcos analíticos. Por un lado, desde una perspectiva técnica y cuantitativa, mostramos los balances energéticos entre oferta y demanda desde diversas fuentes, tecnologías y formas de uso, considerando las necesidades y limitaciones por transporte y almacenamiento de energía. Bajo este marco, el análisis parte de la información nacional disponible especialmente sobre fuentes secundarias de energía y la información estadística oficial de los dos países para ofrecer una mirada a las necesidades de la descarbonización a la escala nacional.

Por otro lado, desde la perspectiva de la ecología política latinoamericana, analizamos las dinámicas globales que permiten comprender los obstáculos sistémicos para lograr una transición energética a la escala global. Esta perspectiva nos permite analizar las diversas interpretaciones que existen de la transición energética y los alcances de cada una de ellas. Por ejemplo, una transición energética que

efectivamente reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero a escala *global*, requiere una comprensión de la forma en que el sistema financiero y de comercio internacional, impacta la capacidad de los países del Sur global para financiar la transformación de sus matrices energéticas. Es decir, los esfuerzos de la transición energética exclusivamente enfocados en la estrategia de descarbonización de las economías pueden dar resultados para algunos países con capacidad tecnológica y financiera. Pero en la suma global, la transición energética efectiva, es decir que reduzca significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero *de todos los países*, requiere asumir responsabilidades compartidas pero diferenciadas, basadas en el reconocimiento de las emisiones históricas que han causado el calentamiento global. Esta es la base para emprender una transición energética justa que además permita mantener las condiciones para la reproducción de la vida digna en todos los rincones del planeta. La transición energética justa implica cuestionar y detener la expansión de las zonas de sacrificio en territorios campesinos e indígenas para la extracción de minerales de transición o para la producción de energías renovables. Por estas razones, la transición energética es multiescalar e implica una transformación del sistema energético partiendo de un cambio en las relaciones sociales con los alimentos, el transporte, el ocio, el entorno inmediato y el planeta entero.

Más que una comparación entre dos países del Norte y el Sur globales, nos enfocamos en Colombia para analizar qué tan grande y alcanzable es la meta de la descarbonización interna de países del Sur global y la viabilidad de una estrategia de exportaciones de fuentes de energía renovable para reemplazar los ingresos por petróleo y carbón. La comparación entre los sectores energéticos de Colombia y Alemania permite resaltar las diferencias que existen en la capacidad de los países para emprender sus procesos de transición y las convergencias, sinergias y fricciones entre el Norte y el Sur para avanzar conjuntamente hacia una transformación de las relaciones con la energía.

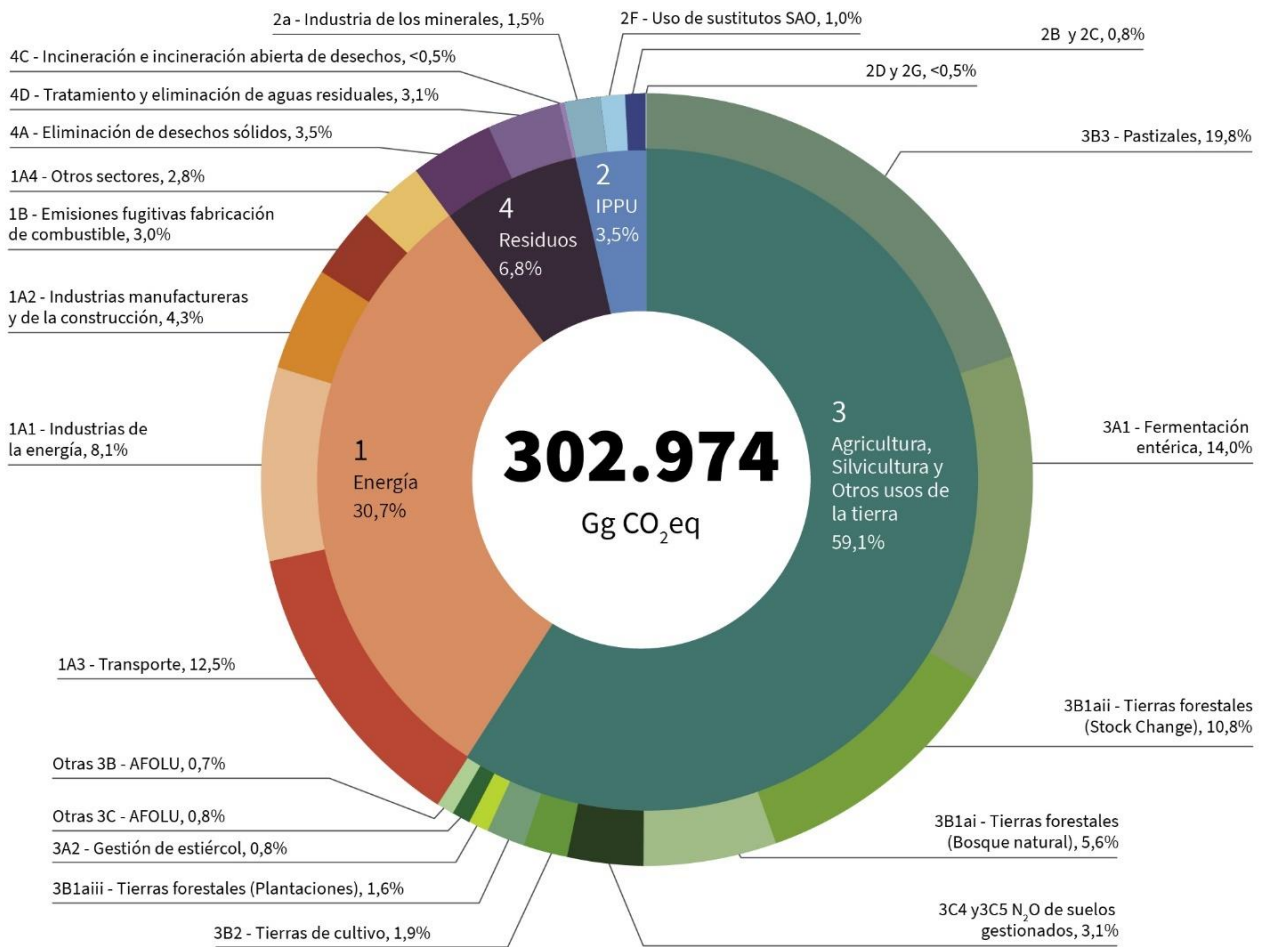
Emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en Colombia y Alemania

Mundialmente, el 79% de los GEI provienen (2019) del sector de energía (energía, transporte, edificios) y 22% de agricultura, usos forestales y cambios en uso de tierra (AFOLU) (IPCC, 2023, p. 4). Los países analizados en este informe divergen sustancialmente en esta distribución. En Colombia, según el informe del inventario nacional de gases efecto invernadero (GEI) de Colombia ante el IPCC (IDEAM et al., 2022), sólo el 31% viene del sector energía, y el 59% del sector AFOLU (Fig. 1). Esto destaca la importancia clave que debe jugar este sector en la mitigación de GEI, con sus sub-sectores cambio en el uso de tierra (relacionado con pastizales y tierras forestales en la gráfica) y la ganadería (fermentación entérica en la gráfica).

En Alemania como representante del Norte Global y país con alta industrialización y niveles de consumo, los sectores de energía, industria, residencial y transporte representan el 91%, mientras AFOLU apenas el 8%. El enfoque clave para la descarbonización en Alemania por lo tanto está en el consumo de energía.

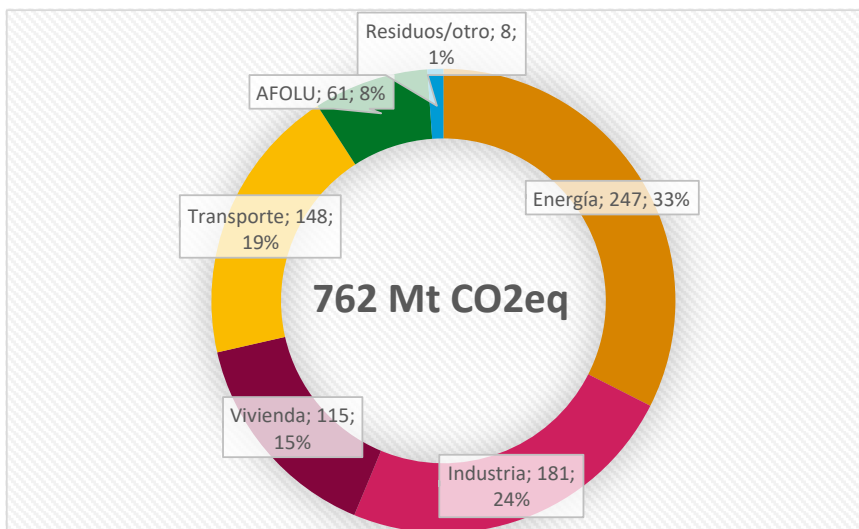
La comparación de emisiones absolutas también revela, que en 2018 Colombia emitió 303 Mt CO₂eq (2018), mientras Alemania emitió 762 Mt CO₂eq (2021), con una población de 50 (COL) y 83 millones (DE). Mientras las emisiones energéticas per cápita son relativamente pequeñas en Colombia (1,8t/cap/a) y grandes en Alemania (8,3t/cap/a), el total aumenta a 6t/cap/a en Colombia y 9,1t/cap/a en Alemania cuando se incluye AFOLU. La diferencia entre los dos países es sorpresivamente pequeña dado la diferencia en las economías, y resalta la importancia del sector AFOLU en Colombia.

Fig. 1: Emisiones GEI por sectores Colombia (2018)



Fuente: IDEAM et al. (2022, p. 95)

Fig. 2: Emisiones GEI por sectores Alemania (2021)



Fuente: basado en datos de UBA (2022), gráfica adaptada por autor

Para Alemania, las estrategias de descarbonización sectoriales son claves para la transición energética, y están siendo elaboradas. Aunque en Colombia el sector AFOLU es de mayor importancia, el sector de energía también requiere descarbonización para implementar las metas del acuerdo de París (UNFCCC, 2020). La sustitución de fuentes fósiles en los sectores de AFOLU, transporte, industria, residencial y electricidad es un reto en ambos países.

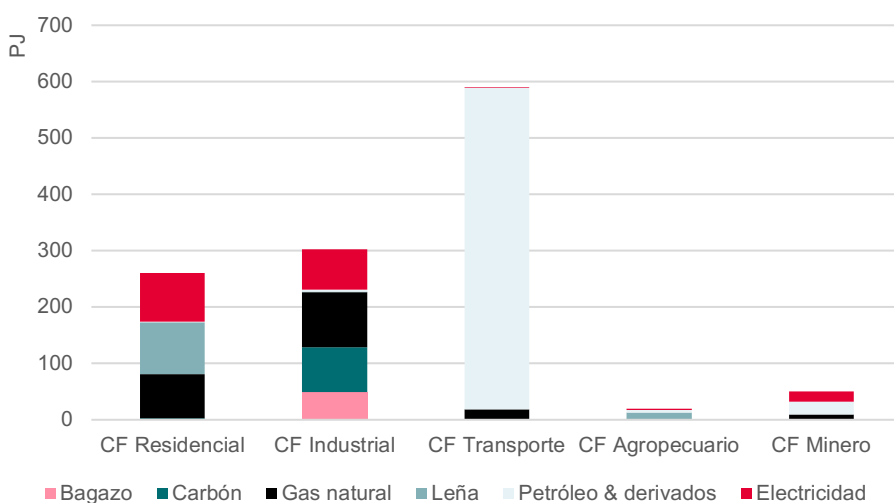
Este informe analiza la situación actual y proyecciones existentes en cada sector comparando Colombia y Alemania (capítulo 2 y 3), y presenta enseguida las narrativas existentes (capítulo 4). Analiza las capacidades en generación renovable necesarias para una electrificación (capítulo 5) y cómo los proyectos de transición energética previstos en los dos países como representantes del Sur y Norte Global están interconectados (capítulo 6) mediante importación/exportación de fuentes energéticas, bienes y tecnología y concluye (capítulo 7) con requerimientos para una transición justa y algunas reflexiones sobre la necesidad de pensar y diseñar una transición energética más allá de la descarbonización. Las políticas públicas apuntando a una transición energética en ambos países están listados en el anexo.

2 Análisis sectorial Colombia: situación y retos para la descarbonización

Este informe se enfoca en la transición energética como eje de mitigación de GEI. Después de un breve resumen de los esfuerzos recientes por reducir las emisiones del sector AFOLU, la sección se concentra en las emisiones de los usos de energía y no en otras emisiones. Esta sección analiza el consumo y la provisión de energía por sectores, proyecciones y planes sectoriales en Colombia, y en la siguiente sección, en Alemania.

Detrás de las emisiones GEI representadas en la Fig. 1 está el uso (combustión) de fuentes fósiles en Colombia. Estas provienen principalmente del sector de transporte (600 EJ, gasolina, diésel y queroseno), del sector industrial (300 EJ, gas natural, carbón y leña), y del sector residencial (260 EJ, gas natural y leña) (Fig. 3). El sector agropecuario y minero consumen una parte más pequeña. La generación de electricidad y la exportación de fuentes energéticas no está incluida en esta gráfica, pero se trata por separado en capítulos abajo.

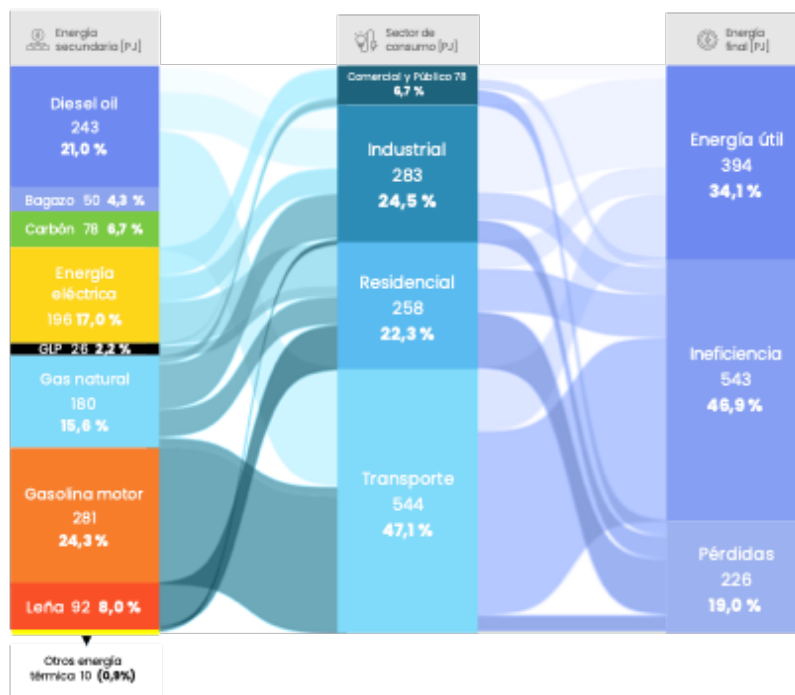
Fig. 3: Consumo de fuentes de energía por sectores (2020)



Fuente de datos: UPME (UPME, 2023b)

La Fig. 4 muestra cómo las fuentes energéticas (solamente energía secundaria, sin fuentes primarias) se distribuyen entre sectores. También muestra que solamente el 34% de la energía secundaria se convierte en energía útil. Esto es principalmente consecuencia de los procesos ineficientes de combustión en plantas industriales, usos residenciales y los motores diésel y a gasolina.

Fig. 4: Consumo de energía por fuentes y uso por sector (2020)



Fuente: UPME (2022a, p. 11)

2.1 AFOLU: Agricultura, Silvicultura, uso de tierra

En Colombia las emisiones provienen principalmente del sector de uso y cambio de uso de la tierra, como sigue: Pastizales (Pastizales que permanecen como tales y Tierras forestales convertidas en pastizales) con un 20% del total nacional; Tierras forestales que permanecen como tales (stock change), corresponden a las emisiones por el cambio de bosque natural a otro tipo de coberturas o usos, con un 11%; y 3 Tierras forestales que permanecen como tales (bosque natural), que corresponden a las emisiones asociadas a la degradación del bosque por el consumo de leña en la población rural, con un 6%. Estas tres (3) subcategorías en conjunto con la fermentación entérica (subcategoría 3A1), que aporta el 14% del total, agregan el 51% de las emisiones totales del país. Con la composición sectorial de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de Colombia, no es extraño que la deforestación sea considerada el principal problema ambiental y de contribución al cambio climático en el país, generado por factores como la apropiación de baldíos, la ganadería extensiva, la construcción de vías, la minería ilegal y la siembra de cultivos de uso ilícito (CCAP & FCDS, 2023).

Las estrategias concomitantes en los últimos veinte años han pasado del enfoque militarista y policial de los dos gobiernos de Uribe (2002 a 2010) enfocados en combatir los cultivos ilícitos como causa de la deforestación, a la estrategia institucionalista de Santos (2010 a 2018). Esta estrategia, a pesar de incluir esquemas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) y de la firma del Acuerdo de París en

2015, vio crecer las tasas de deforestación que fueron asociadas al fin del control territorial por parte de las FARC como resultado de la firma del Acuerdo de Paz. Posteriormente en el gobierno de Duque (2018-2022) se volvió al enfoque militar con la operación Artemisa que, con un alto costo en violaciones a los derechos humanos (Bautista, 2022) adujo la recuperación de áreas de parques naturales, pero sin lograr bajar las tasas de deforestación. En el gobierno Petro la estrategia militar fue reemplazada por una comunitaria fundamentada en acuerdos sociales y la acción educativa, con algunos antecedentes en el país, cuyo mayor obstáculo ha sido la falta de financiación. Todavía es temprano para evaluar su efectividad.

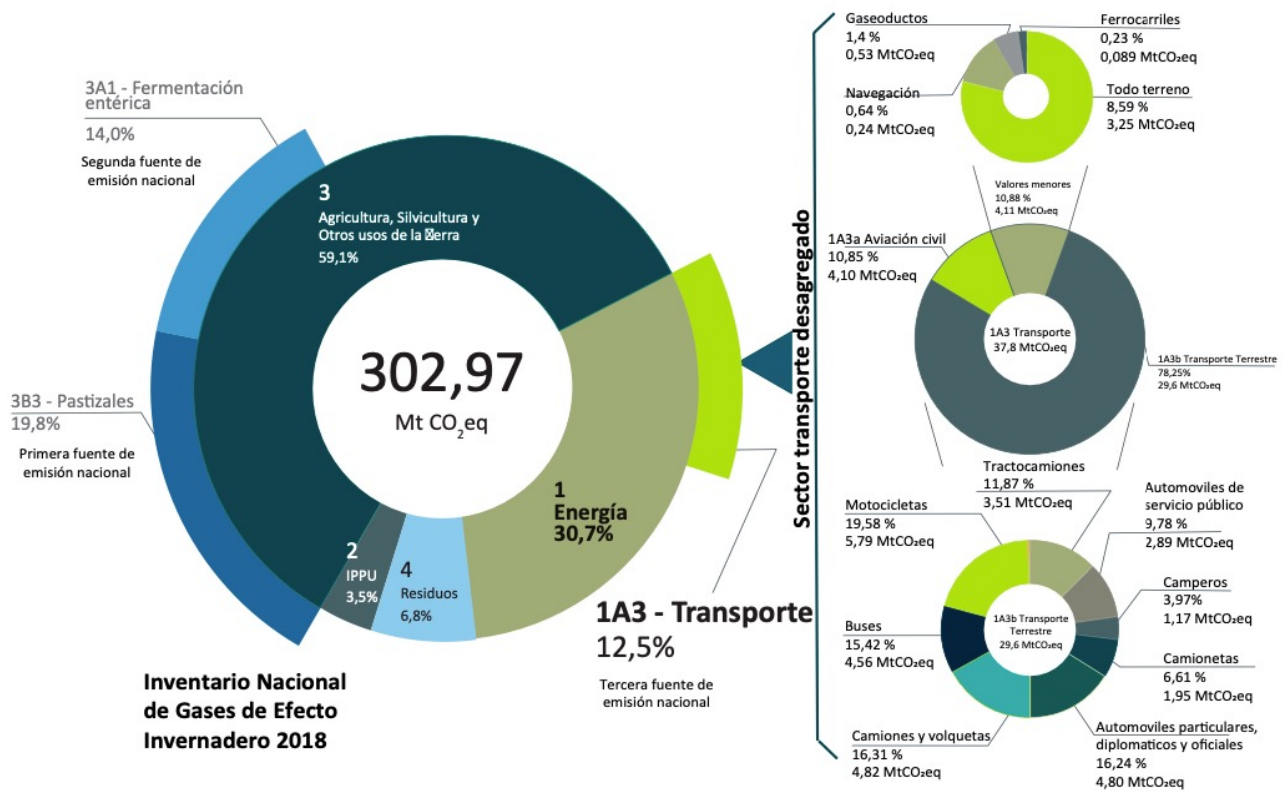
La estrategia global de reducción de las emisiones debidas a la deforestación y la degradación de los bosques (REDD+) ha servido de marco para varias estrategias del gobierno colombiano. Se destacan dos grandes grupos de iniciativas: la de acuerdos multilaterales como la Declaración Conjunta de Intención (DCI) y la de los mercados voluntarios de carbono. La Declaración Conjunta de Intención (DCI) se firmó inicialmente en la COP21 en 2015 y se ha extendido hasta el 2025, como un mecanismo de pago por resultados en reducción de GEI por parte de Alemania, Noruega y Gran Bretaña (UK Government et al., 2023), a los que se sumaron Suecia y Suiza. Estos países pagan al gobierno colombiano por los resultados logrados con base en hitos de política o implementación hasta USD 106 millones, y por reducción de emisiones verificadas hasta USD 260 millones. Una de las iniciativas implementadas bajo el DCI fue la de Visión Amazonía en la que confluyeron objetivos de control de deforestación (reducir a cero la deforestación neta a 2020) y construcción de paz, por enfocarse en un territorio con una larga historia de conflicto armado. Como lo demuestran los monitoreos, la meta de reducción de la deforestación no se ha cumplido y los objetivos se han diluido en logros menos específicos (UK Government et al., 2023). Las falencias de Visión Amazonía se atribuyen a que sus acciones han estado desconectadas de los factores estructurales de la deforestación (Rodríguez-de-Francisco et al., 2021). También se ha criticado la falta de atención a los derechos de los pueblos indígenas y la consecuente desigual distribución de los beneficios (Andoke Andoke et al., 2023). Por otro lado, los esquemas voluntarios que transan emisiones de empresas o países por el potencial de captura de carbono en la vegetación o los suelos del trópico, también llamadas “soluciones basadas en la naturaleza”, han operado por cerca de veinte años bajo el supuesto de la equivalencia entre las emisiones por quema de combustibles fósiles y la captura en vegetación y suelos. Las primeras hacen parte del ciclo lento del carbono y las segundas forman parte del ciclo biológico, que es inestable y que además tarda mucho tiempo en efectivamente capturar el carbono que se emite por la quema de fósiles. Además del problema de equivalencia, se ha demostrado que los proyectos de compensación por deforestación evitada en realidad no han logrado evitar la deforestación y si lo han hecho, ha sido muy por debajo de lo que se proclama (West et al., 2023).

Las dificultades demostradas en la reducción de emisiones por deforestación en Colombia hacen urgente que el país considere ajustes a las estrategias del sector AFOLU, buscando abordar las causas estructurales de los cambios en el uso del suelo, y que además aborde la descarbonización de los demás sectores responsables de las emisiones de GEI.

2.2 Transporte

El sistema de transporte de pasajeros y carga en Colombia está fundamentalmente basado en transporte por carretera que genera el 78% de las emisiones GEI del sector (Fig. 5). Aunque los volúmenes de transporte por vía aérea son menores, las emisiones anuales de este modo aumentan a 10%, debido a la alta intensidad de consumo de energía.

Fig. 5: GEI del sector de transporte (2018)

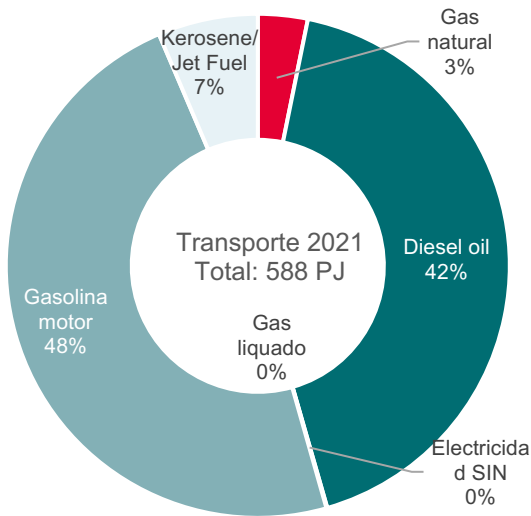


Fuente: Mintransporte (Mintransporte, 2022, p. 53)

Los combustibles utilizados en el sector son mayormente el diésel (camiones, tractomulas, buses), gasolina y en cantidades limitadas gas natural (automóviles particulares y motocicletas) y queroseno (aviones), sumando 588 PJ/a (2021) (Fig. 6). Con 0.3 PJ la electricidad juega un rol marginal todavía, incluyendo el metro de Medellín y los automóviles eléctricos (BEV).

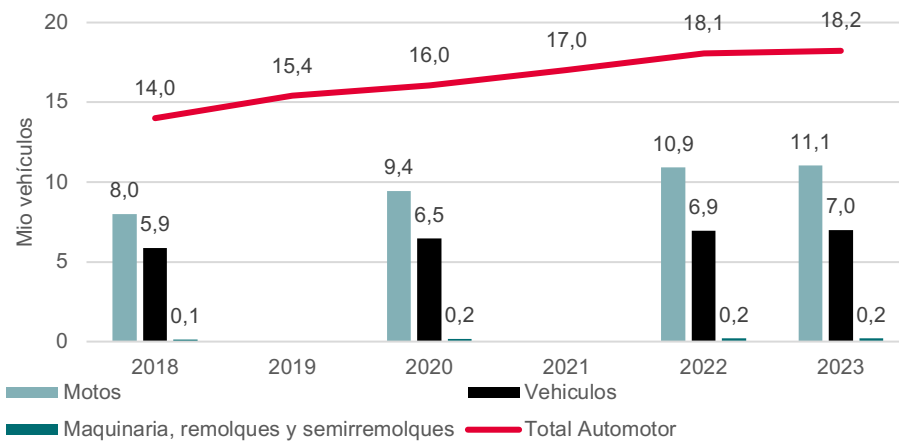
El número de automóviles, motocicletas y vehículos pesados está creciendo, como es la tendencia mundial (Fig. 7). Actualmente existen 135 vehículos por 1000 habitantes colombianos. Esta tendencia se mantiene en las proyecciones: la UPME proyecta un aumento en demanda hasta 2035 de todos los combustibles fósiles, 14% diésel, 19% gasolina, 34% GLP y un 80% de queroseno (Fig. 8). Esta proyección es completamente incompatible con las metas de mitigación de emisiones GEI.

Fig. 6: Energía primaria y secundaria en el sector transporte



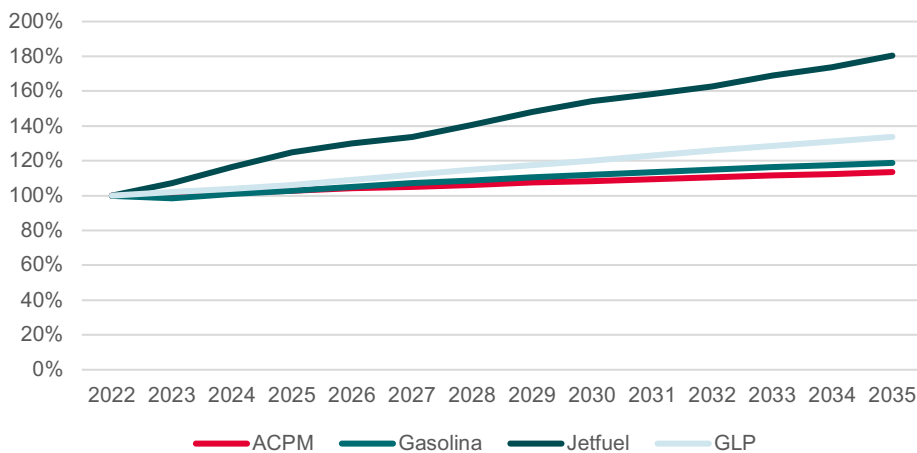
Fuente de datos: UPME (2023b)

Fig. 7: Parque automotor registrado en el registro único nacional de tránsito (RUNT)



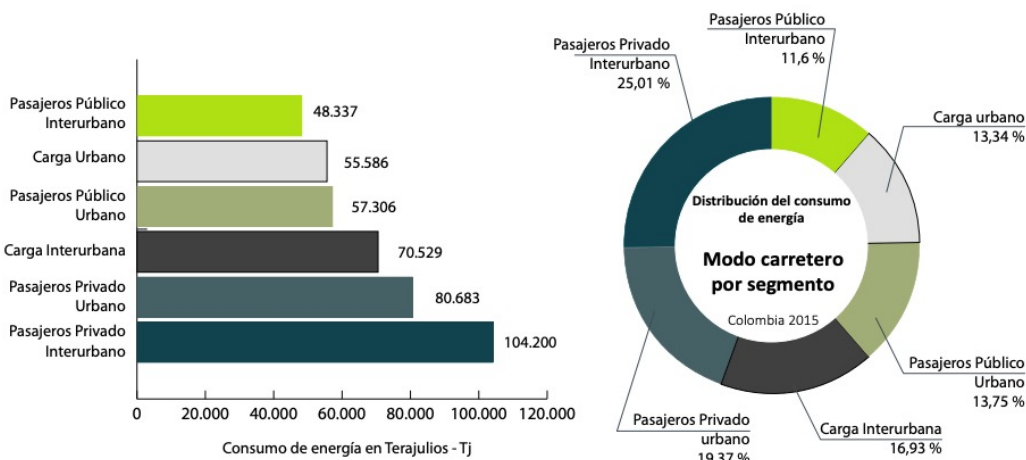
Fuente de datos: recopilado de RUNT (2023), gráfica por autor

Fig. 8: Proyección de demanda combustibles



Fuente de datos: UPME (2022)

Fig. 9: Consumo energético modo carretero



Fuente: Mintransporte (2022, p. 56)

La descarbonización del transporte como tercera fuente más grande de GEI es clave para una transición energética en Colombia. Y como el sector actualmente está completamente concentrado en carreteras y motores de combustión, requerirá de una estrategia política adecuada que logre una transformación contundente para todos los subsectores grandes: transporte de pasajeros urbanos e interurbanos (tanto individual como público) y carga urbana e interurbana. Requiere un mejoramiento de infraestructuras de transporte público (incluyendo un enfoque en el modo más eficiente: trenes), y la elaboración de una estrategia para reemplazar los combustibles fósiles por motores eléctricos (batería o hidrógeno) o por biomasa (biodiésel o bioetanol).

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) en su versión definitiva es poco concreto sobre pasos específicos en el sector de transporte. Se menciona la posibilidad de que el gobierno nacional financie más del 70% de sistemas férreos de transporte público masivo de pasajeros (artículo 172) y la promoción de la movilidad escolar eléctrica (art. 221). El hidrógeno verde y blanco se definen, pero no se incluye ningún plan concreto para el desarrollo de esta industria, ni ningún plan para la transición progresiva de la movilidad terrestre a través de incentivos tributarios, asistencia técnica y suministro de energía eléctrica, como se había prometido en la campaña electoral (Petro & Márquez, 2022). El PND carece de medidas concretas que se tomarán para una transformación del sector movilidad y carga.

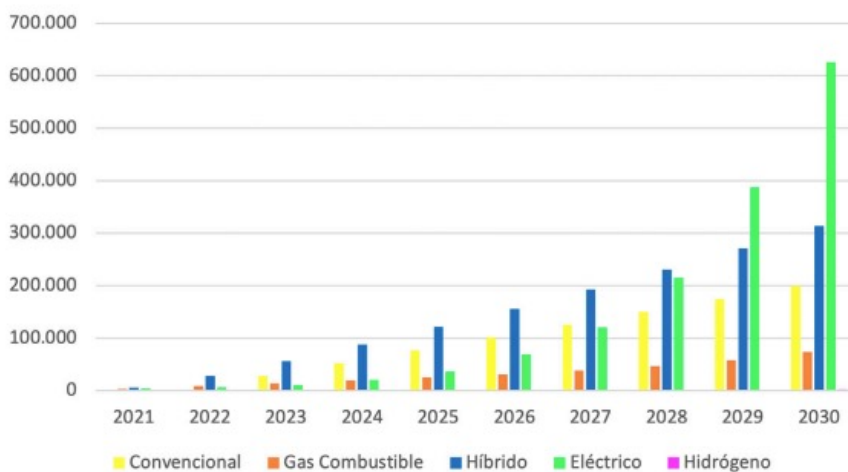
El consumo de combustibles fósiles en Colombia ha sido protegido de la volatilidad de los precios internacionales del petróleo mediante el Fondo de Estabilización de Precios de los Combustibles (FEPC) que se creó en 2007. Compensar a Ecopetrol por la diferencia entre el precio interno y el internacional ha generado un creciente déficit especialmente después de la pandemia, convirtiéndose en un riesgo fiscal. El gobierno Petro ha iniciado un aumento gradual del precio de la gasolina y planea aumentar el precio del diésel. El riesgo político de este aumento se relaciona con un posible impacto en la inflación especialmente en alimentos. Sin embargo, la meta es que los precios internos suban a nivel de los precios internacionales para desincentivar el uso de vehículos privados (carros y motos) con el desmonte de un subsidio regresivo.

La estrategia nacional de transporte del anterior gobierno Duque (Mintransporte, 2022) contiene un diagnóstico detallado del sector del sector de transporte con una desagregación por tipos de vehículos (livianos y pesados/carga, individual y público), por estándar de emisión etc. En contraste, el PND actual se refiere superficialmente al modo férreo, con poca visión y sin medidas concretas. Las pocas líneas férreas en funcionamiento (Mintransporte, 2022, p. 71) se utilizan principalmente para el transporte de carbón y otra carga, mayoritariamente para la exportación. La estrategia nombra varias Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación (NAMAs por su sigla en inglés) en el sector de

transporte (incl. temas de eficiencia de carga, uso de bicicleta/racionalización de modos privados, digitalización y movilidad eléctrica). Parece poco probable que estos proyectos de carácter piloto cambien el sector fundamentalmente.

La estrategia nacional postula como objetivos mitigar las emisiones GEI, aumentar la eficiencia y diversificar la matriz energética, mejorar la seguridad de transporte e incentivar la transición energética. El capítulo de “plan de acción” se concentra en la electromovilidad, pero en el sentido de ampliar, más no de reemplazar los vehículos existentes.

Fig. 10: Proyecciones de crecimiento acumulado por tecnología 2022-2030



Fuente: Mintransporte (2022, p. 56)

Las proyecciones incluyen el crecimiento de nuevas tecnologías (parque vehicular), donde especialmente los eléctricos e híbridos presentan mayor crecimiento en la década actual, pero con un crecimiento de las tecnologías fósiles que se mantienen en el mercado. No es claro cómo este escenario podría ser compatible con las metas del acuerdo de París, ni cómo se va a lograr una descarbonización del sector¹ con tal aumento de vehículos (aún si son eléctricos: meta indicativa 1.2 M, el 7% para 2030 (Mintransporte, 2022, p. 97)), ni cómo estos vehículos podrán circular por las vías del país.

En los mercados de automotores del Norte Global, donde la tasa de automóviles por habitante ya es mucho mayor que en Colombia (DE: 0,59/cap vs. COL: 0,135/cap), la estrategia de descarbonización planeada (ver capítulo 3.2) sigue principalmente dos medidas:

- Cambio tecnológico: sustitución de motores de combustión por eléctricos (batería o fuel cell/hidrógeno)
- Cambio de medio: sustitución de kilómetros por vehículo individual a medios de transporte público (tren/bus eléctrico), o no motorizado

Para Colombia existen opciones adicionales:

- Biocombustibles (a base de aceites)
- Biogás (a base de residuos agrícolas o cosechas dedicadas)
- Bioetanol (a base de azúcar)

¹ Un estudio de la Universidad Nacional (Valencia Hernandez, 2022) evalúa escenarios de transporte para Colombia por medio de un system dynamic model, con un enfoque en tecnologías de propulsión (sin alternativas como férreo), en una línea parecida a la narrativa del Gobierno (Mintransporte, 2022). Los 4 escenarios evaluados no conducen a una descarbonización del sector (variación de emisiones entre $\pm 20\%$ (p. 108) comparado a *business as usual*).

Estas últimas opciones no son factibles en muchos países del Norte Global (esp. Europa), donde las áreas agrícolas son ya muy limitadas y la expansión de producción de bioenergía sostenible es poco viable. Para Colombia, el potencial y la sostenibilidad de estas opciones se tendría que estudiar con detalle. El bioetanol ya se usa como estrategia principal en Brasil y podría funcionar a corto plazo. La tecnología está madura y el etanol se puede mezclar con gasolina para gradualmente reemplazarla, utilizando los mismos motores combustibles (Sydney et al., 2019), pero podría tener límites por las condiciones sociales de la producción de caña de azúcar en Colombia. Además, los motores reducirían su eficiencia, con pérdidas de >70%.

La estrategia del Norte Global por otro lado apunta a la electrificación (directa: BEV con mayor eficiencia >90%, o indirecta por medio de hidrógeno), lo cual reduciría el consumo energético primario del sector de transporte, porque el uso directo de electricidad es más eficiente y tiene menos pérdidas. La tecnología BEV todavía es más costosa que los combustibles (ICE), lo cual la hace inaccesible para una gran parte de la población colombiana. Dado la cifra alta de motocicletas la electrificación también es clave. Con avances tecnológicos, bajos costos de electricidad (en comparación con otros países), y posiblemente subsidios estatales, los vehículos BEV pequeños serían más económicos a largo plazo que ICE (Liu et al., 2021) como también motocicletas eléctricas y se podrían convertir en la tecnología preferencial de descarbonización. En las estrategias actuales de los sistemas de buses articulados se está planteando el gas natural vehicular como la tecnología preferida de reducción de emisiones. Esto no es una descarbonización y aún hay muy poca acción en cuanto a electrificación.

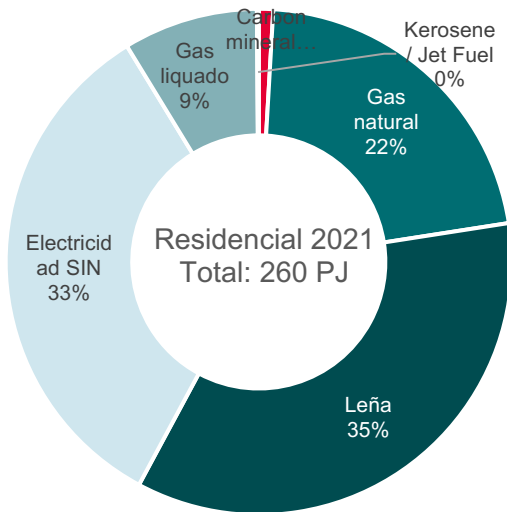
La estrategia de electrificación depende de grandes cantidades de energía eléctrica adicional que se tiene que generar, distribuir y cargar a una red de carga. No existen proyecciones para la energía eléctrica adicional, ni la red de carga. Un enfoque en el transporte público que consume menos energía es clave para minimizar el consumo total del sector.

2.3 Residencial

El consumo energético residencial se reparte en partes iguales entre electricidad, leña y gas (natural y licuado) (Fig. 11). Mientras la electricidad se utiliza para todas las aplicaciones residenciales incluyendo por ejemplo iluminación y refrigeración, la leña y el gas se utilizan mayormente para la cocción de alimentos.

Dado que el gas natural hasta ahora se considera como fuente de transición, no se ha dado mayor discusión a un plan a mediano plazo sobre cómo se podría sustituir esta fuente fósil. Más bien, se proyecta como estrategia para reemplazar la leña en fogón abierto que trae graves efectos en la salud por las emisiones de material particulado (PM). Sin embargo, la leña es una fuente energética renovable. La estrategia de sustituir la cocción en fogón abierto debería brincarse la fuente fósil, y más bien enfocarse en fuentes limpias, inocuas a la salud y sostenibles como el biogás, la electricidad o la leña en estufas cerradas que pueden ser soluciones a más bajo costo con energía local y renovable en las zonas rurales que hoy utilizan leña.

Fig. 11: Consumo de energía en el sector residencial 2021



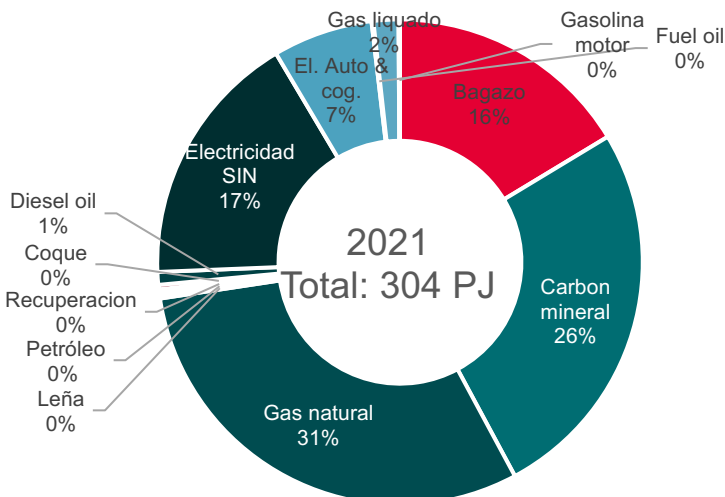
Fuente de datos: UPME (2023b)

La sustitución del gas natural en zonas urbanas puede funcionar por una de dos vías principales: por biogás o electricidad. Ambas opciones tienen repercusiones en los sectores de provisión: la ventaja del biogás es la persistente utilización de las aplicaciones domésticas (estufas) y la red de distribución existente. Por otro lado, se tendría que construir una industria completa nueva, capaz de suministrar estas cantidades grandes de biogás a partir de residuos orgánicos o cosechas dedicadas a la gasificación. La capacidad de producción de biogás es limitada y probablemente insuficiente para abastecer una ciudad. La opción de electrificar la cocción significaría por un lado una producción y difusión de estufas eléctricas y por otro lado el correspondiente incremento en la demanda y generación de electricidad.

2.4 Industria

La industria colombiana es el segundo sector consumidor más grande del país, siendo sus fuentes principales el gas natural, el carbón, la electricidad y el bagazo (Fig. 12).

Fig. 12: Consumo de energía en el sector industrial 2021



Fuente de datos: UPME (2023b)

Como la industria es muy diversa, una descripción de fuentes energéticas y opciones de transformación es superficial en este informe y requiere un estudio más profundo.

El gas natural se utiliza en una variedad de hornos para procesos de alta y mediana temperatura (por ejemplo: industria química, metalúrgica, de plásticos etc.). Como en los otros sectores, existen varias opciones de sustitución, siendo los principales la electrificación directa o la biomasa. Es necesario un estudio detallado de los usos en Colombia y las opciones de sustitución más favorables.

La situación del carbón y opciones de descarbonización es similar. El carbón se utiliza principalmente en la industria metalúrgica y para hornos en las zonas carboníferas de Colombia. Para la industria de aceros y altas temperaturas, la vía tecnológica es la utilización de hidrógeno verde o electrificación directa. Para organizar un proceso de descarbonización y mantener la competitividad de la industria, Colombia un análisis profundo de las tecnologías actuales, opciones de cambio y una estrategia política industrial y de inversión.

El bagazo se utiliza mayormente en la industria azucarera como combustible para hornos. Es una fuente renovable y no requiere sustitución. Más bien, incrementos en la eficiencia de su uso podrían generar excedentes y proveer otras industrias.

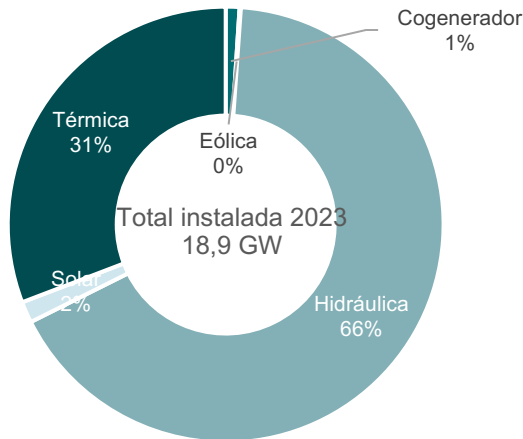
No existe todavía una hoja de ruta gubernamental para descarbonizar el sector industrial en Colombia. Los retos principales serán la sustitución del actual uso de gas natural y carbón. Manufactura Latam (2022) recomienda el siguiente “camino para descarbonizar las principales industrias”:

- “En la industria de cemento, se deben reemplazar combustibles fósiles con biomasa; en el futuro, dar la transición a hidrógeno o electricidad. [captura y almacenamiento de carbono, CCS por siglas en inglés, para emisiones de proceso]
- En la producción de acero se propone usar carbón vegetal en vez de carbón mineral. Aunque el carbón vegetal es menos eficiente porque requiere hornos más pequeños, ya hay plantas en Brasil que han hecho la transición y han logrado obtener ganancias. [+H₂, CCS para emisiones de proceso]
- Los productores de amoníaco pueden reemplazar la urea por fertilizantes basados en nitratos, producidos a partir de amoníaco y no de dióxido de carbono [...]
- En la producción de etileno, los plásticos reciclados reducirían las emisiones de carbono asociadas con el proceso de cracking. Los fabricantes de plástico podrían usar hidrógeno carbono-cero o biomasa para calentar los hornos de pirólisis, una modificación que requeriría mínimas alteraciones al diseño de los hornos. [...]”(Latam, 2022)

2.5 Generación de electricidad

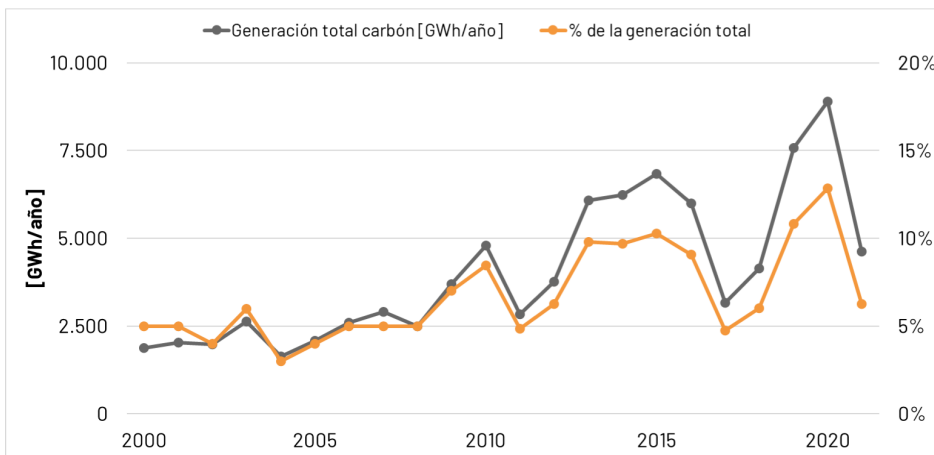
El parque de plantas para la generación de electricidad en Colombia actualmente alcanza casi 20 GW instalados, de los cuales 2/3 son hidráulicas y 1/3 térmicas (Fig. 13). Las plantas generan alrededor de 70 TWh/a (Fig. 15), de los cuales aprox. 60 TWh son hidráulicas y el restante son térmicas de carbón (Fig. 14) y gas natural, con una pequeña parte de ACPM, especialmente en la región Caribe.

Fig. 13: Capacidad instalada por tipo de generación



Fuente de datos: XM (2023)

Fig. 14: GWh_{el} generados por fuente de carbón



Fuente de datos: XM (2022), citado en Flechas Mejía et al. (2022, p. 5)

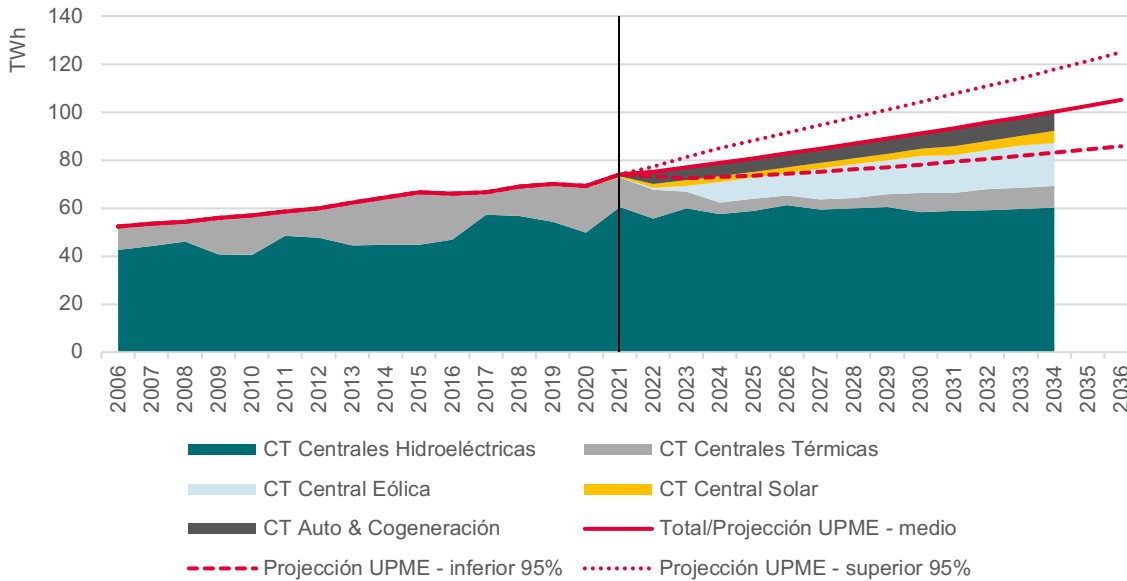
Para la descarbonización del sector eléctrico será clave la eliminación de energías fósiles (carbón y gas) y la expansión de “fuentes no convencionales de energías renovables” (FNCER) para su sustitución y para satisfacer el crecimiento de la demanda futura.

Las variaciones en el uso de carbón en la última década se relacionan con la escasez de agua en los embalses especialmente durante fenómenos de El Niño. La tendencia del uso de carbón es de todos modos creciente, dada la construcción de nuevas plantas térmicas en la última década. En 2022, existían 19 plantas activas con una capacidad de 1.7 GW.

La organización Transforma propuso una hoja de ruta para la eliminación gradual de las plantas de carbón (Flechas Mejía et al., 2022). Se propone un cierre posible primero de las instalaciones más viejas e ineficientes, en dos escenarios hasta 2030 o 2035, y un reemplazo por instalaciones de fuentes no convencionales de energías renovables - FNCER. Un análisis similar está por hacerse con respecto a las plantas de gas natural. La Fig. 15 muestra, cómo la demanda proyectada creciente se suple con la entrada en funcionamiento de nuevas capacidades de generación, principalmente Ituango, plantas térmicas y nuevos parques eólicos previstos.

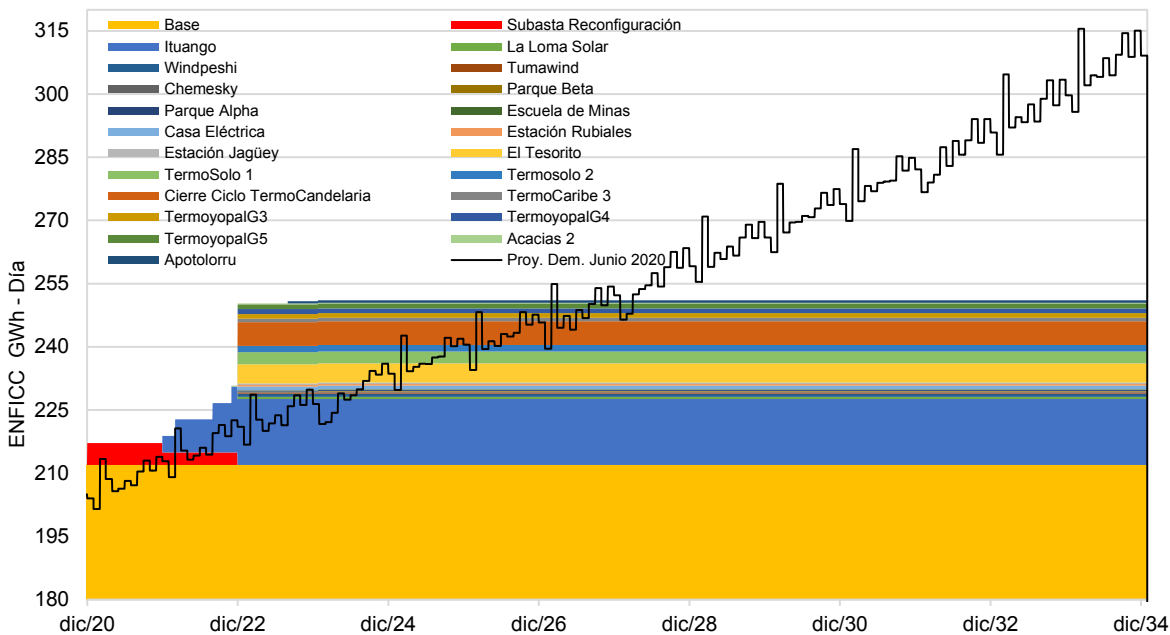
La UPME regularmente proyecta la demanda de fuentes energéticas incluyendo la electricidad, teniendo en cuenta tendencias y nuevos usos previstos (por ejemplo, de actividades industriales mayores, de BEV o el metro de Bogotá). La proyección (UPME, 2022) estima un incremento de demanda de 75 TWh/a en 2022 a 85 TWh/a en 2036 (Fig. 15). Esto no incluye una proyección a más largo plazo y especialmente no incluye la electrificación masiva de sectores que actualmente utilizan cantidades sustanciales de energías fósiles (transporte, industria, residencial).

Fig. 15: Matriz energética de generación de electricidad 2006-2021



Fuente de datos: Datos históricos hasta 2021 UPME (2023b), porcentaje proyección de generación desde 2022 UPME (2020, p. 49 escenario 1), proyección demanda UPME (2022). Calculaciones y gráfica: autor.

Fig. 16: Energía en firme y proyección de demanda 2020-2034



Fuente: UPME (2020, p. 23)

En la lista de proyectos de expansión fija (proyectos en gestión, Tab. 2) se encuentra, al lado de Hidroituango, la gran mayoría de FNCER (2.7 GW), y los proyectos térmicos (0.9 GW) que podrían ser los últimos en entrar en funcionamiento en Colombia (UPME, 2020).

En su “plan de expansión de referencia” (UPME, 2020), la UPME utiliza un modelo de simulación para evaluar la futura expansión y utilización de tecnologías en el parque de generación eléctrica. Dado que las FNCER (eólica, solar) ya son de menor costo que las plantas de carbón (Tab. 1), mucho menos que los 1800-2400 USD/kW calculado por el Banco Mundial en 2010 (World Bank, 2010), y con gas previsto a ser de limitado alcance y costo creciente, la simulación encuentra que nuevas capacidades serían únicamente FNCER. Esto se ve reflejado también en la contribución de la fuente a la generación eléctrica proyectada (Fig. 15). En los diferentes escenarios de sensibilidad (retraso en entrada en función de Hidroituango, El Niño, impuesto al carbono de 5 USD/tCO₂, o aplicación de la Guía de Caudal Ambiental para hidroeléctricas) de la UPME, los cambios conducen a una mayor necesidad de construcción de plantas solares y eólicas. Los escenarios a largo plazo (2050) prevén un incremento de 150% de capacidad instalada, con principal expansión de solar y eólica, pero incluyendo todavía plantas térmicas en 2035-2050 lo cual no es compatible con las metas del acuerdo de París.

Tab. 1: CAPEX de instalaciones para generación eléctrica por tecnología (2020)

Tecnología	Mínimo [\$/kW]	Promedio [\$/kW]	Máximo [\$/kW]
Carbón	1,300	1,900	2,500
Gas	1086	1,150	1,213
Crudo	1,613	1,613	1,613
Hidro Mayor	1,704	1,792	1,880
Hidro Menor	2,542	2,542	2,542
Eólico	1,108	1,454	1,800
Solar	710	1,105	1,500
Biomasa-Cog	2,141	2,141	2,141
Geotermia	4,500	4,500	4,500

Fuente: UPME (2020, p. 28)

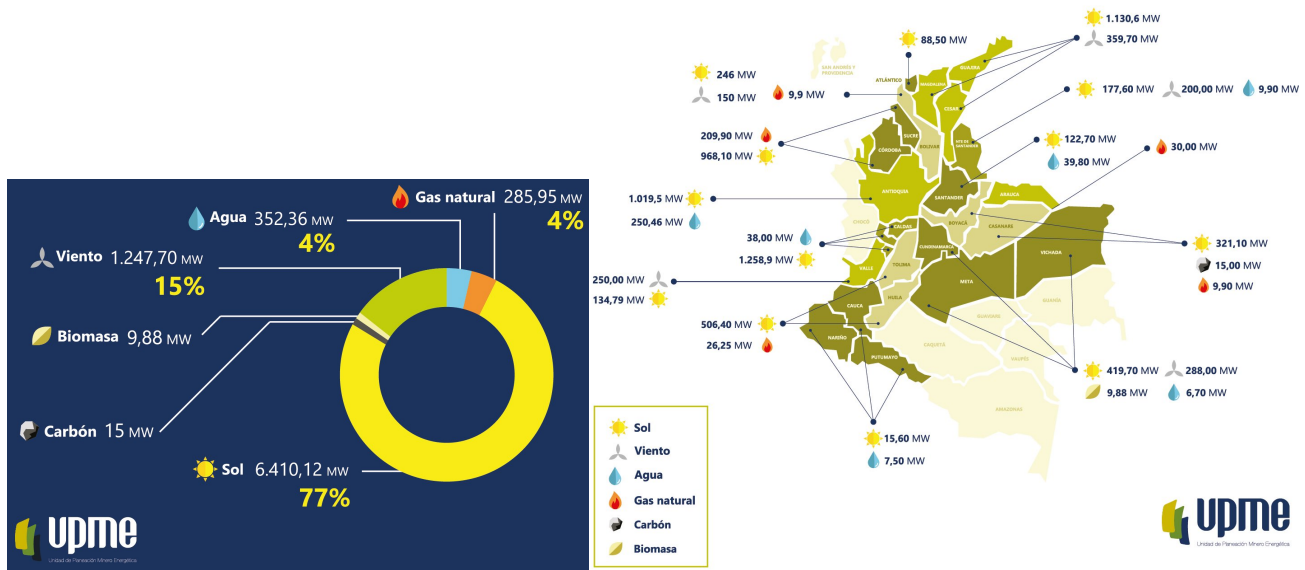
Tab. 2: Proyectos de expansión fija (2020)

Tecnología	MW (suma total)	Conexión prevista (última unidad)
Solar	702	1/24
Eólico	2072	11/23
Hidro (Ituango)	1200	6/22
Térmico	909	12/23

Fuente de datos: UPME (2020, p. 28), agregado de lista completa de proyectos

La expansión en capacidad de generación ha seguido en 2022-2023 en esta línea, pero con más énfasis en plantas solares (6410 MW), eólicas (1247 MW) y otros marginales. Las mayores adiciones de capacidad se concentran en el norte y centro del país (UPME, 2023a).

Fig. 17: Capacidad de transporte 2022-2023 (29 marzo 2023) asignada por recurso



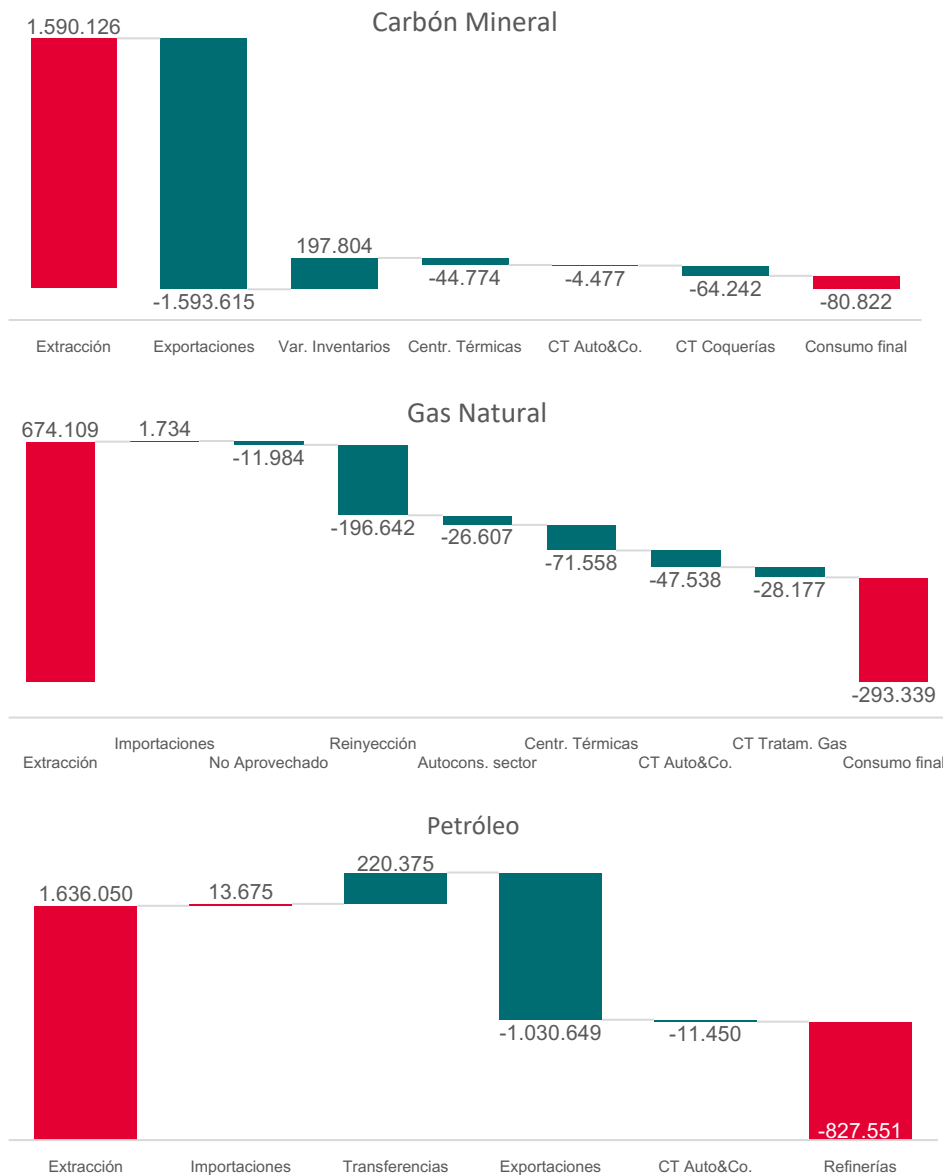
Fuente: UPME (en twitter 2023a)

2.6 Explotación y exploración de energía fósil

Entre las tres fuentes energéticas fósiles principales (carbón, gas natural y petróleo) existen diferencias importantes en sumas de explotación/exploración y uso (Fig. 18) según las cifras del balance energético (UPME, 2023b).

- Del carbón mineral explotado en las minas principales del país (esp. Cesar, Guajira), casi todo es exportado. Sólo un porcentaje mínimo se utiliza para la generación eléctrica, proceso en coquerías y consumo en la industria (y marginalmente para calefacción residencial).
- Colombia es (todavía) autosuficiente en el abastecimiento del gas natural. Cierta porcentage de la explotación se pierde por categorías como “no aprovechado”, autoconsumo o tratamiento (energía utilizada para la explotación/procesamiento), pero la mayoría es utilizada para el consumo final (residencial, industria) y en centrales eléctricas. Una porción importante (cerca del 30%) del gas extraído se reinyecta en pozos petroleros para mantener la presión en los pozos, lo cual también puede ser considerado como pérdida por ineficiencia en la extracción de fósiles.
- La explotación del petróleo no sólo es suficiente para autoabastecer el consumo nacional (en la gráfica utilización en refinerías), sino que más de la mitad de la explotación nacional se exporta.

Fig. 18: Extracción e utilización de fuentes fósiles 2021 (MJ)



Fuente de datos: UPME (2023b), gráfica por autor. Nota: reinyección de gas = inyectar en los yacimientos petroleros para mantener su presión.

Como consecuencia, Colombia es un exportador de carbón y petróleo (capítulo 2.7). Para una transición energética, la explotación, exploración y comercialización de estas tres fuentes fósiles debe necesariamente terminar a mediano plazo. Colombia, como cualquier otra economía, depende fundamentalmente del uso de estas fuentes, y adicionalmente de las exportaciones. Esto complica un abandono progresivo, y hace que los planes del gobierno actual planteados durante la campaña electoral sean contradictorios con las políticas:

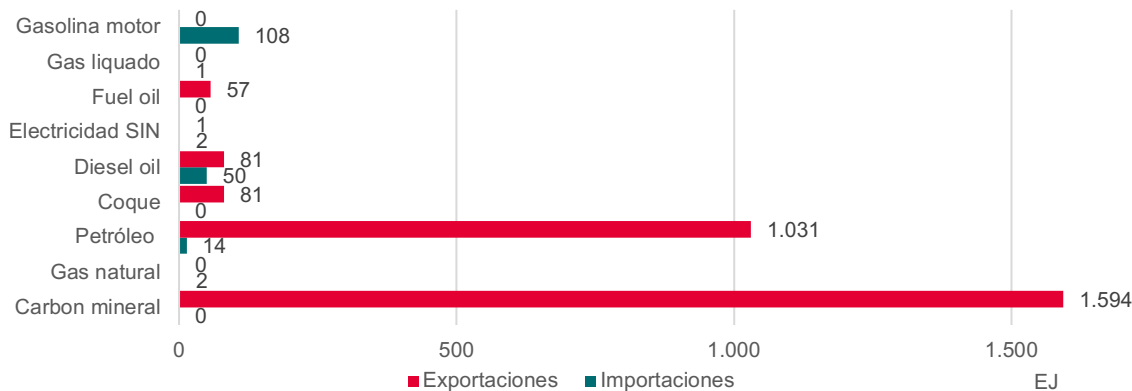
- **Campaña** (Petro & Márquez, 2022): “dejando de lado progresivamente la dependencia del petróleo, el carbón” (p. 7), “Promoveremos dentro de la agenda de la política internacional de Colombia [...] la obtención de compensaciones por dejar enterradas las reservas de carbón y petróleo y la imposición de gravámenes sobre la comercialización de productos altamente intensivos en dióxido de carbono” (P. 16) “En nuestro gobierno **se prohibirán la exploración y explotación de Yacimientos No Convencionales, se detendrán los proyectos piloto de fracking y el desarrollo de yacimientos costa afuera. No se otorgarán nuevas licencias para la exploración de hidrocarburos, ni se permitirá la gran minería a cielo abierto.**” (p. 17)
- **PND** p. 129: “La dependencia energética y económica del país de los combustibles fósiles representa una baja competitividad y acentúa la vulnerabilidad. Se requiere una respuesta urgente, que de manera progresiva lleve a cambios sustantivos en los modos de producción y de consumo. De manera contundente, se usarán los excedentes financieros del carbón y del petróleo para hacer una transición energética que nos lleve a una economía verde.” (Gobierno de Colombia, 2022, p. 129) – ya no explícitamente abandonando progresivamente el petróleo.
- **PND carbón** (p. 148): “se prohibirá el desarrollo de nuevos proyectos mineros para la extracción de carbón térmico a cielo abierto clasificados como minería de gran escala, precisando que los titulares que se encuentren realizando actividades de explotación de este energético, podrán seguir ejecutando sus actividades de conformidad con los derechos y obligaciones derivados de sus contratos; así mismo se establecerán estrategias de concertación entre los beneficiarios de los títulos de contratos que se encuentren terminados o terminen, con las autoridades mineras y ambientales, para poder dar una correcta gestión de cierre sus operaciones.” (Gobierno de Colombia, 2022, p. 148)
- **Minenergía sobre petróleo y gas** (15.3.23): “En la estrategia integral, el Gobierno Nacional incluye, entre otros instrumentos: [...] Continuar con la exploración y explotación de combustibles líquidos y gas, propiciando la autosuficiencia de la matriz energética.” (Minenergía, 2023)
- **decisión del Congreso de la República sobre carbón** (17.3.2023) de eliminar el artículo 186 que buscaba prohibir el desarrollo de nuevos proyectos mineros para la extracción de carbón térmico a cielo abierto clasificados como de gran escala (Quiroga Rubio, 2023).

En la campaña presidencial, el plan de gobierno planteó un abandono progresivo gradual de las energías fósiles, empezando con el carbón y la no exploración adicional de petróleo y gas, acompañado por una expansión de FNCER. La lista arriba indica la caída de los proyectos políticos del abandono progresivo de los fósiles. Todavía no se han concretado las decisiones que van a quedar en la versión final del PND y la hoja de ruta para la transición energética prevista para mayo de 2023.

2.7 Importación/exportación: fuentes energéticas y otros bienes

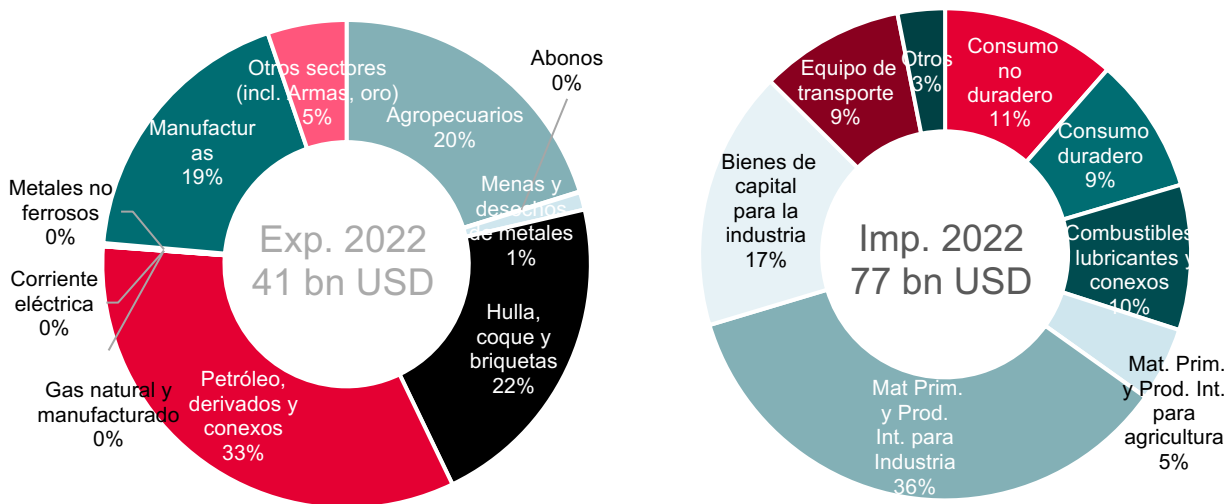
Como ya se mencionó en el capítulo anterior, Colombia se autoabastece de gas natural y no importa o exporta cantidades significativas. En cantidades mayores, se exportan casi 1600 PJ (55 Mt) de carbón y 1000 PJ (169 MBL) de petróleo, y cantidades menores de sus derivados (importación de gasolina por 20 MBL, importación de diésel por 8 MBL y exportación de 14 MBL). La Fig. 19 ofrece un resumen. Para la balanza de pagos internacionales y la balanza comercial, el valor monetario y el porcentaje en el comercio internacional es clave. En 2022, de las exportaciones colombianas, las energías fósiles constituyen el 55% en valor, seguido por productos agropecuarios y manufactureros. El 50% de las importaciones fueron materias primas y bienes de capital para la industria, seguido por un 20% de productos de consumo y otro 20% de productos para el sector de transporte (Fig. 20).

Fig. 19: Importaciones/exportaciones de energía (PJ)



Fuente de datos: UPME (2023b)

Fig. 20: Exportaciones (izq.) e importaciones (der.) 2022, valor en bn USD



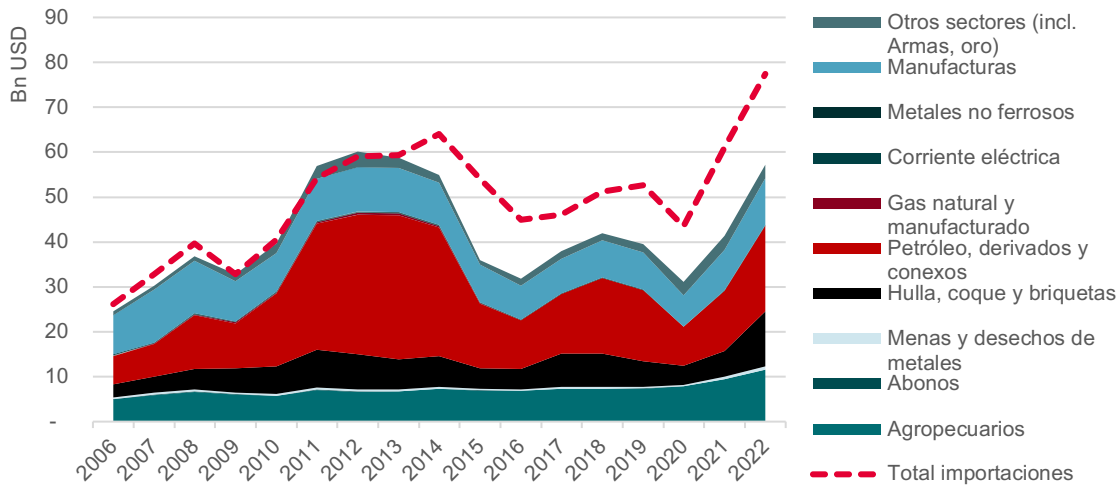
Fuente de datos: DANE (2023)

Analizando la evolución de exportaciones e importaciones (Fig. 21), existe un déficit en el comercio exterior desde el año 2014, cuando bajó el valor de las exportaciones de petróleo y las importaciones siguieron altas. El aumento de los precios de energía fósil y los volúmenes de exportación desde el año 2021 generaron un incremento masivo del valor de las exportaciones.

Sin embargo, y no obstante una vista optimista hacía la explotación de gas natural y petróleo de parte del Ministerio de Minas y Energía (Minminas & ANH, 2022), el escenario a mediano plazo requiere una preparación y planeación de Colombia:

- La explotación colombiana de gas va a disminuir gradualmente (Minminas & ANH, 2022). A partir de 2025 Colombia podría ser importador de gas natural (Moncado, 2022; UA & WTW, 2022)
- La explotación de petróleo está bajando a un 8% p.a., sin inversiones significativas en exploración y recobro mejorado, Colombia podría ser importador de petróleo desde 2028 (Moncado, 2022; UA & WTW, 2022)
- La demanda (y los precios) de carbón y petróleo va a disminuir con la transición en los países importadores avanzando
- La demanda mundial de hidrógeno y derivados va a crecer masivamente

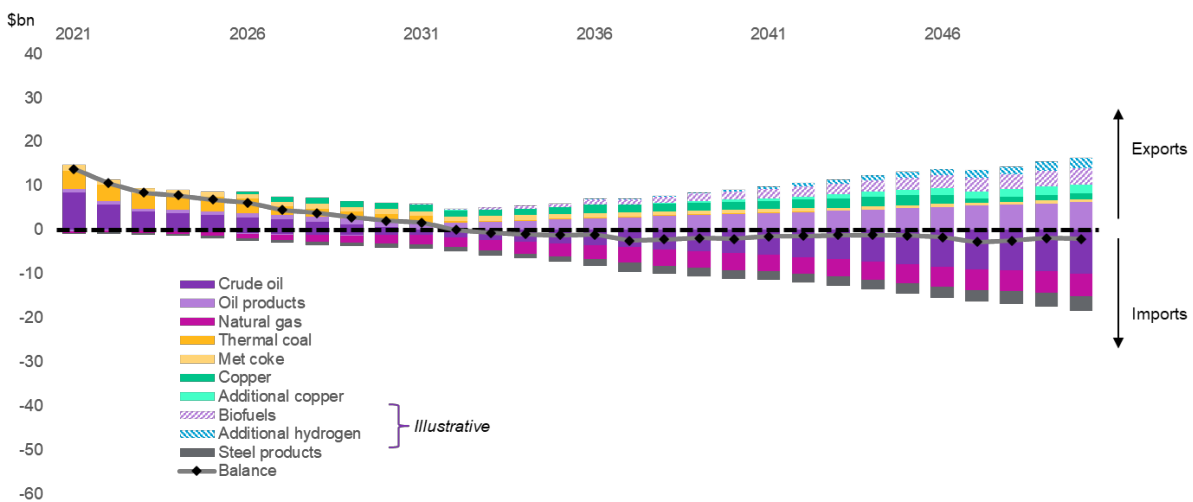
Fig. 21: Exportaciones e importaciones 2006-2022



Fuente de datos: DANE (2023)

UA & WTW (2022) recientemente estudiaron el escenario en que Colombia evoluciona de un exportador de fósiles a país importador y dependiente (Fig. 22). En el escenario, los autores encuentran nuevas exportaciones de biocombustibles e hidrogeno como también metales (cobre) como reemplazos adicionales para contrabalancear las futuras importaciones de petróleo, gas natural y productos derivados del acero.

Fig. 22: Colombia's potential future trade balance in transition-exposed sectors (WB2C) including a growth in transition-related exports and the impact of lower domestic oil and gas consumption



Fuente: UA & WTW (UA & WTW, 2022, p. 19)

Frente a este escenario parece aún más importante reemplazar el consumo de fuentes fósiles en todos los sectores colombianos para evitar futuras importaciones de fósiles y más bien autoabastecer la economía colombiana por fuentes limpias nacionales.

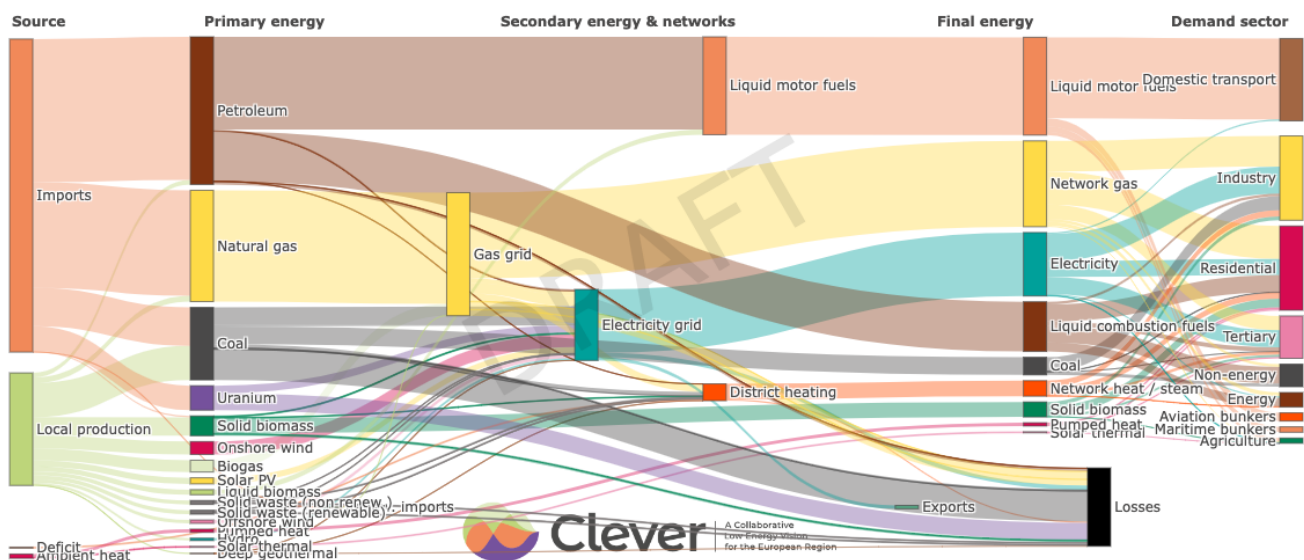
Consecuentemente, la versión 2022 del PND (Gobierno de Colombia, 2022) formula: “El Gobierno Nacional impulsará la incorporación de nuevas fuentes de generación de energía eléctrica a partir de FNCER, ajustando e implementando las hojas de ruta del hidrógeno y la energía eólica costa afuera.”

(P.144) y “Esto permitirá la descarbonización de múltiples sectores y el fortalecimiento de la canasta exportadora para disminuir gradualmente la dependencia de combustibles fósiles.” (p. 147)

El éxito de esta estrategia será clave para evitar un grave déficit futuro en el balance del comercio exterior y las turbulencias de la moneda y de la economía asociadas.

3 Análisis sectorial Alemania: situación y retos para la descarbonización

Fig. 23: Diagrama sankey Alemania 2020

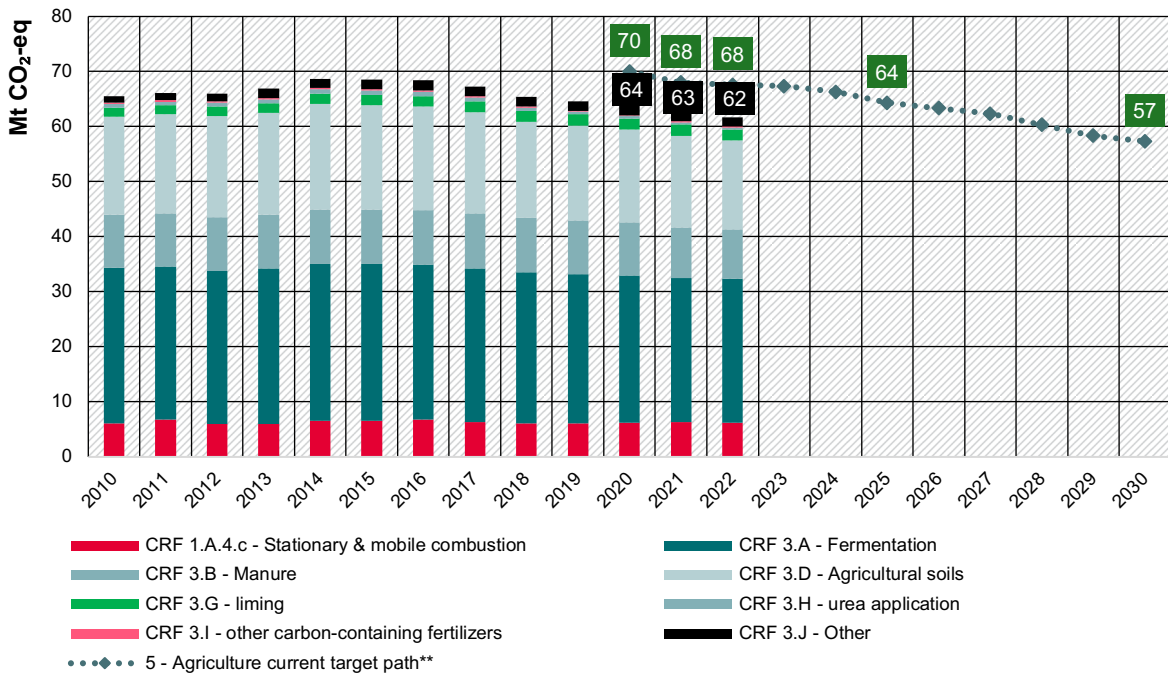


Fuente: CLEVER (2023)

3.1 AFOLU: Agricultura, Silvicultura, uso de tierra

En Alemania, el sector AFOLU constituye solo el 8% o 62 de las 762 Mt CO₂eq totales a las emisiones GEI (Fig. 2), en comparación a los 59% y 179 Mt CO₂eq en Colombia. La diferencia principal es que en Alemania no hay cambios significativos en el uso de la tierra, los que constituyen una gran parte de las emisiones en Colombia. La Fig. 24 muestra las emisiones AFOLU por categorías CRF (UNFCCC). Las emisiones más altas son de fermentación entérica (26 Mt vs. 42 Mt en Colombia), seguido por suelos (16 Mt). Por esta razón los esfuerzos de la transición energética en Alemania se enfocan más en el sector de energía. De todos modos, las emisiones significativas en el sector AFOLU requieren estrategias políticas. El ministerio de nutrición y agricultura se enfoca en 10 ejes: Reducción de emisiones de nitrógeno y amoníaco, fomento de la fermentación de estiércol y residuos agrícolas y eco-agricultura, reducción de emisiones de la cría de animales, eficiencia energética, mejoramiento de suelos y conservación de humedales, gestión sostenible forestal, y nutrición sostenible (BMEL, 2022). Los retos principales son el consumo elevado de carnes y las consecuentes emisiones de la cría de animales por fermentación entérica y de estiércol, y las emisiones de suelos que incluye la necesidad de la protección y restitución de humedales.

Fig. 24: Emisiones de AFOLU según categoría CRF y metas de la ley de mitigación climática



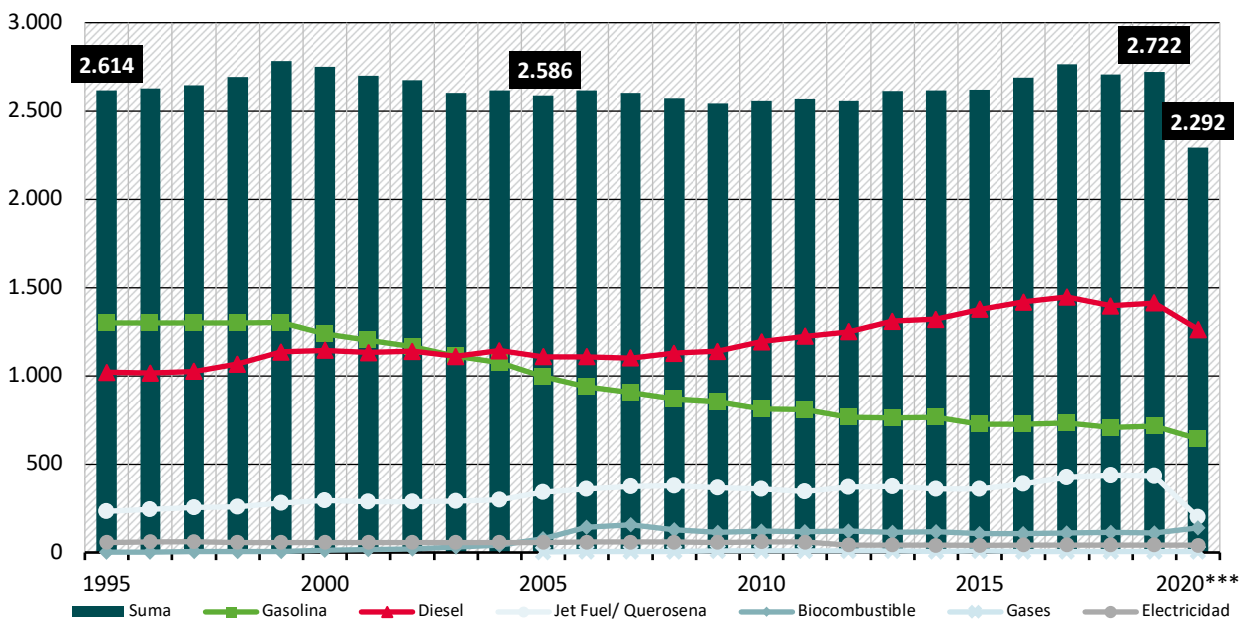
Fuente de datos: Umweltbundesamt (2023a, p. Daten Sektorgrafik)

** camino meta sectoral de la ley para la mitigación climática (Klimaschutzgesetz)

3.2 Transporte

El sector de transporte contribuye 19% de las emisiones GEI, 148 Mt CO₂eq – 4 veces más que los 37 Mt en Colombia. Las emisiones provienen como en Colombia mayormente de la combustión de líquidos fósiles (incentivos tributarios han favorecido el uso de diésel sobre la gasolina desde 2000), la electricidad juega todavía un rol menor, especialmente la utilizada para los ferrocarriles (Fig. 25).

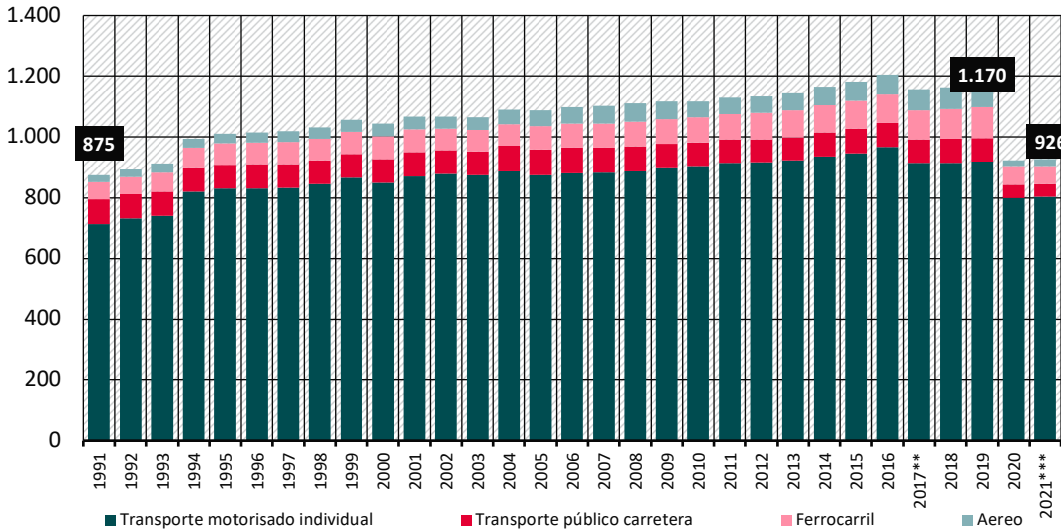
Fig. 25: Consumo energético en el sector transporte por fuente de energía (PJ)



Fuente: Umweltbundesamt (2023b)

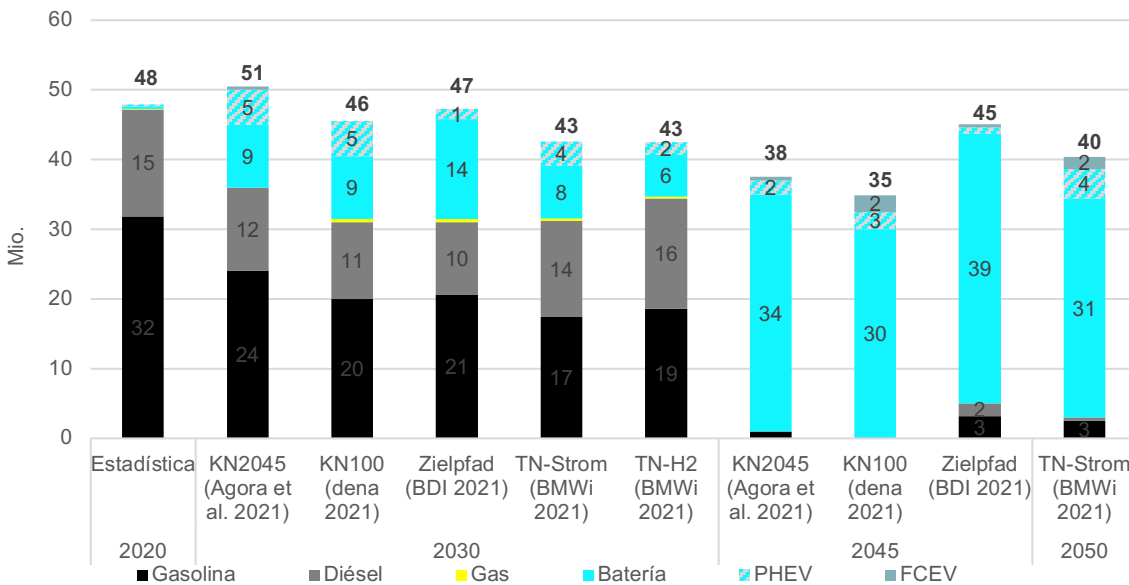
Igual que en Colombia, la descarbonización del sector transporte es un reto, pues el 80% de los km (PKM) se viajan en vehículo individual y los restantes 20% se distribuyen entre transportes públicos en carretera, ferroviario y aéreo (Fig. 26). Las estrategias de políticas se enfocan por un lado en impulsar el transporte público y por otro cambiar el sector automóvil hacia motores eléctricos.

Fig. 26: Km viajado (personas) por modo de transporte (bn PKM)



Fuente de datos: Umweltbundesamt (2023c)

Fig. 27: Parque vehicular por tipo de motor en escenarios principales

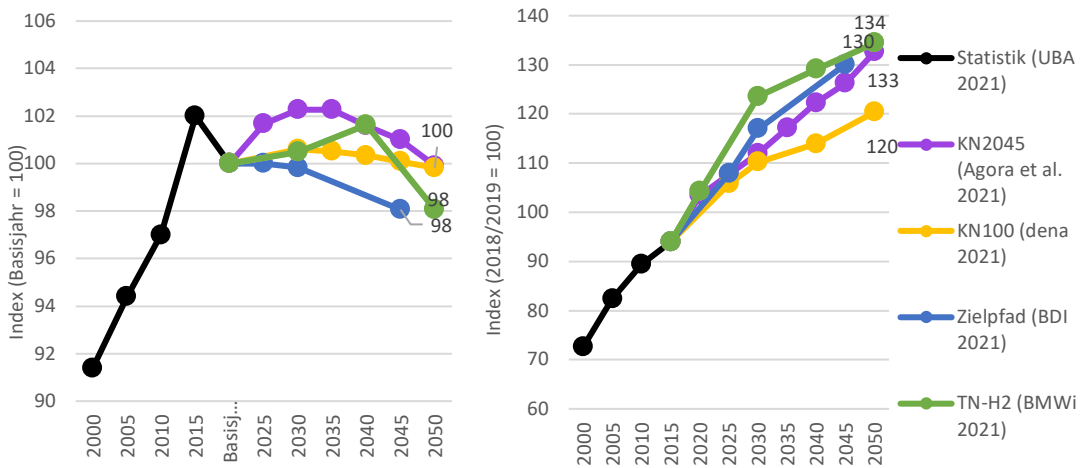


Fuente de datos: SCI4climate.NRW (2022)

La industria automóvil alemana como principal industria nacional ya se está preparando para este cambio tecnológico fundamental. Todas las marcas, mientras mantienen los automóviles fósiles en venta, están girando hacia productos eléctricos con batería (BEV). Al mismo tiempo sigue una tendencia hacia vehículos de mayor peso y tamaño. Según las directivas de la Unión Europea (UE) actuales (EU 2019/631), nuevos vehículos de combustibles fósiles no se podrán vender en la UE. Esto implica que a más tardar desde 2035 los restantes vehículos combustibles van a disminuir rápidamente y cambiarse por eléctricos (posiblemente con un porcentaje menor de hidrógeno, biogas

o synfuels, Fig. 27), lo cual implica un cambio en fuentes de energía que empezará en la década 2020 y terminará en la década 2040. Los escenarios principales para Alemania hacia la neutralidad en emisiones GEI proyectan una estabilización o hasta leve reducción en el volumen de transporte de pasajeros (Fig. 28).

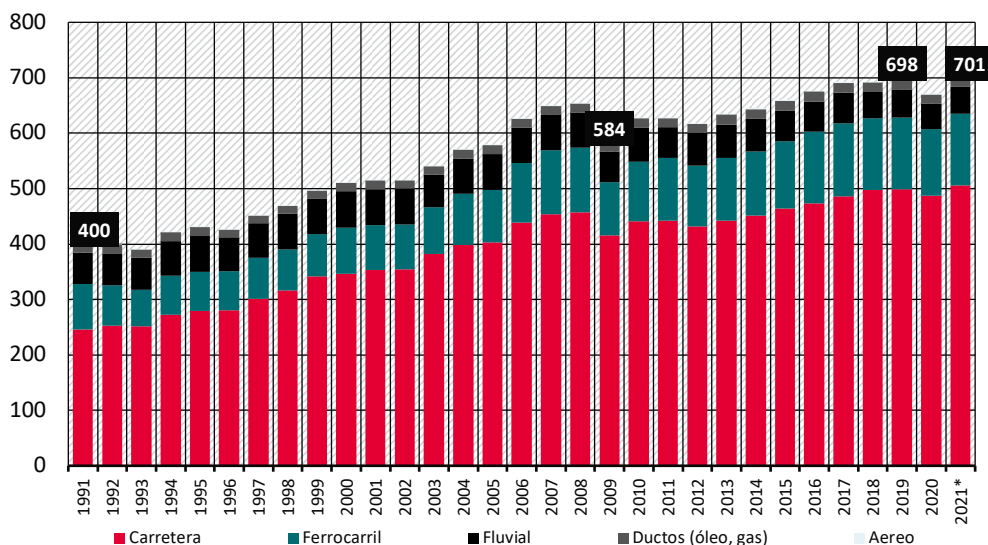
Fig. 28: Proyecciones de demanda de transporte (PKM pasajeros izq. y TKM carga der., escenarios principales)



Fuente de datos: SCI4climate.NRW (2022)

Con una economía creciente, el volumen de carga se ha casi duplicado desde 1990. Ese aumento se ha suplido casi completamente con transporte de carretera y en 2021 el 66% de la carga fue transportada por carretera y con combustibles fósiles (Fig. 29). A 2050, los escenarios proyectan con una economía creciente, un volumen adicional de carga de 20 a 35% (Fig. 28) dependiendo del escenario con un leve cambio hacia los modos eficientes (*modal split* ferrocarril y fluvial) y un giro hacia tecnologías de electrificación por batería, hidrogeno o línea aérea de contacto. Algunos escenarios proyectan también el uso de *biofuels* o *PtX/synfuels*.

Fig. 29: Carga transportada por modo de transporte (bn TKM)

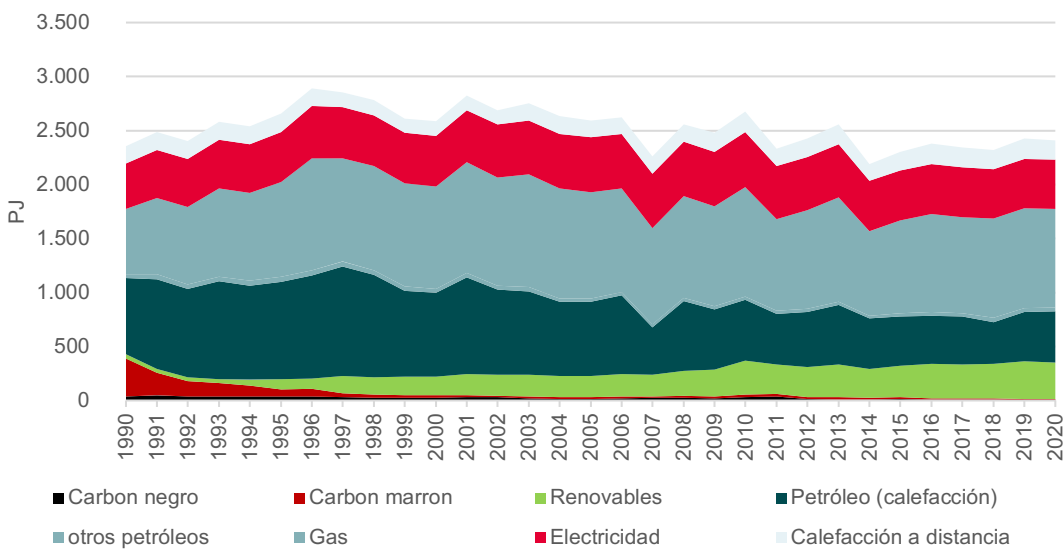


Fuente de datos: Umweltbundesamt (2023c)

3.3 Residencial

En el sector residencial ha habido ciertos avances en reducción de emisiones GEI por medio de aumento de eficiencia: el uso de carbón como fuente para la calefacción se eliminó prácticamente, y había cierto giro de petróleo hacia el gas natural (Fig. 30). El consumo total a cambio no ha disminuido significativamente a pesar de importantes avances en eficiencia por medio de aislamiento con estándares altos. Esto es consecuencia del incremento de área per cápita que sigue aumentando. Una razón importante es que personas mayores siguen viviendo en casas grandes después de la salida de hijos, y familias que construyen casas adicionales, lo que aumenta al área total con calefacción (Bayern Labo, 2020).

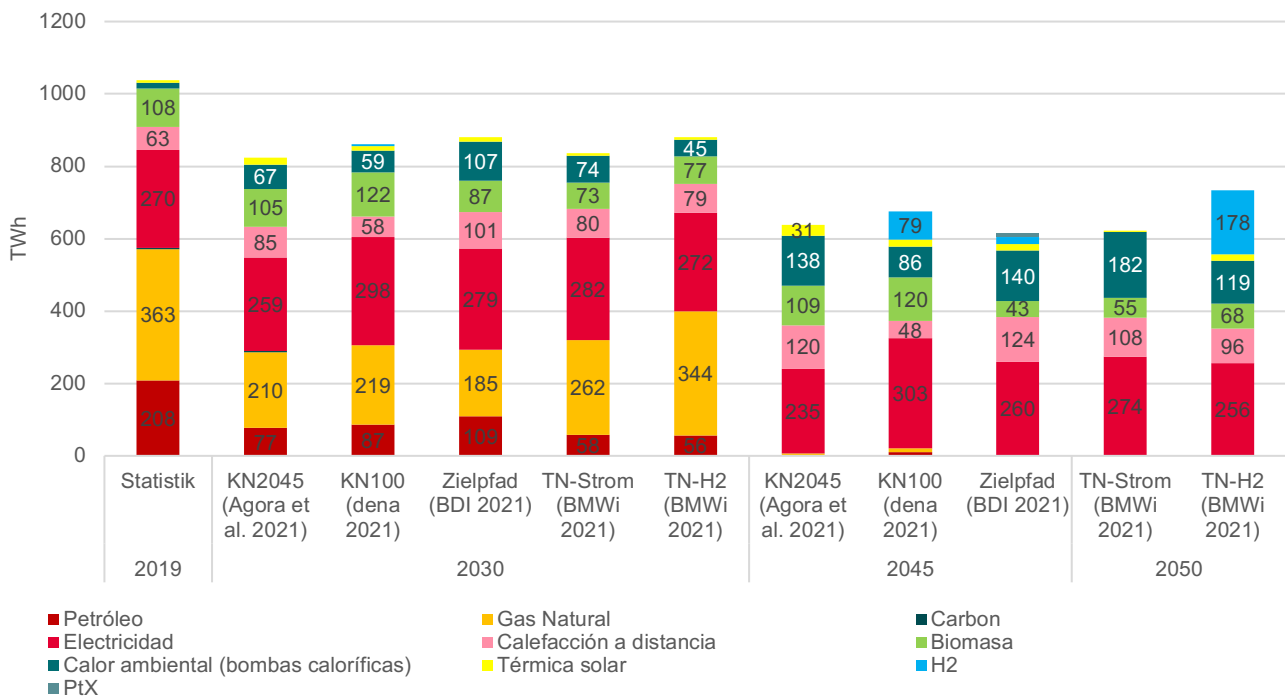
Fig. 30: Consumo residencial de energía por fuentes



Fuente de datos: BMWK (2023c)

Las estrategias políticas actuales se concentran en aumentar la tasa de renovación/aislamiento (importante directiva de la UE: Energy Performance of Buildings Directive; actualmente en afiliación: COM(2021) 802 final) y cambio de tecnologías para la calefacción. En esta línea, se busca reemplazar primero la calefacción a petróleo y también los de gas natural. Según la actualización de la ley de edificaciones (Gebäudeenergiegesetz, GEG (BMWK, 2023a)), cada sistema de calefacción tiene que utilizar >65% de energía renovable. Esto reduce el rol de la calefacción a gas o petróleo a una parte subsidiaria. Así también los escenarios proyectan un incremento de uso de electricidad para la calefacción mediante bombas caloríficas que utilizan calor ambiental, mientras se reducen otros usos de electricidad (Fig. 31).

Fig. 31: Proyecciones del consumo residencial por fuentes en escenarios principales (energía final)



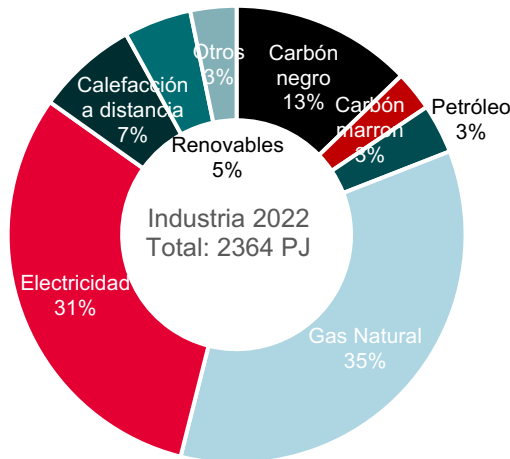
Fuente de datos: *SCI4climate.NRW (2022)*

3.4 Industria

La industria es el segundo sector más grande en emisiones en Alemania (181 Mt CO₂eq vs. 26 Mt en Colombia) después de la generación de electricidad. Las emisiones provienen mayormente de la combustión de gas natural en múltiples usos industriales (especialmente hornos de alta temperatura, mediana y baja) y del carbón que se utiliza especialmente en la industria metalúrgica. La descarbonización de este sector será clave para la transición energética en Alemania, pues juega un papel central en la economía, el empleo y sociedad.

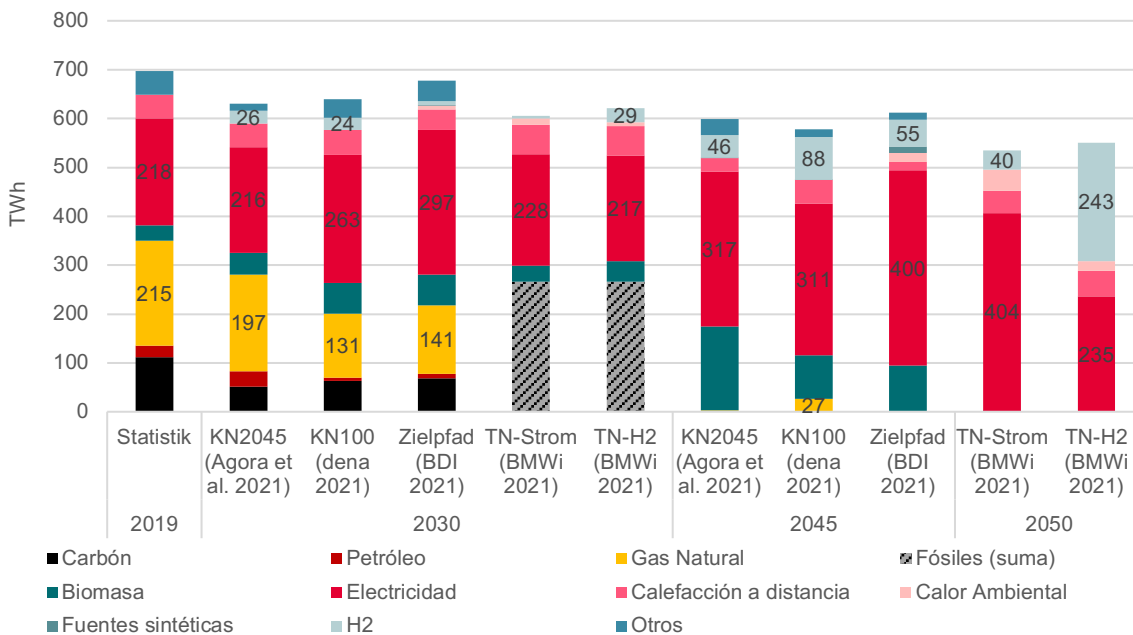
Ya están en marcha estrategias políticas y procesos integrativos con las asociaciones industriales principales alrededor de la implementación de acciones para descarbonizar los procesos industriales. Las vías principales estudiados incluyen la electrificación directa de procesos donde es posible, y donde no un giro hacia el uso de hidrógeno o biomasa (Fig. 33).

Fig. 32: Consumo de energía por fuente en el sector de industria



Fuente de datos: BMWK (2023c)

Fig. 33: Proyección de consumo energético final en principales escenarios



Fuente de datos: SCI4climate.NRW (2022)

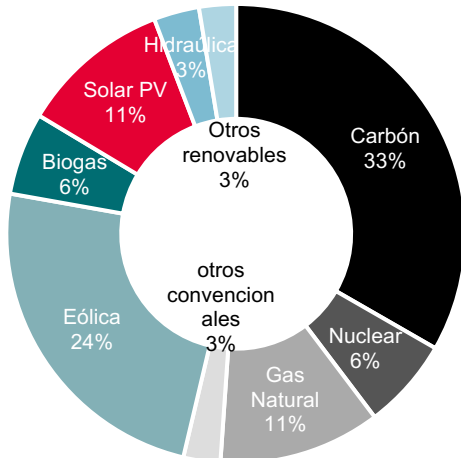
3.5 Generación de electricidad

Como principal diferencia con el sistema energético colombiano, la generación de electricidad es el principal sector de emisiones GEI en Alemania con el 33% o 247 Mt CO₂eq, casi alcanzando niveles totales de Colombia. El sistema eléctrico alemán ya realizó una transición profunda: de un sistema con >35% de energía nuclear a su reemplazo por energías renovables. En abril de 2023 se cerraron las últimas 3 plantas nucleares, después de décadas de discusión política y un acuerdo interpartidario con la industria. Como resultado, en 2022 la generación de electricidad procedía la mitad de fuentes fósiles (carbón y gas natural) y la otra mitad de renovables (eólica, solar, biogas e hidráulica) (Fig. 34). En contraste con Colombia, las hidroeléctricas no tienen potencial de expansión.

El reto principal es la rápida descarbonización de los sectores fósiles restantes. El primer enfoque del gobierno incluye una eliminación gradual del carbón, empezando con las plantas más ineficientes, en

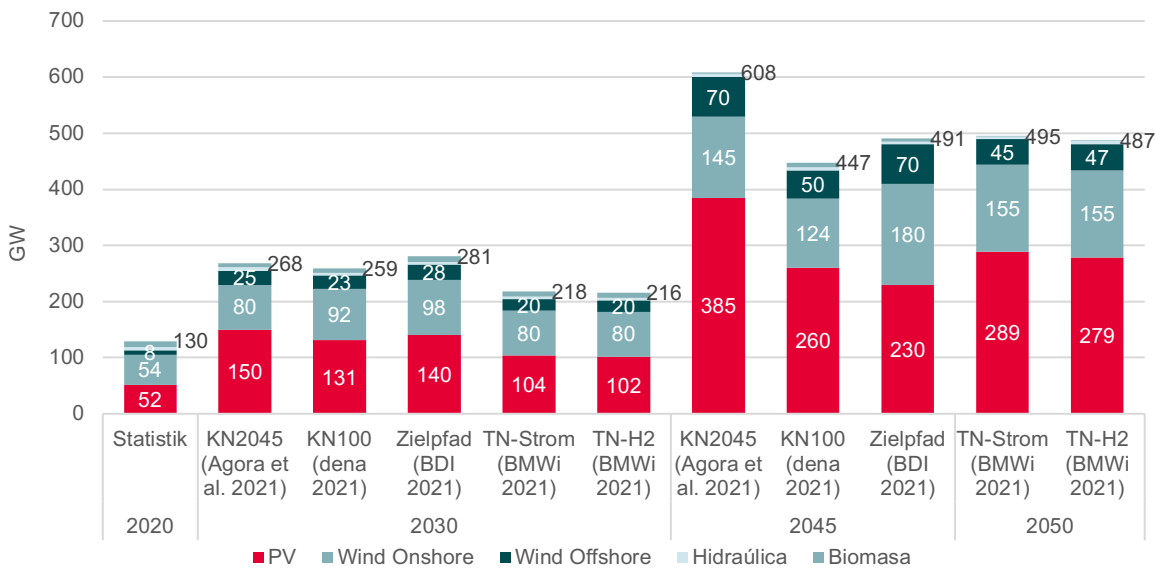
el sentido propuesto por Flechas Mejía (2022) para Colombia. En Alemania, esto es ley con el cierre de la última planta de carbón en 2038 (Kohleausstiegsgesetz, 2020), pero el gobierno aboga por un cierre posiblemente hasta 2030 (BMWK, 2022). El enfoque está sujeto a múltiples revisiones en el marco legal por la rápida expansión de la energía eólica y solar. Esto se ve reflejado en las proyecciones de capacidades renovables instaladas en los escenarios principales (Fig. 35) y la proyectada generación de electricidad (Fig. 36).

Fig. 34: Generación de electricidad por tecnología/ fuentes energéticas 2022



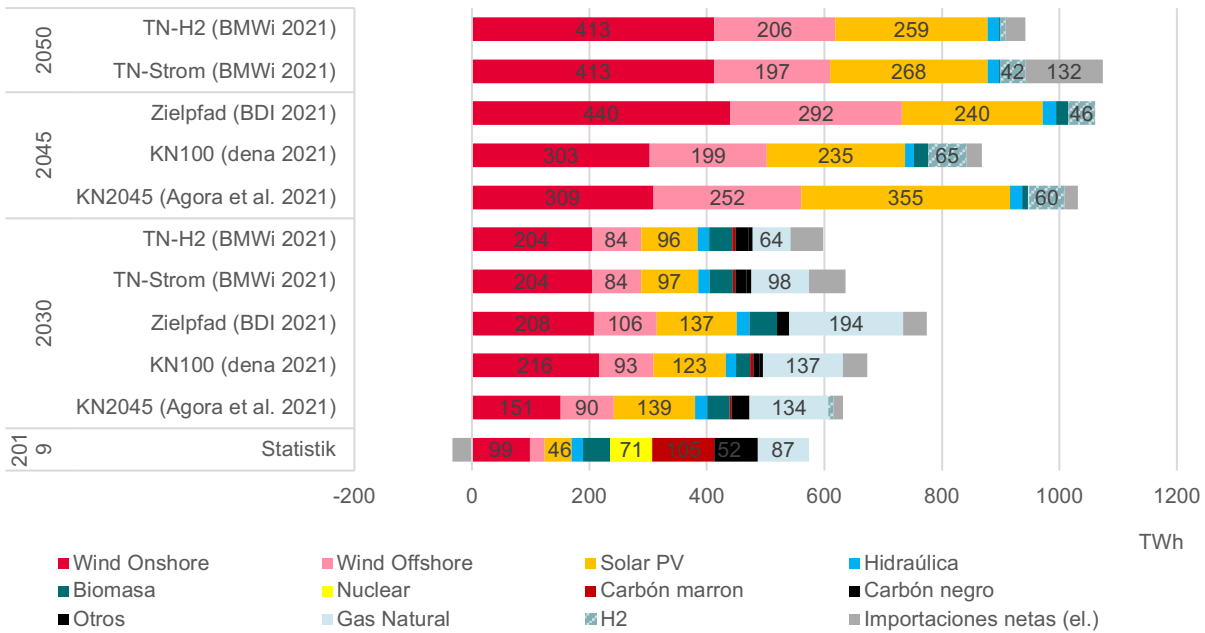
Fuente de Datos: Destatis (2023a)

Fig. 35: Proyecciones de capacidades de energías renovables instaladas en principales escenarios



Fuente de datos: SCI4climate.NRW (2022)

Fig. 36: Proyecciones de generación de electricidad por fuentes de energía en principales escenarios

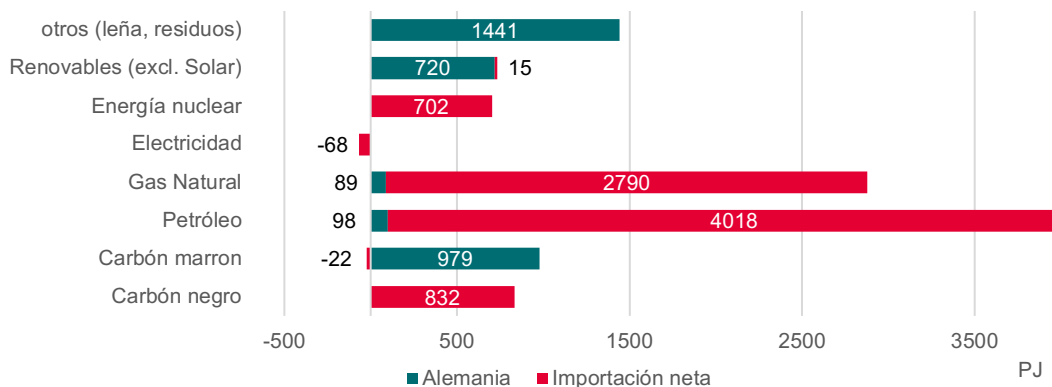


Fuente de datos: SCI4climate.NRW (2022)

3.6 Importación/exportación de fuentes energéticas

Alemania, con una población de 80 millones de habitantes (Colombia: 51.5 millones.), altas cifras de vehículos (48 Mio. Vs. 7 en Colombia), un sector residencial que requiere mucha energía en calefacción, una industria intensiva en consumo de energía y un sistema eléctrico todavía basado 50% en energías fósiles, tiene solamente recursos fósiles significativos en carbón marrón (las últimas minas subterráneas de carbón negro se cerraron en 2018 por razones de baja competitividad). Otras fuentes domésticas son exclusivamente renovables (incl. leña, residuos, viento, solar). Con la demanda de energía total tan alta, y la oferta restringida no se puede autoabastecer, especialmente no con petróleo, gas y carbón (Fig. 37).

Fig. 37: Generación de energía primaria en Alemania e importación neta (PJ)



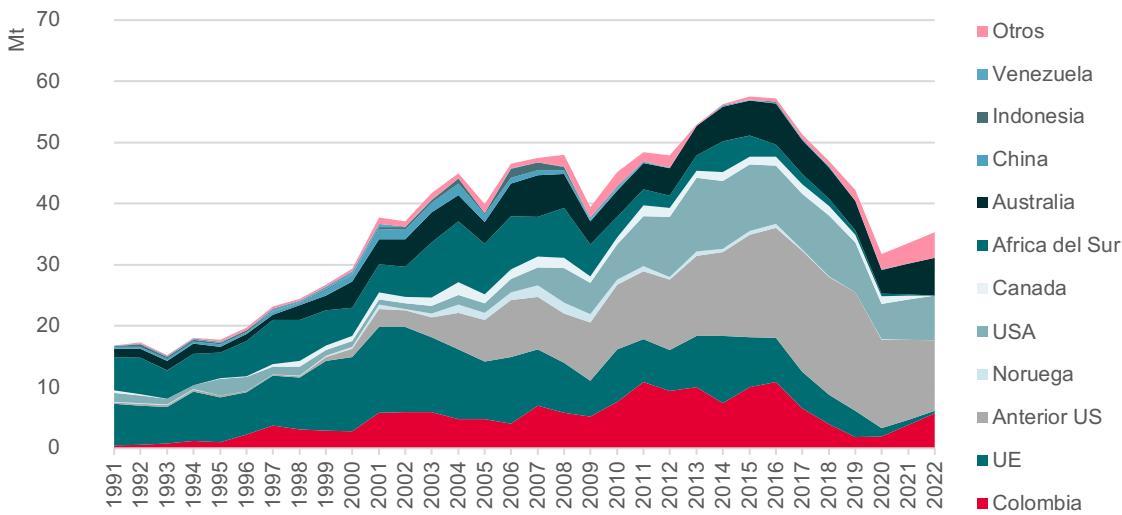
Fuente de datos: BMWK (2023c)

Alemania es uno de los países principales destinos del carbón de exportación de Colombia. La importación de carbón a Alemania se ha incrementado con el cierre de las minas de carbón negro en Alemania, con Rusia y EE.UU siendo los principales proveedores. Colombia estaba siempre en la lista

de países proveedores, y especialmente con la guerra contra Ucrania, el carbón colombiano sirvió para sustituir cantidades significativas de proveniencia rusa (Fig. 38). Con la eliminación gradual del carbón para la generación de electricidad hasta más tardar 2038 y posiblemente 2030, la demanda de importación va a disminuir drásticamente. El uso industrial va a disminuir también, pero finalizando probablemente en la década 2040. Una tendencia similar está prevista para la importación de gas natural y petróleo.

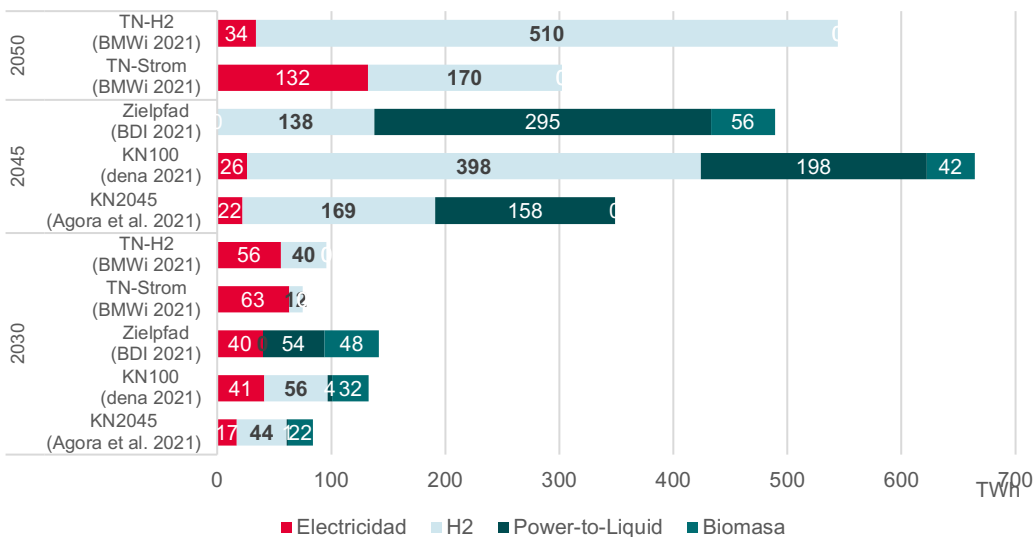
No obstante, la expansión masiva de fuentes renovables en Alemania, la generación/producción está proyectada de no poder suplir la alta demanda. Así, el país requeriría importaciones energéticas también en un futuro descarbonizado. Los escenarios principales proyectan cantidades grandes entre 300 y >600 TWh de importaciones en 2050 para un sistema completamente descarbonizado. Las cantidades y fuentes de energía en los escenarios divergen según el enfoque: el hidrógeno seguramente jugará un rol importante, posiblemente también derivados y biomasa (Fig. 39).

Fig. 38: Importaciones de carbón por país de origen



Fuente de datos: BMWK (2023c), Destatis (2023b)

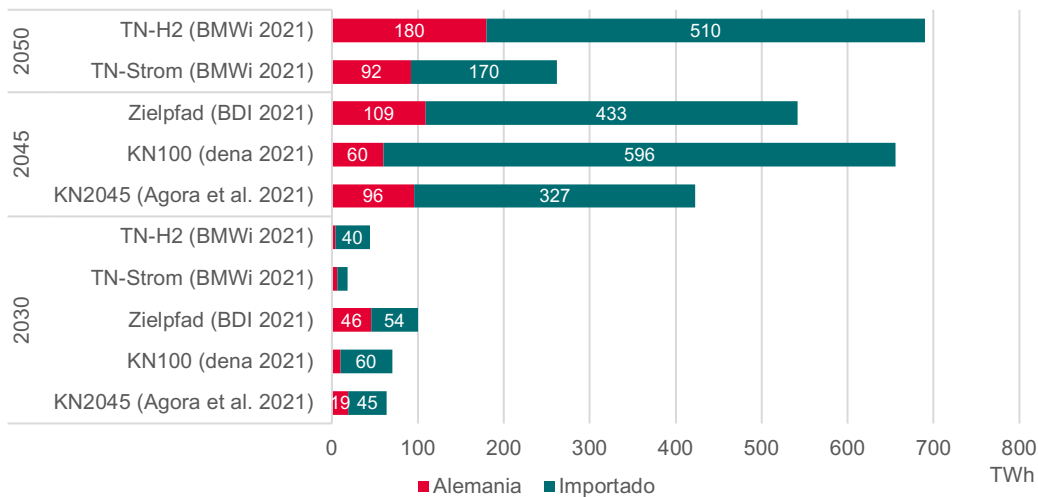
Fig. 39: Importaciones energéticas netas proyectadas en escenarios principales 2021-2050



Fuente de datos: SCI4climate.NRW (2022)

Revisando con más detalle el uso y proveniencia del hidrógeno y sus derivados en el sistema descarbonizado alemán, los escenarios muestran que cantidades significativas se producirán dentro del país, pero en un futuro descarbonizado, posiblemente entre 170 y 600 TWh/a se tendrían que importar (Fig. 40).

Fig. 40: Vectores PtX por origen (doméstico/importado)



Fuente de datos: *SCI4climate.NRW (2022)*

Esta sinopsis de solo un país de la UE demuestra el enorme potencial de demanda del hidrógeno y sus derivados que se puede desarrollar hacia mediados del siglo. Frente a estos escenarios y poniendo en marcha la implementación del gobierno alemán como lo están haciendo otros países, la cooperación internacional alemana (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, GIZ) promueve mundialmente el conocimiento, proyectos, cooperación estatal e industrial (en Latinoamérica por ejemplo H2LAC o *Hidrógeno Colombia*), la iniciativa H2Global de la GIZ dispone de 900 M€ para cubrir diferencias entre costos de generación e ingresos para impulsar el mercado de hidrógeno todavía en fase de implementación, y los bancos de desarrollo están invirtiendo líneas crediticias dedicadas.

4 Narrativas de la transición energética

4.1 Colombia

Las estrategias descritas en la sección 2 para la transición energética en Colombia reflejan la confluencia de dos narrativas dominantes de la transición energética: la narrativa de la descarbonización y la del imperativo económico, que se suman a la estrategia de reducción de la deforestación como principal fuente de emisiones de GEI. Con la entrada del gobierno de Petro 2022 se buscó posicionar la narrativa de la transición energética justa, que ha perdido fuerza a medida que se consolidan las hojas de ruta (i-deals & Montoya & Asociados, 2021; World Bank et al., 2022) y el Plan Nacional de Desarrollo (Gobierno de Colombia, 2022). Entre los movimientos sociales y organizaciones de la sociedad civil hay una narrativa contrahegemónica que busca ampliar y profundizar el significado de la transición energética justa, y esboza propuestas de transformación sistémica de la alimentación, el transporte, el cuidado, pero también de las políticas públicas y la democracia.

4.1.1 Descarbonización por adición de fuentes de energía renovable

La narrativa de la descarbonización se basa en las premisas de que es viable reemplazar las tecnologías de altas emisiones por tecnologías bajas en carbono para todo el mundo y de que este reemplazo hará posible detener el calentamiento global. Esta narrativa, asociada con la narrativa científica del Antropoceno, no considera los límites físicos de los minerales requeridos para las tecnologías bajas en carbono, ni cuestiona las macroestructuras sociopolíticas de extracción, producción y consumo del sistema capitalista global que son la causa de las injusticias ambientales y climáticas. Aun así, ha sido adoptada sin mayores cuestionamientos por el Estado colombiano y los sectores productivos. El vehículo principal de difusión de la narrativa de la descarbonización ha sido el sistema de objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, que plantea la viabilidad de mantener un crecimiento económico del 3% anual (objetivo 8), proveyendo de fuentes de energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos (objetivo 7), y adoptando medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (objetivo 13). Esta narrativa se evidencia en los planes para el desarrollo de nuevas fuentes de energía que no reemplazan fuentes existentes, sino que se añaden a la matriz energética, como se evidencia en la sección 2. En los escenarios planteados para Colombia, la descarbonización ocurrirá de forma gradual pero no total, pues se proyecta un crecimiento significativo del uso de energías tanto renovables como convencionales por lo menos hasta la primera mitad del presente siglo. Es decir, la forma como se interpreta la descarbonización es como la ampliación de fuentes de energía para incluir las renovables, pero sin que haya ningún tipo de sustitución de las energías convencionales por las renovables.

La descarbonización también se ha interpretado como el abandono del carbón térmico, pero tampoco como un propósito serio, pues las proyecciones nacionales mantienen la explotación de carbón hasta por otras cinco décadas (Monsalve, 2022). La prohibición de la expansión de la frontera carbonífera, que había sido una promesa de la campaña de Petro y que fue incorporada en el PND, fue eliminada en el primer debate en el Congreso (sección 2.6). De esta forma, la narrativa de la transición energética como descarbonización en Colombia, está clara en sus razones, pero no se ha incorporado a las políticas públicas ni a la intención del sector extractivo. Ni siquiera la perspectiva de quedarse con infraestructura construida para la explotación y comercialización de carbón parece disuadir al Estado ni al sector privado de la necesidad de abandonar la fuente más contaminante de energía eléctrica. Es posible que los activos varados sean un temor para los países del Norte Global, pero que el mercado del carbón se esté desplazando a los países que no son energéticamente autosuficientes o que, como Colombia, no proyectan un abandono cercano de los combustibles fósiles. Desde 2016, Turquía es el principal comprador del carbón colombiano (Cardoso & Ethemcan, 2018). Los planes de construcción de nuevas plantas térmicas hasta el año 2050, reflejan que la narrativa de la descarbonización tiene una interpretación bastante holgada.

4.1.2 El imperativo económico extractivista

Bajo esta premisa, los países que como Colombia tienen una fuerte dependencia de las exportaciones de energía fósil (sección 2.7) y que no han sido responsables de la mayor parte de las emisiones históricas de GEI, deben seguir sacando provecho de los mercados internacionales, especialmente en las coyunturas de precios altos como las generadas por el conflicto en Ucrania. Esta ha sido la postura de varios analistas que favorecen las nuevas exploraciones con el argumento de la alta dependencia fiscal y de divisas por las exportaciones de combustibles fósiles.

Por otro lado, el sector minero percibe la transición energética como una nueva frontera extractivista, esta vez vestida de descarbonización de las economías del mundo y de mitigación del cambio climático. El presidente Petro en varias presentaciones y reuniones que ha tenido en el 2023 en escenarios

internacionales, ha mencionado las grandes oportunidades que tiene América Latina de convertirse en la fuente de energías limpias para el mundo, con base en su potencial minero, solar y eólico. La transición energética se ha formulado como una nueva fase de la minería para fines nobles asociados con un futuro sustentable. La mala prensa que ha tenido el sector minero por los impactos sociales y ambientales y la violencia que ha dejado en los territorios, ha encontrado en la transición energética una forma de expiar sus culpas, mediante el discurso de la minería verde, sostenible y responsable. La región Caribe, con su potencial eólico y solar se proyecta en las narrativas del Estado y de las empresas, como una región promisoría para ofrecer energía al mundo, dejando de lado los pasivos ambientales que ha dejado el carbón. En la sección 5 analizamos el potencial para la exportación de energías verdes y los desafíos en más detalle.

4.1.3 Transición energética justa

Esta perspectiva es quizás la que más interpretaciones tiene. En Colombia, la hoja de ruta de la transición energética justa (Minenergía, 2022a) destaca la necesidad de ampliar el consumo de energía a poblaciones que históricamente han estado desconectadas de la red eléctrica o que tienen acceso precario a las fuentes de energía, y visibiliza los impactos históricos que han sufrido los pueblos y territorios de donde se extrae la energía en el país. Países como Chile, Bolivia y Argentina, con unas grandes reservas de litio, se perfilan como los proveedores de la materia prima para los vehículos eléctricos del mundo, pero al mismo tiempo como nuevas zonas de sacrificio ambiental (Zografos & Robbins, 2020). Y países como México y Colombia con su potencial solar y eólico podrían estar en la senda de proyectos etnocidas y ecocidas (Dunlap, 2018). De esta forma la transición energética podría llegar a implicar una nueva ola de extractivismo aún más agresiva que las anteriores (Alarcón et al., 2022) por la urgencia de descarbonizar y la escala a la que se extraen los minerales de la transición y se instalan parques enormes de energías limpias. Una segunda perspectiva de gran relevancia para los trabajadores del sector minero energético se refiere a la atención a los empleos que desaparecerán con la extracción de combustibles fósiles, especialmente en la región Caribe.

A la escala global, se hace la distinción entre los países del Norte Global como los históricamente responsables del calentamiento por haber emitido la mayor proporción de GEI, y los países con una reducida huella de carbono, que por lo general son los que también son más vulnerables a sufrir los impactos por el cambio climático. Frente a este desequilibrio, una versión de la transición justa se plantea como que los países del Norte reduzcan sus emisiones para que los países con reservas puedan seguir la senda del desarrollo basado en los fósiles (ver el caso de Guyana).

Adicionalmente, y como se ha discutido en las COP derivando en la creación del Green Climate Fund en la COP15 de Copenhague en 2009, la transición justa desde la perspectiva de los países del Sur Global implica que los países históricamente emisores (que también son los países más ricos) contribuyan a financiar las medidas de adaptación y mitigación. El Green Climate Fund sin embargo, nunca ha alcanzado la meta de los 100 billones de dólares anuales que se estableció con su creación y opera primordialmente bajo esquemas financieros condicionados a los países del Sur y que generen oportunidades de negocios a los países financiadores (<https://www.greenclimate.fund/>). La narrativa de la transición energética justa a través de mecanismos financieros también ha sido usada por el presidente Petro en escenarios internacionales cuando sugiere cambiar deuda por acción climática, aún sin mucha claridad sobre la forma en que operaría.

Una versión de la transición energética justa que viene siendo impulsada por las comunidades energéticas y organizaciones de la sociedad civil, propone una reconfiguración del sistema energético para reducir las dependencias de los grandes sistemas centralizados, que por su tamaño son vulnerables a los desastres asociados con el cambio climático. Esta propuesta se basa en conceptos como la autonomía, la democracia y la insurgencia energética como una forma de autogestión

comunitaria para la autosuficiencia energética con afirmación cultural y responsabilidad ecológica (Massol Deyá, 2018).

4.2 Alemania

En las narrativas de cómo una transición energética podría implementarse en Alemania existen tantos enfoques y elementos como número de autores. En un estudio de narrativas se analizaron docenas de elementos, narrativas sectoriales y otros enfoques (Umweltbundesamt, 2021). Esta sección sintetiza tres narrativas de tipo ideal que incluyen múltiples (y a veces contradictorias) narrativas. Cada narrativa incluye una síntesis de la propuesta, breve descripción de protagonistas y de las implicaciones que podría tener para el Sur Global.

4.2.1 La solución tecnológica

La solución tecnológica es la narrativa dominante en Alemania. Esta narrativa se enfoca en soluciones tecnológicas para todos los sectores. Como fue descrito en las secciones de análisis, prevé cambios tecnológicos profundos:

- *Transporte*: un cambio drástico hacia la electromovilidad en los motores de vehículos particulares (posiblemente complementado con hidrógeno y *synfuels*), en carga vial posiblemente con *fuel cell* y un despliegue de líneas aéreas de contacto. Incluye también una expansión de transporte ferroviario, lo cual requiere inversiones grandes en la infraestructura.
- *Industria*: la descarbonización de la industria se narra como cambios profundos en tecnologías hacia la electrificación, para procesos caloríficos complementados con fuentes de biomasa e hidrógeno, tanto para la industria manufacturera como la industria metalúrgica. Para emisiones de procesos (cemento etc.), se apunta a la aplicación de CCS.
- *Residencial*: En la calefacción de edificios la estrategia tecnológica es un cambio hacia bombas caloríficas que se conseguiría por medio de regulaciones e incentivos y que va a ser complementado con el mejoramiento de la eficiencia energética con aislamiento.
- *Electricidad*: Se planea un cambio fundamental del parque de plantas eléctricas. Primero, las plantas de carbón de eliminarían gradualmente hasta 2030 o a más tardar 2038, en la década siguiente también el uso del gas natural (posiblemente sustituyendo el gas en estas plantas por hidrógeno). Esto está planeado de acompañarse por una expansión masiva de plantas eólicas (*on-shore* y *off-shore*), y plantas solares. La expansión en capacidad es de un factor 3 a 7 del nivel 2020, dependiente del nivel de reducción en consumo y fracción de importación.
- *Importación*: La demanda que no se podrá suplir por generación nacional en 2045/50, se importará. Los escenarios divergen significativamente, la mayoría estima alrededor del 50% de demanda final suplida por importaciones, entre 500–1000 TWh/a, en fuentes de electricidad, hidrógeno o derivados.

Esta narrativa se reproduce desde los escenarios de consultoría (Wiese et al., 2022), en los medios y los foros políticos (BMWK, 2023b). Como es compatible con el modelo económico, y aunque significa inversiones estimado en billones de €, se ha radicado también en la industria. La industria pide marcos legales favorables para la transición y cada sector tienen exigencias específicas, pero no se oponen en general a la transición, como demuestran las asociaciones principales de la industria metalúrgica (WVMetalle, 2023), automóvil (VDA, 2023) o la industria en total (BDI, 2023). Con las principales empresas generadoras de electricidad se acordaron convenios y se implementó la ley de eliminación de plantas de carbón (Kohleausstiegsgesetz, 2020), en 2022 se cerró un acuerdo adicional de cerrar las minas de carbón marrón en el occidente de Alemania (departamento NRW).

La implementación de esta narrativa significaría cambios tecnológicos e inversiones grandes en Alemania. Al mismo tiempo, depende fundamentalmente de a) grandes cantidades de materias primas necesarias para las tecnologías, que en gran parte serían provenientes del Sur Global y b) importaciones a gran escala de energías limpias, también de países del Sur Global. Esto significa una externalización parcial de los impactos ecológicos y sociales que tiene la explotación de recursos naturales y generación de energía, en la literatura denotado como “green sacrifice zones” (Zografos & Robbins, 2020).

4.2.2 Necesidad de cambios fundamentales en economía y consumo

Un segundo conjunto de narrativas parte de un enfoque en los efectos adversos que la primera narrativa podría tener, tanto en el Sur Global como también en los países del Norte Global. Esas narrativas ven la vía tecnológica no compatible con los *planetary boundaries* y una transición justa. Contienen múltiples franjas, con enfoque en estructuras económicas y sociales o con enfoque a los individuos en una sociedad. A las narrativas estructurales se suman por ejemplo críticos al crecimiento económico que según ellos ha comprobado siempre conducir a un crecimiento en recursos y demanda energética. Por esto, se promueve un “post-growth” o “de-growth” (decrecimiento) en economía y consumo. Otras narrativas de cambios estructurales fundamentales se enfocan en una descentralización y en el bienestar de la economía.

Una multitud de narrativas existen alrededor de cambios en la visión y el comportamiento de los individuos (bottom up), con enfoques distintos: en modos de autocreación, -producción, reparación (incl. jardines urbanos, talleres de reparación, esquemas compartidos), en reducción voluntaria del consumo y reenfoque en “bienestar temporal” (trabajar menos, más comunidad).

Los protagonistas de estas narrativas en mayoría son activistas, muchas veces organizados en ONGs. Estas narrativas se concentran en ONGs ambientalistas y otros sectores sociales. La narrativa se comparte con una sección académica también que, por ejemplo, organiza conferencias transdisciplinarias (degrowth conference).

La implementación de una reestructuración de la economía y la sociedad sería fundamental y tendría como base principios como el solo uso sostenible de recursos locales, la no externalización de impactos adversos a otras comunidades o regiones globales, la reducción del consumo a niveles sostenibles, garantizando el bienestar de todos. Reduciría o eliminaría la demanda de recursos y energía de parte del Norte Global al Sur Global. La realización de estas narrativas parece poco probable y en la mayoría de los casos carecen de propuestas concretas de cómo se realizarían políticamente o estudios profundos que presenten escenarios realistas de implementación e impactos sobre la economía, la sociedad e instituciones del estado.

4.2.3 Combinar la tecnología con reducciones en consumo

Un tercer grupo de narrativas intenta combinar las primeras dos. Parte de elementos de las críticas del segundo conjunto como el análisis de recursos naturales limitados (en las diferentes regiones globales), el reconocimiento de impactos adversos también de energías renovables, la aproximación de un desarrollo justo (entre y al interior de los países), un enfoque en maximizar la autosuficiencia energética al nivel más subsidiario posible (también pero no solo para la seguridad energética). Por otro lado, estas narrativas reconocen la necesidad de implementar nuevas tecnologías en todos los sectores. En muchos casos, estas narrativas son escépticas de la implementación de ciertas tecnologías, porque todavía no existen o a costos muy inciertos o porque se consideran de alto riesgo o impacto negativo (por ejemplo, CCS, CCUS, DAC, energía de fusión nuclear, energía nuclear, eólica en zonas sensibles, posibilidad de importación de energía). Estas narrativas por ende son más conservadoras y menos optimistas en cuanto a la disponibilidad de soluciones tecnológicas, pero intentan sin embargo

crear escenarios realistas de descarbonización. Para esto, incluyen la mayor cantidad de impactos posibles, incluyen o discuten estrategias de reducción de consumo (suficiencia) y sus respectivas estrategias políticas.

Los protagonistas de estas narrativas provienen mayormente de la academia. Se inspiran muchas veces en los argumentos de los ONGs y los llevan a análisis científico y creación de escenarios. Como las narrativas incluyen elementos de reducción o limitación de consumo y producción, son poco conectables con discursos dominantes en los escenarios políticos e industriales. Sin embargo, han ganado cierta visibilidad (CLEVER, 2023; Ragwitz et al., 2023). Aunque no es tan radical como las narrativas del segundo grupo, la realización de un camino intermedio podría significativamente reducir la demanda de recursos y energía del Norte Global en su estrategia de transición energética y limitar los efectos adversos a los países en los que se busque la provisión.

5 Necesidad de Colombia de sustituir demanda nacional de fósiles y estimación de capacidad FCER requerida

5.1 Opciones de descarbonización

Para descarbonizar la matriz energética, las energías fósiles necesitan ser reemplazadas por otros vectores sin emisiones netas de carbono. Según sector y tipo de fuente requerida existen teóricamente una variedad de opciones. Las potenciales de cada fuente renovable se tienen que evaluar en el contexto nacional, con miras a evaluar los límites ambientales, sociales, territoriales y de recursos necesarios. Sustitutivos potenciales incluyen:

- Combustibles líquidos (esp. Transporte)
 - Biocombustibles (basado en aceites)
 - Etanol (basado por ejemplo en caña de azúcar)
 - Electricidad
 - combustibles sintéticos (derivados de electricidad/hidrógeno)
- Combustibles sólidos y gas en industria
 - Electrificación directa de procesos
 - Biomasa/biocombustibles sostenibles
 - Hidrógeno (derivados de electricidad/electrólisis)
- Gas en sector residencial (estufas)
 - Electrificación
 - Biogás
 - Biomasa (leña) en estufas
- Fósiles en plantas térmicas para generación eléctrica
 - Solar
 - Eólica
 - Geotermia
 - Biomasa

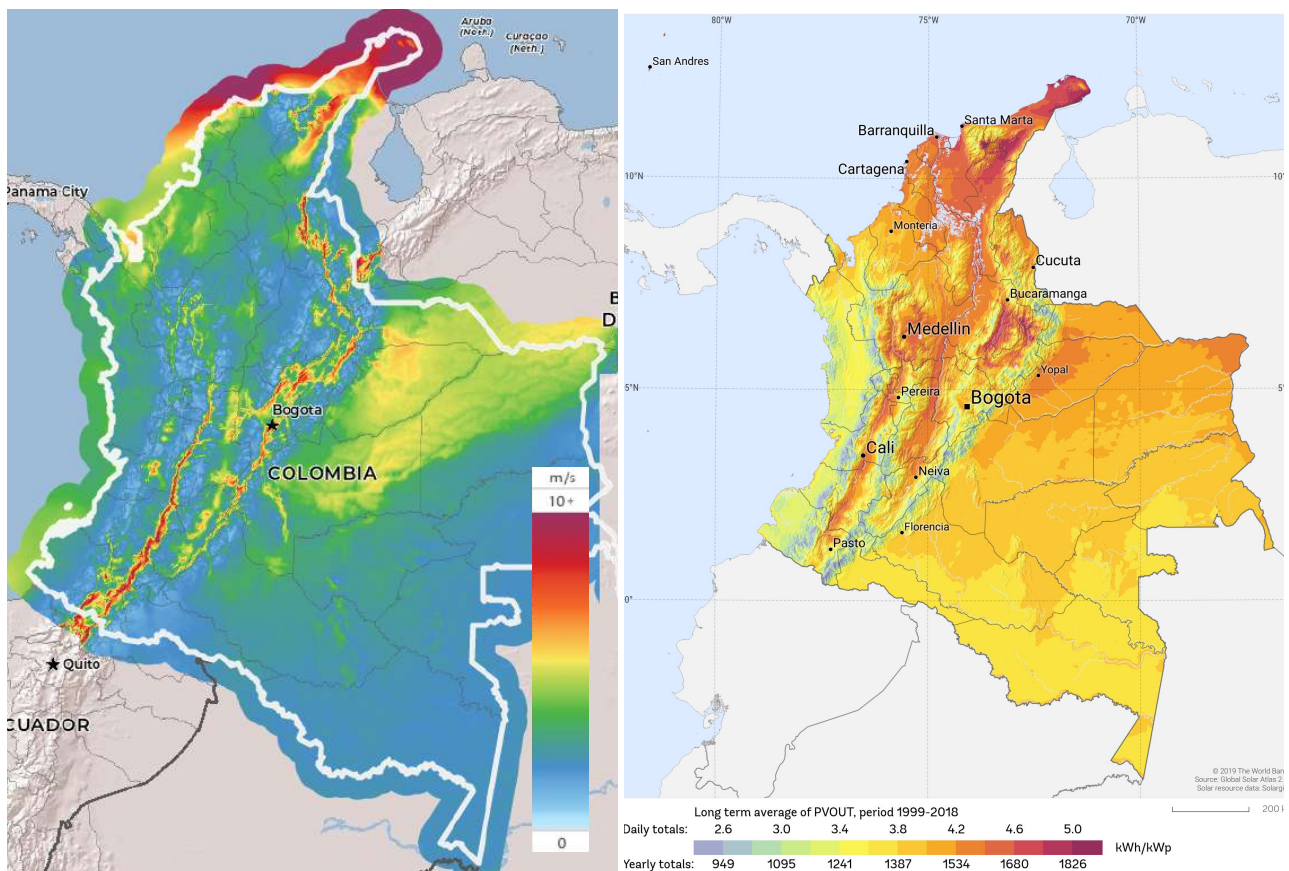
En Europa, donde no existe mucho potencial de expandir la producción sostenible de biomasa (especialmente para uso energético), queda como principal opción la electrificación directa de la mayoría los usos de energía, o como última opción, la importación mediante hidrógeno o derivados. La electrificación tiene la ventaja frente a una sustitución de fósiles por bioenergía que es más eficiente que los procesos de incineración (ejemplo: automóvil eléctrico vs. combustible). Consecuentemente la

electrificación evita gran parte de la ineficiencia energética de la quema de energías fósiles. Por otro lado, esta estrategia requiere una expansión masiva de la generación eléctrica.

5.2 Sitios, potenciales y desafíos de energía eólica y solar en Colombia

Los potenciales para la expansión de plantas eólicas o solares están concentrados en ciertas zonas. Para la eólica cuenta la velocidad de viento que típicamente es más alta en las costas. En Colombia, las zonas más adecuadas en este sentido se concentran tierra adentro en la Guajira, Cesar y en las cordilleras andinas. Costa afuera, las zonas con más velocidad de viento (m/s) están en toda la costa caribe (Fig. 41 izquierda).

Fig. 41: Potenciales de energía eólica (izq.) y solar (der.) en Colombia



Fuentes: DTU et al. (DTU et al., 2023), Solargis et al. (Solargis et al., 2023)²

La efectividad de los paneles solares depende de la irradiación solar. Las zonas más adecuadas para generar la mayor cantidad de energía (kWh/kWp) se concentran también en el norte del país, desde la Guajira y Cesar, pero incluyen los valles de los ríos Magdalena y Cauca, una zona grande al norte de la

² Cita completa como requerida por autores:

Eólica: map obtained from the Global Wind Atlas 3.0, a free, web-based application developed, owned and operated by the Technical University of Denmark (DTU). The Global Wind Atlas 3.0 is released in partnership with the World Bank Group, utilizing data provided by Vortex, using funding provided by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP).

For additional information: <https://globalwindatlas.info>

Solar: map obtained from the Global Solar Atlas 2.0, a free, web-based application is developed and operated by the company Solargis s.r.o. on behalf of the World Bank Group, utilizing Solargis data, with funding provided by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). For additional information: <https://globalsolaratlas.info>

capital (Boyacá/Santander) y el norte de los llanos orientales. (Fig. 41 derecha). Actualmente, las capacidades asignadas por la UPME siguen la distribución de estos potenciales (Fig. 17). Los grandes proyectos eólicos en vía de planeación o ejecución se encuentran en la zona indicada de la Guajira y el Caribe costa afuera.

No existe un estudio integral de todos los potenciales FNCER nacionales. Un primer estudio estimó el potencial eólico en la Guajira a 18 GW (World Bank, 2010), actualizado a 25 GW on-shore total en la Hoja de Ruta del Hidrógeno, complementado por 45 GW fotovoltaica (i-deals & Montoya & Asociados, 2021). Adicionalmente, la Hoja de Ruta de Energía Eólica costa afuera estima el potencial de esta tecnología a aproximadamente 50 GW. La suma FNCER asciende a un potencial técnico de 138 GW. Los proyectos eólicos tierra adentro y costa afuera en muchos casos generan discusión, conflicto y resistencia por varias razones. Una realización exitosa de proyectos es posible solamente con el consentimiento local y conflictos locales resueltos. En Colombia, la situación es especialmente delicada, porque la zona identificada con potencial más alto de eólica es territorio Wayúu. ONGs como Indepaz reportan “consultas previas amañadas y de tratos injustos” (Barney, 2021), fraccionamiento de comunidades y conflictos interétnicos resultantes. También reportan que la zona que históricamente ha sido abandonada por el estado, con una población vulnerable no se beneficia. La repartición y pertenencia de tierras según las tradiciones Wayúu no coincide con las formas de distribución por el Estado, generando conflictos (Barney, 2021).

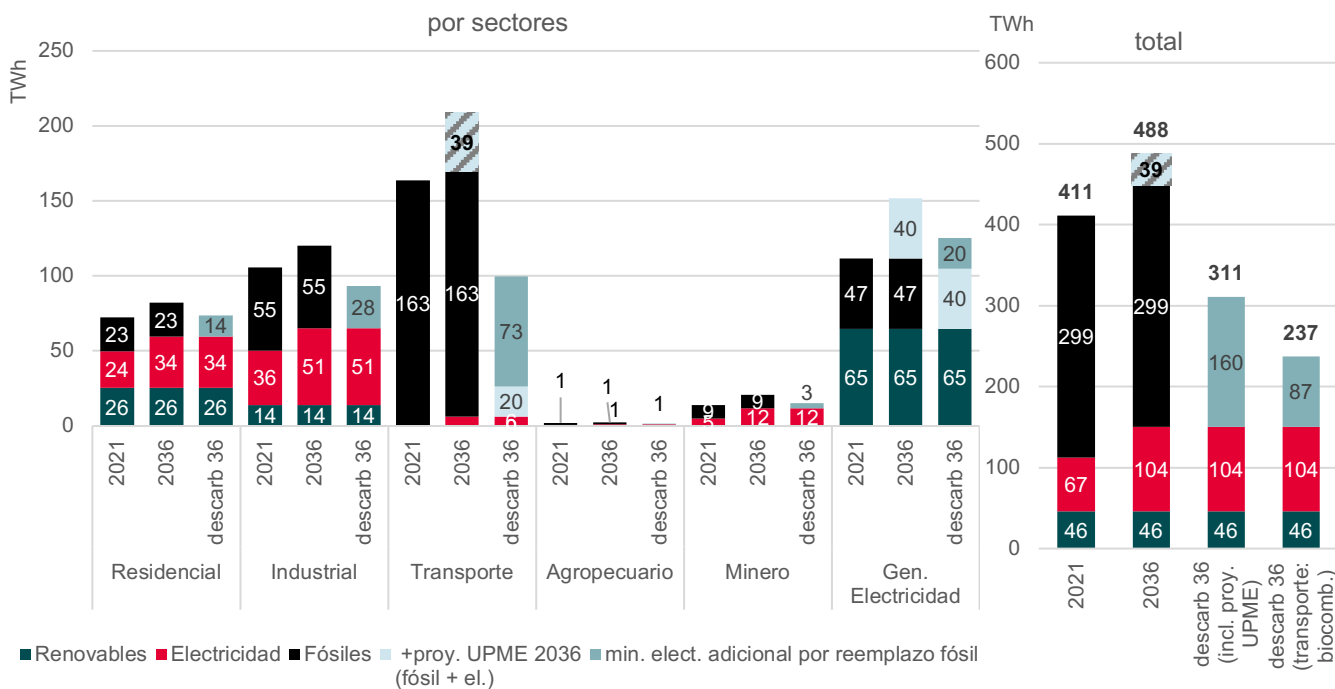
A la complejidad de la planeación y ejecución de proyectos se suman los desafíos de la corrupción, inseguridad, riesgos de impactos ecológicos y sobre el turismo, la falta de oportunidades para las comunidades locales. Una gestión y realización de proyectos en la Guajira tiene que encontrar formas de consultas previas y acuerdos justos, ordenados, y confiables para todos y conforme con las reglas de las comunidades. En caso contrario corren riesgo de perpetuar y profundizar las injusticias ambientales que han existido por la explotación de carbón por más de 30 años en el territorio. Por las razones listadas es incierto, cuánto del potencial técnico estimado sería posible de desarrollar.

5.3 Estimación de capacidad FNCER requerida para la descarbonización

Con base en el balance energético del año 2021 (UPME, 2023b) y las proyecciones de incremento de demanda de electricidad, gas y combustibles, la Fig. 42 (izq.) muestra la demanda por sectores y fuentes energéticas en el año 2021 (UPME, 2023b), y con los aumentos de demanda de combustibles y electricidad proyectados hasta 2036 por la UPME (UPME, 2022). Con supuestos muy conservadores con respecto a eficiencias tecnológicas, se estimó la cantidad adicional de electricidad requerida si se reemplaza la demanda fósil en 2036. La figura (izq.) muestra cifras por sectores, con el transporte como sector más grande en consumo y potencial demanda eléctrica adicional (73 TWh). Para cifras totales (der.), se calcularon dos escenarios hipotéticos: 1) sustitución de todos los fósiles exclusivamente por electricidad y 2) sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles (Gobierno de Colombia, 2021, p. 59). La demanda eléctrica total en 2021 fue 67 TWh, la proyección UPME la estima de 104 TWh hasta 2036 y otros 39 TWh adicionales en combustibles. Si en 2036, todos los fósiles fueran sustituidos por electricidad, esto aumentaría el consumo eléctrico por otros 160 TWh. La demanda eléctrica total sería un factor de 3,5 más alto que en 2021. En un escenario donde el sector de transporte se abastezca exclusivamente por biocombustibles, la demanda eléctrica sería 73 TWh menor, pero biocombustibles se tendrían que producir en una cantidad similar a los

combustibles fósiles de 163+39 TWh/a (comparación: producción total de bagazo 2021 estaba en 20 TWh).³

Fig. 42: Demanda nacional 2021/2036 y mínima generación eléctrica adicional requerida por sustitución de fósiles, por sectores (izq.) y total (der.)



Fuente de datos: UPME (2023b), calculaciones por autor.⁴

Nota: 2036 incluye incremento en demanda (UPME, 2022), descarb 36 incluye incremento de demanda eléctrica proyectada hasta 2036 (UPME, 2022) y la demanda adicional de electricidad para el reemplazo de demanda fósil en 2036. En el sector electricidad, “renovables” incluye hidroenergía y bagazo. En figura total, excl. hidroenergía. Descarb 36 incluye incremento de demanda eléctrica y fósiles sustituidos. Descarb 36 (transporte biomasa) asume la descarbonización de transporte por otras fuentes no eléctricas y por ende una demanda eléctrica 73 TWh menor.

Para ilustrar la dimensión del reto de descarbonización, estimamos la necesidad de expansión en capacidad para suplir esta demanda. Utilizamos supuestos muy optimistas de una generación de 3 TWh/GW instalado en turbinas eólicas⁵ y de 1,8 TWh/GW instalado en solar PV⁶ y calculamos la capacidad (GW_p) requerida para suplir la demanda en cuatro escenarios hipotéticos de solo eólica, solo solar PV, 50% ambas tecnologías y 50% eólica y solar con transporte no suplido por electricidad, pero

³ Si bien esta estrategia reduciría mucho la presión sobre el sector eléctrico, puede tener unas implicaciones graves en el sector de uso de tierra, dado que la producción de biocombustibles a esta escala puede generar problemas de emisiones (deforestación), ecológicos (pérdida de biodiversidad por monocultivos), y sociales. Se deberían analizar otros escenarios de electrificación con cambios de transporte modales (trenes para mercancías y pasajeros, motos y bicicletas eléctricas en ciudades, etc) para limitar el rol de los biocombustibles en la estrategia de descarbonización.

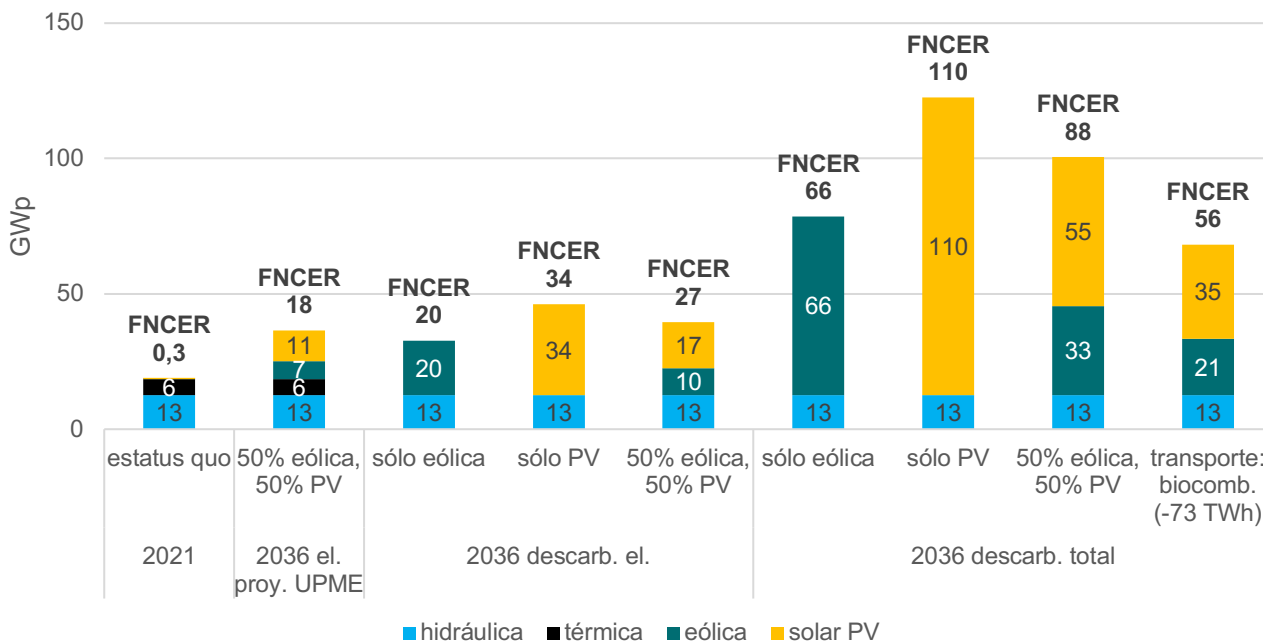
⁴ Para la calculación que incluye la fuente de datos (UPME, 2022, 2023b), las suposiciones y calculaciones, contactar autor.

⁵ La generación depende de circunstancias (ejemplo: velocidad de viento) y tecnologías (ejemplo: tamaño, eficiencia) específicas. En Dinamarca, se reportaron por una velocidad de viento de 8m/s (el promedio de la costa Colombiana (World Bank, 2010, p. 22)) 2TWh/GW (DWI, 1998); en Alemania, con condiciones menos favorables y tierra adentro, 1,6 TWh/GW (Germer & Kleidon, 2019), y en EE.UU 3,1 TWh/GW (US EPA, 2022).

⁶ Para Colombia, se estiman generaciones de fotovoltaica de 1500 kWh/kWp para gran partes del territorio y hasta >1800 kWh/kWp para zonas favorables (ejemplo: Guajira, Caribe, zona andina)(Solargis et al., 2023).

otras fuentes (73 TWh menos). Los resultados se entienden como capacidad mínima requerida, bajo supuestos optimistas. Por ejemplo, el rendimiento tecnológico está asumido como alto, con pérdidas existentes en transmisión no calculadas.

Fig. 43: Estimación de capacidad instalada necesaria (GW_p) para la descarbonización, asumiendo electrificación por eólica/PV/mixto/transporte por biocombustible



Fuente: cálculos propios basados en datos de UPME (2023a, 2022, 2023b), para forma de cálculo consultar autor.⁷

Hasta 2036, la UPME proyecta un aumento en demanda de energía que se suministra, en nuestro escenario, por 50% eólica y PV. En comparación con el actual parque de plantas hidráulicas y térmicas (fósiles) que suman una capacidad de 19 GW (XM, 2023), se necesitarían 10-14 GW de FNCER para reemplazar las plantas térmicas actuales. Con el aumento en consumo, sólo para descarbonizar el sector eléctrico se necesitan entre 20 GW (sólo eólica) y 34 GW (sólo PV). Si todos los consumos fósiles de todos sectores proyectados por la UPME (2022) hasta 2036 se sustituyeran por energía eléctrica, el parque FNCER adicional tendría que sumar 66-110 GW. Si el sector transporte (ejemplo) se supliera con otras fuentes distintas a electricidad (por ejemplo, biocombustibles), esto reduciría el consumo eléctrico y consecuentemente la capacidad adicional necesaria a unos 56 GW.

Este análisis no es un escenario realista. No incluye un modelo del sistema eléctrico ni un análisis de las necesidades de almacenamiento en un sistema basado en FNCER con volatilidad (aunque Colombia dispone de flexibilidad por los 12.5 GW de las hidroeléctricas). En cambio, el cálculo demuestra la inmensa tarea que significa una descarbonización completa del sistema energético y subraya la necesidad de frenar el aumento de consumo energético e incluir estrategias de reducción de consumo. Con un consumo energético mayor, el sector clave es transporte que requiere un cambio desde vehículos individuales a modos públicos electrificados para reducir el consumo y una estrategia de descarbonización realista, posiblemente apoyada en los biocombustibles (biodiesel, bioetanol).

⁷ El hecho de que la energía hidráulica se mantenga en todos los escenarios en 13 asume que ninguna nueva planta hidroeléctrica entra al sistema, si bien esto es realista para grandes hidroeléctricas, algunas de mediana o pequeña escala son factibles y en algunos casos pueden ser buenos complementos para los proyectos de energía solar y eólica (como bombeo hidráulico). Otras hidráulicas podrían salir del parque.

También demuestra, que una descarbonización únicamente por vía eléctrica va a ser difícil y Colombia tiene que complementar las estrategias de fuentes eólicas y solares urgentemente por otras renovables como la biomasa y la geotermia. El rango de 56-110 GW potencialmente necesario para la descarbonización nacional se contrapone a un potencial técnico (según las estimaciones actuales, véase la sección 5.2) de hasta 138 GW - con una elevada incertidumbre sobre el potencial que puede desarrollarse a mediano plazo. Si el objetivo es descarbonizar toda la economía colombiana, parece difícil exportar cantidades significativas de energía a corto y medio plazo.

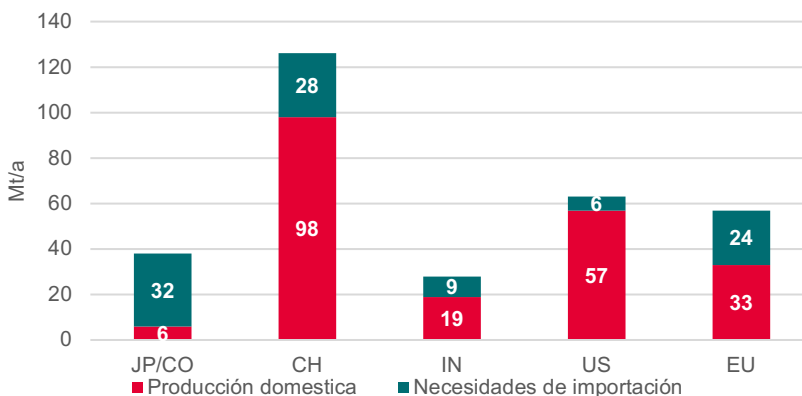
6 Desafíos e interconexiones de estrategias para la transición

6.1 Demanda en importación de energías verdes del Norte Global

Después de los países árabes exportadores de hidrocarburos y otras excepciones, los países del Norte Global con sus industrias intensivas en energía y altos niveles de consumo tienen las emisiones per cápita más altas (UNEP, 2021). Al mismo tiempo, muchos están densamente poblados y carecen de posibilidades de expandir la producción de biomasa. Aunque las opciones de descarbonización principales (eólica y PV) en muchos casos tienen el potencial técnico de cubrir la demanda entera en un futuro descarbonizado, muchos escenarios prevén una significativa futura importación de energías limpias.⁸

La hoja de ruta del hidrógeno en Colombia estima que la demanda mundial de hidrógeno puede llegar a 99 Mt/a en 2050 (i-deals & Montoya & Asociados, 2021)(Fig. 44). También los escenarios de descarbonización de Alemania (sección 3.6) muestran altas importaciones de hidrógeno y derivados, porque la expansión de FNCER no alcanza a suplir la demanda nacional. Estos escenarios no especifican de qué países provendrán las exportaciones. Se espera que en las décadas hasta 2050 se desarrolle un mercado global de fuentes descarbonizadas y la importación a costos más bajos. Para Europa, esto significa que importar de regiones más cercanas y con condiciones climáticas favorables es más probable, especialmente si existen o se pueden construir ductos o líneas de transferencia. La región Norte de África y África sub-sahariana están actualmente en la mira.

Fig. 44: Producción y demanda de importación de hidrógeno en 2050



Fuente: i-deals et al. (i-deals & Montoya & Asociados, 2021)

⁸ Esto se debe al modelaje de sistemas energéticos, en muchos casos modelos de optimización tecnoeconómica. El algoritmo de optimización elige la combinación de fuentes menos costosa. Frente a las opciones de elegir importaciones de vectores energéticos a precios exógenos u otras tecnologías de almacenamiento que permitirían un grado elevado de autosuficiencia (como baterías, hidrógeno u otras opciones), en muchos casos resultan importaciones significativas.

Como los costos de transporte suben con la distancia (Merten, Frank et al., 2022, p. 38), América Latina parece no ser la región adecuada para suplir a Europa. La futura competitividad en el mercado europeo de hidrógeno latinoamericano depende de la evolución de los costos de transporte y de generación.

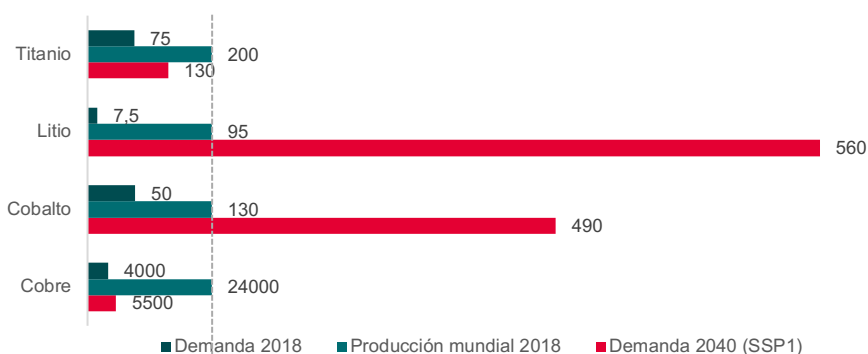
De todos modos, actores del mercado y gobiernos ya empezaron a impulsar la tecnología de hidrógeno mundialmente, en Latinoamérica y en Colombia. Solamente provenientes en Alemania, existe una multitud de iniciativas. Ambos países mantienen un “Diálogo binacional sobre la política de reindustrialización de Colombia basada en energías renovables y el desarrollo del sector del hidrógeno verde” (Cancillería, 2022). La cooperación alemana GIZ apoyó el desarrollo del hidrógeno en Colombia desde el principio:

- H2LAC (<https://h2lac.org/>): “plataforma colaborativa cuyo objetivo es impulsar el desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados en América Latina y el Caribe con el fin de **promover su producción, uso y exportación**”. Fue creada en 2020 por la GIZ junto al Banco Mundial, la CEPAL y el Programa Euroclima de la Unión Europea para fomentar la cooperación y el intercambio entre distintos stakeholders y acelerar el avance del hidrógeno verde en la región.
- Hidrogeno Colombia (<https://www.hidrogenocolombia.com/>) recibe apoyo de H2LAC
- GIZ Colombia realiza capacitación junto con el Ministerio de Minas y Energía, el FENOGE y el apoyo de HINICIO (H2LAC, 2022)
- El Gobierno financiará 10 proyectos de estudios para el desarrollo de hidrógeno verde y azul en Colombia por más de COP\$6.500 millones por medio de FENOGE (Minenergía, 2022b) y con el apoyo también de la GIZ.
- Proyecto para “Fomentar proyectos de hidrógeno en países en desarrollo y emergentes: H2-Uppp” (giz, 2023)

6.2 Demanda en recursos para implementar la estrategia del Norte Global

Watari et al. (2019a) proyectan un aumento en la demanda global en recursos para la transición energética y descarbonización, de un nivel de 2 Gt/a a 12 GT/a TMR (reducción posible con reciclaje), enfoque en hierro, cobre, níquel y litio (Watari et al., 2019b). En un análisis de materiales críticos para las tecnologías de transición energética, DERA (2021) calcula la demanda de 19 metales basado en una multitud de productos y aplicaciones y para varios escenarios (IPCC shared socioeconomic pathways, SSP). La Fig. 45 muestra un resumen de los resultados para un escenario sostenible (SSP1): Mientras encuentran una reducción de la demanda de cobre y titanio, la demanda de litio se expande por un factor 6 y la demanda a cobalto por un factor 4 (más resultados: DERA 2021, p. 24).

Fig. 45: Demanda anual de recursos críticos para tecnologías de la transición energética: 2018 y 2040 SSP1 (kt/a)



Fuente: Extracto de DERA (2021, p. 24). Más materiales críticos en diagrama original.

Nota: normalizado a nivel de producción mundial 2018. SSP1=escenario sostenible

Entre las exportaciones de Colombia, los metales sólo constituyen un porcentaje menor. De todos modos, según el DANE (2023), las exportaciones de ferróniquel sumaron 1.5 Mt en 2022 con un valor de 0.9 bn USD (total exportaciones: 57 bn USD). Es probable que la creciente demanda de metales y los aumentos previstos de los respectivos precios también generen presión de expandir la extracción en Colombia.

6.3 Inversión y tecnología para la transición del Sur Global

Colombia no dispone de una industria manufacturera de torres eólicas y de células fotovoltaicas. Además, las empresas de manejo y construcción de plantas eléctricas todavía no disponen de la experiencia en planeación y gestión de inversiones a escala grande para nuevos proyectos FNCER, ni los fondos para las inversiones requeridas.

En 2023, Colombia depende de tecnología, experiencia y capital extranjero. La tecnología y experiencia se importa con la participación de empresas extranjeras, con capacitación de las instituciones de cooperación internacional (como la GIZ, sección 6.1). Para el capital requerido existen varias formas de financiamiento nacional como los fondos FONENERGIA, el FENOGE y SGR (Stockholm Environment Institute et al., 2023, p. 3). Para las dimensiones planeadas se requieren fondos adicionales que se buscan con créditos y financiamiento internacional de entidades como el Banco Mundial, Interamerican Development Bank, European Development Bank, KfW alemana. Las financiaciones incluyen por ejemplo

- 2017 IADB: línea de financiamiento de 45M USD (IADB, 2021)
- 2021 KfW: 150M €
- 2022 KfW: 200M € financiamiento de parques eólicos y fotovoltaicos
- 2022 World Bank: 1bn USD “to accelerate Colombia’s climate action by advancing the low-carbon energy transition, promoting sustainable land use, and strengthening climate resilience and adaptation” (World Bank, 2013)
- Colombia aplicó a un crédito de 350M USD, con 70M USD del CIF (desembolsado por IDB) con tasa de interés reducido y 3.5M USD no reembolsable. Los restantes 280M USD son créditos de mercado del IDB, el CTF, Bancoldex, FDN y FENOGE u otros bancos (CIF, 2023, p. 36).

En muchos proyectos de energía renovable, las compañías de energía y constructoras también participan en el financiamiento, gestión, propiedad, operación y mantenimiento de los proyectos. Ejemplos incluyen

- Ecopetrol firmó un acuerdo con los Ministerios de Minas y Energía y de Ciencia y Tecnología para avanzar en la transición energética. Las iniciativas del acuerdo serán financiadas por recursos de Ecopetrol de alrededor de COP\$33.000 millones que administrarán los ministerios.
- La empresa Alumbrado Público de Barranquilla firmó un memorando de entendimiento con la empresa Dinamarca Copenhagen Infrastructure Partners para el desarrollo de la primera planta eólica costa afuera de 350 MW (para expandir después)(Alcaldía de Barranquilla, 2022). La empresa ofrece también apoyo en financiamiento y tiene fondos propios. Información más detallada sobre el financiamiento de este proyecto se encuentra públicamente. Es posible que se financie por las fuentes mencionadas arriba.
- Ecopetrol seleccionó a la empresa Total Eren para financiar, construir y operar una planta Solar PV de casi 100MWp (Ecopetrol & TOTAL Eren, 2023). El proyecto pertenecerá en un 51% a Total Eren y en un 49% a Ecopetrol, la suma de inversión no se menciona en el comunicado de prensa.

Existe también una variedad de iniciativas de cooperación internacional entre las que se destacan:

- Programa SEED – Escalando las Energías Renovables financiado por la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), que ayuda a crear mercados energéticos competitivos. La actividad se implementa desde 2017 hasta 2025.
- Iniciativa Energía para la Paz (E4P) liderada por USAID busca proveer energía a 9 Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial - PDET en Zonas No Interconectadas de Colombia, con el fin de generar desarrollo económico y social sostenible.
- El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia y el Ministerio Federal de Alimentación y Agricultura de Alemania consolidan su cooperación con el objetivo de transformar el sector agrícola en sistemas sostenibles. Las áreas de cooperación están principalmente en materia de investigación y desarrollo, el uso sostenible de fertilizantes, la adopción de biofertilizantes y el fortalecimiento a las cooperativas y asociaciones de pequeños productores.
- La ciudad de Bogotá y la embajada alemana promueven alianzas entre empresas bogotanas y alemanas para la transferencia y generación de conocimiento frente al uso de energías renovables y el desarrollo del sector del hidrógeno verde.
- Proparco, el brazo financiero de la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD), espera financiar proyectos por 500 M € en los próximos 5 años.
- Se conformó la alianza público-privada (APP) como resultado del Diálogo Binacional sobre la Política de Reindustrialización, basada en las energías renovables entre Colombia y Alemania. El objetivo es juntar sectores público y privado de los dos países y acordar proyectos conjuntos para implementar en los siguientes años de gobierno. Los ministerios de Comercio, Industria y Turismo y de Minas y Energía, Ecopetrol, el Grupo de Energía de Bogotá y Promigas suscribieron un memorando de entendimiento para avanzar en el proceso de industrialización sostenible.

6.4 Dependencia de Colombia de exportaciones fósiles y geopolítica de la transición

Colombia ha mantenido un déficit de comercio exterior en los últimos 20 años (excepto en los periodos 2003-2005 y 2009-2013 en los que realizó altas exportaciones de petróleo), lo cual ha representado una presión devaluadora sobre la moneda. De las exportaciones (2022 total: 41 bn USD), las energías fósiles (petróleo y carbón) han tenido un rol clave con el 55% (2022) en valor. La continuidad de este ingreso por exportaciones está en riesgo por las siguientes razones:

- La transición energética progresiva del Norte Global conducirá a una disminución en demanda de carbón y petróleo. Existe el riesgo de reducción en volúmenes y precios de demanda, aunque parte de esta reducción en demanda está siendo compensada por la minería de minerales de transición y otros países del Sur Global.
- El cambio climático y las responsabilidades de Colombia en el marco del acuerdo de París /IPCC generan presión por descarbonización y reducción en explotación de hidrocarburos.
- El volumen de la explotación de petróleo y gas en Colombia ya está bajando por la reducción de las reservas. Estimaciones de alcance varían, pero excedentes de la demanda nacional podrían reducirse hasta 2028 (cap. 2.7) y Colombia convertirse en importador neto.

En el marco actual de relaciones comerciales globales, países con economías dependientes de la exportación de materias primas como Colombia, tienen la presión de mantener un balance de comercio exterior equilibrado que pueda ser compensado con inversión y deuda extranjeras (control

del déficit) para prevenir la devaluación masiva de la moneda. Las alternativas contempladas para compensar los ingresos decrecientes por exportación de fósiles incluyen:

- alternativas para la exportación (desarrollo de agricultura, industria, minería, hidrogeno/energía verde)
- reducción de importación de otros bienes (vea tipo de bienes importados [insumos industriales]: restricciones difíciles/posiblemente contraproducente)
- reducción de consumo de energías fósiles para evitar futura importación de fuentes fósiles

En este contexto, Colombia, como la mayoría de los países del Sur Global, no tendrá la soberanía monetaria para crear capacidad productiva para su transición energética y seguirá dependiendo de la exportación de materias primas baratas y la importación de tecnología a costos elevados, lo que la mantendrá en la senda del endeudamiento creciente. Manteniendo las condiciones actuales de la economía política global, la transición energética como proyecto planetario puede convertirse en un juego de suma cero, en el que los países ricos descarbonizan su consumo energético importando minerales y energías limpias, mientras los países del Sur global mantienen una dependencia exportadora de esos recursos que también necesitan para hacer su transición energética, y sin recursos para financiar la propia transición.

La descarbonización como respuesta a la crisis climática global, solo podrá hacerse si se crean las condiciones para que todas las regiones del mundo accedan rápidamente a las tecnologías y las materias primas requeridas. Colombia, por su alta dependencia de exportaciones hoy decrecientes y de valor futuro incierto, requiere una acción política rápida y preventiva para evitar futuras importaciones fósiles, y una resultante profundización de la dependencia y déficit en comercio exterior.

Existen dudas sobre la posibilidad de que el planeta entero alcance una descarbonización de las economías no solo por las grandes cantidades de minerales que se requerirá para una transformación masiva de las formas de producir energía, sino también porque la construcción de la infraestructura solar y eólica requiere cantidades crecientes de energía fósil, agua y otras materias primas en su fabricación, transporte, instalación, operación, mantenimiento, cierre y reciclaje, y genera emisiones contaminantes para el aire, agua y residuos sólidos (Valero et al., 2021). Además, en las regiones productoras de minerales de transición y en los territorios donde se instalan grandes proyectos eólicos y solares, la nueva ola de acumulación terminal de capital por descarbonización o desfossilización está basada en procesos predatorios de despojo (Argento & Kazimierski, 2022).

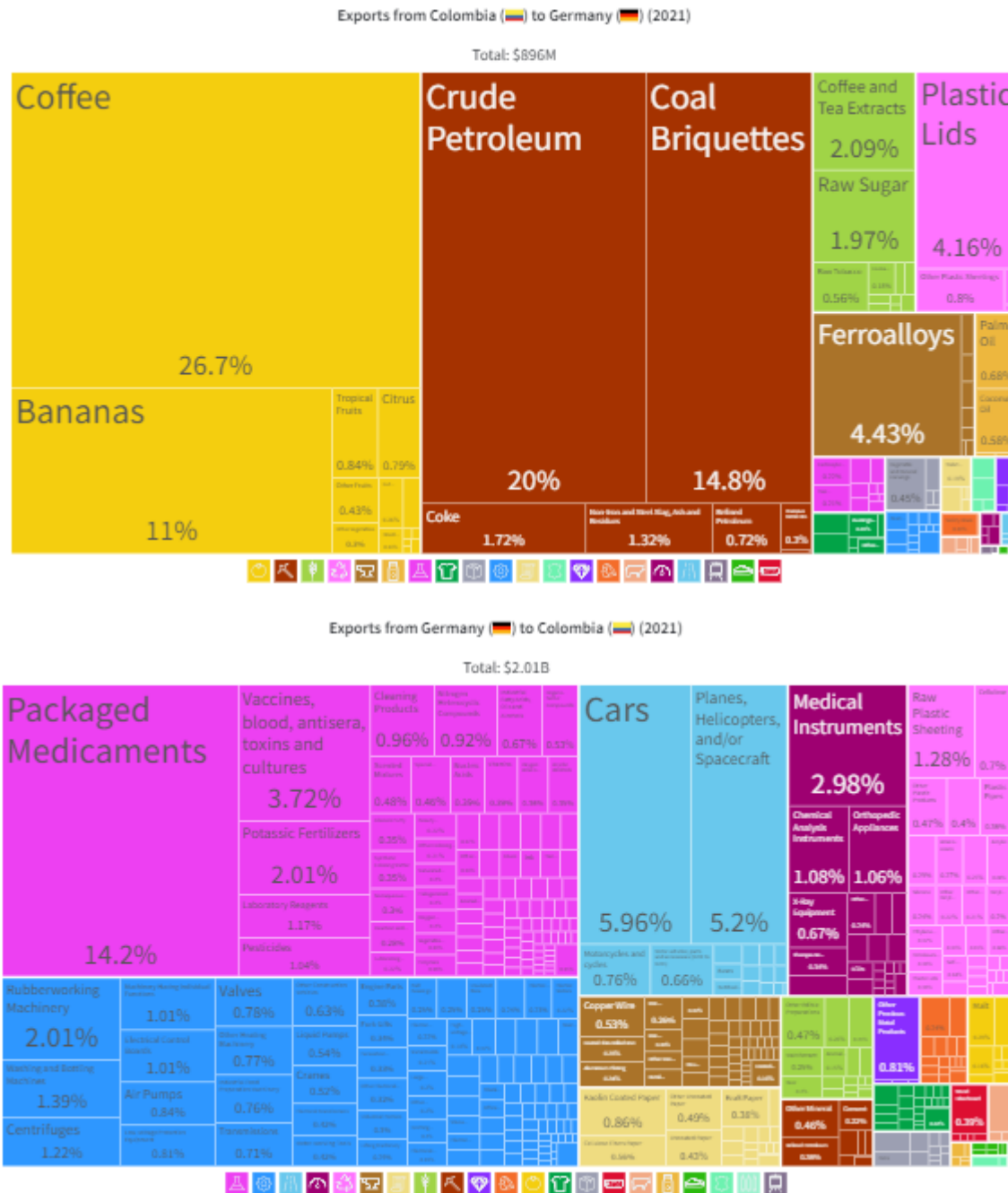
La crisis climática planetaria debe ser comprendida en toda su dimensión como la síntesis final de un proyecto histórico de apropiación del mundo material, que solo podrá ser revertida mediante el derrumbe de las estructuras de dominación social consolidadas en el proyecto de la colonialidad/modernidad (Quijano, 2013). Por lo tanto, la descarbonización, como única solución aceptada puede incluso acelerar la crisis climática pues sin abordar cambios estructurales, pone una fe excesiva en el “solucionismo tecnológico” (Morozov, 2013) para resolver el que sea quizás el problema más complejo que ha enfrentado la humanidad en su historia.

Relaciones comerciales Colombia–Alemania

Las relaciones comerciales Alemania-Colombia son representativas de las relaciones Norte-Sur. Colombia exporta a Alemania exclusivamente productos agrícolas, energéticos y materias primas para la industria, mientras que Alemania exporta a Colombia principalmente productos farmacéuticos, automóviles, aeronaves y maquinaria (ver Fig. 46). En 2021 Colombia exportó USD 896 millones

(crecimiento del 0.58% anual desde 1995), y Alemania USD 2.010 millones (crecimiento del 3.83% anual desde 1995) (OEC World, 2023).

Fig. 46: Composición de la canasta del intercambio comercial entre Alemania y Colombia (2021)

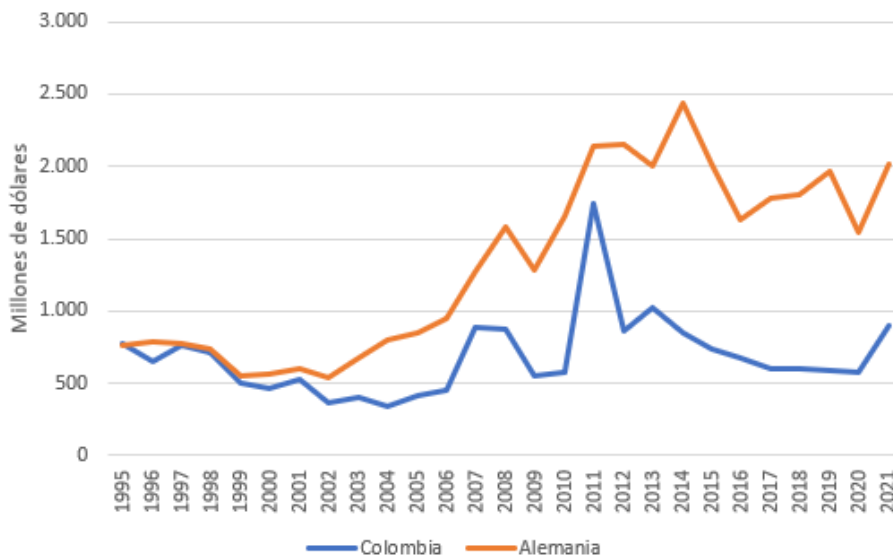


Fuente: OEC (2023)

La balanza comercial entre los dos países desde 1995 se representa en la Fig. 47, que muestra una brecha creciente en el valor del intercambio y un valor acumulado de déficit comercial para Colombia de USD17.483 millones. Esta balanza es reflejo del intercambio estructuralmente desigual entre las regiones del mundo y representa la colonialidad de las relaciones entre el norte y el sur globales que en el agregado total arrojan una apropiación de mercancías por valor de USD2.2 billones por año y un valor acumulado de 62 trillones desde 1960 (en valores constantes de 2011); estos valores tenderán a

aumentar en la medida en que se mantenga la estructura de precios y salarios de la economía mundial (Hickel et al., 2021).

Fig. 47: Valor intercambio comercial Colombia-Alemania



Fuente: OEC (2023)

En un contexto caracterizado por estas desigualdades estructurales, la posibilidad de Colombia de financiar por sí misma la transición energética en términos de descarbonización, es exigua. La narrativa del imperativo económico enmarcada en la dependencia de las exportaciones de materias primas a los precios dados por esta estructura comercial conduce a mayor endeudamiento y perpetúa la pérdida de soberanía monetaria.

La alternativa para que el Sur Global pueda financiar una transición energética más allá de la descarbonización, que no se diluya en la trampa de los crecientes déficits de balanza de pagos con el Norte Global, y que pueda avanzar en las diferentes dimensiones de la transición justa, consiste en resolver las tres trampas estructurales creadas por el orden moderno/colonial: la pérdida o las barreras para construir soberanía alimentaria, soberanía energética y soberanía tecnológica. Pensar la transición energética en términos de soberanía de estos tres sectores exige pasar por la soberanía monetaria como respuesta a la pregunta de cómo financiar una transformación productiva de dimensiones sistémicas. La propuesta que ha planteado el presidente Petro en escenarios internacionales de cambiar deuda por acción climática está encaminada en esta dirección, pues pone en perspectiva la acumulación de deuda de los países del Sur Global como causa estructural de la falta de soberanía monetaria para financiar la transición energética.

En las lógicas actuales del comercio global, la única forma en que los países del Sur Global podrían generar los recursos para financiar su transición energética es a través de un mayor crecimiento económico, que requiere que se exporten cada vez más commodities para pagar las deudas crecientes, y se atraigan capitales para mantener actividades económicas de bajo valor agregado. Bajo este esquema la transición energética en países como Colombia se hará mediante cooperación internacional, mayor endeudamiento o filantropía.

En línea con nuevas interpretaciones de la teoría monetaria moderna (Hickel, 2021), la propuesta de cambio de deuda por acción climática de Petro, a través de una acción concertada entre bloques regionales de países, podría crear los mercados regionales requeridos para el desarrollo de la capacidad productiva en materia alimentaria, energética y tecnológica. La diplomacia de la transición

energética deberá ser concertada entre bloques regionales del Sur Global para convencer a sus deudores de condonar deudas generadas por un comercio internacional basado en relaciones coloniales.

Estos recursos podrían destinarse entonces a financiar la recuperación o creación de capacidad productiva en las regiones hoy destinadas a vender sus minerales de transición en una nueva ola de extractivismo verde para que el Norte Global descarbonice su economía y sus excesos de consumo. La soberanía monetaria les daría autonomía a los países del Sur Global para desarrollar su capacidad productiva en los tres grandes ejes y obligaría al Norte Global a emprender una transición no solo basada en la descarbonización, sino principalmente en el decrecimiento y el fin de relaciones de explotación colonial.

7 Reflexiones y conclusiones: transición justa y acción rápida

Comprensión de la transición energética. Tanto Colombia como Alemania han enfocado su transición energética en la narrativa de la descarbonización por la vía del “solucionismo tecnológico” sin mayor reflexión sobre su viabilidad física en alineación con las fronteras planetarias, los impactos sociales y la dimensión sistémica de la justicia climática. El caso Colombia-Alemania como una representación de las relaciones Norte-Sur pone en duda la posibilidad de una descarbonización con base en el modelo de descarbonización del Norte Global. Una transición energética justa necesariamente implica trascender la descarbonización, para incorporar las causas estructurales de la crisis climática ancladas en relaciones de dominio colonial.

Análisis sistémico. Para comprender el desafío de cada país en su transición energética, se requiere un análisis sistémico de la evolución de la demanda y la generación/suministro en cada sector, que permita plantear estrategias sectoriales tanto de transformación como de descarbonización. Las propuestas sectorizadas pueden no ser realistas si no contemplan sus interdependencias con las cadenas de producción y consumo. Una vista intersectorial es necesaria para informar planes sectoriales. En Colombia los estudios de descarbonización y transición sistémicas aún son muy incipientes. En Alemania hay estudios adelantados de más de 15 años con planes y estrategias integrales, pero no contemplan las dimensiones globales, ni las condiciones de los países de origen de sus importaciones de energía proyectadas.

Acción sectorial. Para que todos los sectores logren la descarbonización se necesitan cambios fundamentales en infraestructuras, inversiones, marcos legales y financiación. Esto requiere planes/hojas de rutas por cada sector, acerca de cómo crear opciones de reducción de emisiones hasta la descarbonización total. En Colombia actualmente esa planeación es dispersa, cada sector desarrolla esquemas desconectados (no existen planes de descarbonización y en varios casos los planes existentes no son adecuados). El país requiere hojas de ruta sectoriales para la descarbonización completa y la transición energética, articuladas a una visión nacional. En Alemania, a partir de resultados de 10-20 años de análisis y proyecciones nacionales y sectoriales para una descarbonización, hay una idea sobre cómo podría llevarse a cabo la descarbonización. Sin embargo, los planes de implementación en sectores específicos son insuficientes y no toman las medidas correspondientes.

Articulación global. La transición energética justa implica ejercicios de planeación nacionales articuladas con ejercicios globales. La transición energética global no debería consistir en que el Norte Global crea estructuras de exportación de energía en los países de Sur Global desarticuladas de los procesos de descarbonización locales, porque pone en riesgo la descarbonización del Sur Global. Como proceso global, la transición energética requiere un análisis y estrategia globales. Para el Sur Global, una descarbonización completa es un desafío colosal. A las escalas nacionales es posible logre una transición y generar exportaciones (por ejemplo, de hidrógeno) en el mediano plazo, si las fuentes renovables potenciales son suficientemente grandes y se pueden desarrollar. La transición energética

justa es un proyecto global para transformar formas de relacionamiento con el mundo material y va a requerir un alto nivel de compromiso del Norte Global para transformar la estructura de las relaciones comerciales internacionales. La financiación de la transición energética implica pensar un esquema global que permita desarrollar capacidades productivas nacionales/regionales.

Inclusión de todos los actores. En las hojas de ruta sectoriales colombianas existentes y los procesos y debates políticos se evidencia una excesiva separación de actores: inversionistas, empresas, estado, ONG/comunidades. Esto hace que no haya avances suficientes y que los proyectos grandes se queden estancados, por la falta de inclusión de comunidades locales. El estado debe organizar un dialogo entre todos los actores y garantizar por ley la participación de las comunidades en decisiones, propiedad y utilidades de proyectos de generación FNCER (“democratización de la producción”). En Alemania existen amplios derechos para la comunidad, incluyendo consultas, condiciones financieras favorables para proyectos de cooperativas e intercomunales y la obligatoria participación financiera de las localidades (0,2 ct/kWh, adicional: impuesto industrial). La participación popular incrementa la aceptación de proyectos aunque por otro lado, posibilidad de objeción ha frenado muchos proyectos y últimamente ha sido parcialmente limitada para propiciar y acelerar el desarrollo de proyectos.

Recuperación o creación de soberanías. Colombia y muchos países del Sur Global tienen una gran dependencia de exportaciones fósiles para mantener una balanza de pagos aceptable. Esto representa un riesgo por posibles reducciones en explotación de petróleo/gas en relación con la demanda nacional proyectada. Esto podría traducirse en mayor dependencia monetaria, y posible pérdida de seguridad energética. La transición energética debe contemplar escenarios de soberanía monetaria para tener control sobre la velocidad a la cual y opciones con que el país puede sustituir las exportaciones de fósiles y prevenir la devaluación de la moneda. Estos escenarios deben contemplar una rápida descarbonización del sector transporte para prevenir depender de importaciones en el corto plazo. El reemplazo de las exportaciones de fósiles por hidrógeno no parece muy viable especialmente por la alta demanda energética de otros sectores nacionales (transporte, industria) que aún requiere descarbonización y la velocidad a la que se requeriría desarrollar la infraestructura. En consecuencia, el énfasis de Colombia y países similares del Sur Global debe estar en generar capacidad productiva para crear soberanía alimentaria, energética y tecnológica basadas en recursos, conocimiento e industrias locales para lograr su propia transición.

Cambios en el uso del suelo en el contexto global. En Colombia, el 59% de las emisiones de GEI provienen del sector agrícola y de cambios en el uso del suelo, lo cual explica los esfuerzos por controlar la deforestación. Las estrategias nacionales de control de la deforestación como principal factor de emisiones en los últimos veinte años no han logrado detener el fenómeno, quizás porque se ha abordado como si fuera un problema exclusivamente nacional. La comprensión del cambio en el uso del suelo y la deforestación en los contextos globales del mercado de las drogas ilícitas, el acaparamiento y la especulación con la tierra, el crecimiento en la demanda de carne y el comercio de madera permitiría desarrollar soluciones dirigidas a causas estructurales. Las soluciones basadas en la captura de carbono en países como Colombia a través de diversos mecanismos de mercado pasan por alto las diferencias en los ciclos lento y rápido del carbono y no abordan la urgente necesidad de reducir las emisiones en los sectores y países de mayor consumo. A pesar de la importancia de las emisiones del sector AFOLU en Colombia, la descarbonización de los sectores consumidores de energía no puede relegarse a un segundo plano por la complejidad de la tarea que requiere mucho tiempo y planeación.

Acción rápida. Los riesgos de no tomar acción están subiendo: cada punto arriba indica una necesidad de acción política inmediata para los gobiernos de Colombia y Alemania – retrasos en acción elevan los costos y los riesgos.

8 Bibliografía

- Alarcón, P., Diaz, N. C. C., Schwab, J., & Peters, S. (2022). Repensando las 'Transiciones Justas': Reflexiones Críticas para el Sur Global. *Policy Brief Justus-Liebig-Universität Giessen*. https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Alarcon/publication/362726239_Policy_Brief_Repensando_las_'Transiciones_Justas'_Reflexiones_Criticas_para_el_Sur_Global/links/62fc44f8e3c7de4c3461e2ed/Policy-Brief-Repensando-las-Transiciones-Justas-Reflexiones-Criticas-para-el-Sur-Global.pdf
- Alcaldía de Barranquilla. (2022, May 2). *Desde Barranquilla, Gobierno nacional pone en marcha hoja de ruta de energía eólica costa afuera*. Alcaldía de Barranquilla, Distrito Especial, Industrial y Portuario. <https://www.barranquilla.gov.co/mi-barranquilla/desde-barranquilla-gobierno-nacional-pone-en-marcha-hoja-de-ruta-de-energia-eolica-costa-afuera>
- Andoke Andoke, L., Arazi, E., Castro Suárez, H., Griffiths, T. F., & Gutiérrez Sánchez, E. (2023). Amazonian visions of Visión Amazonía: Indigenous Peoples' perspectives on a forest conservation and climate programme in the Colombian Amazon. *Oryx*, 1–15. <https://doi.org/10.1017/S0030605322001636>
- Argento, M., & Kazimierski, M. A. (2022). Acumulación por conservación y desfosilización: El consenso ecotecnológico corporativo del cambio climático. *Prácticas de Oficio. Investigación y Reflexión En Ciencias Sociales*, 29, 7–21.
- Barney, J. (2021, April 19). La Guajira, entre un nuevo aire o un desastre. Panorama actual de la violencia en la Guajira con la llegada de las empresas energéticas al territorio Wayuu. *Indepaz*. <https://indepaz.org.co/la-guajira-entre-un-nuevo-aire-o-un-desastre-panorama-actual-de-la-violencia-en-la-guajira-con-la-llegada-de-las-empresas-energeticas-al-territorio-wayuu/>
- Bautista, A. J. (2022). Artemisa: Operación anticampesina vestida de verde. *Dejusticia*. <https://www.dejusticia.org/column/artemisa-operacion-anticampesina-vestida-de-verde/>
- Bayern Labo. (2020). *Wohnungsmarkt Bayern—Beobachtung und Ausblick*.
- BDI. (2023). *Energie & Klima: Beiträge zur Energiewende und Energiewirtschaft*. <https://bdi.eu/themenfelder/energie-und-klima>
- BMEL. (2022, November 21). *Landwirtschaft, Klimaschutz und Klimaresilienz*. BMEL. <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/klimaschutz/landwirtschaft-und-klimaschutz.html>
- BMJ. (2022). *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG)*. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/index.html#BJNR106610014BJNE018703311
- BMWK. (2022). *Überprüfung der Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung – aktueller Zwischenstand*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/ueberpruefung-der-reduzierung-und-beendigung-der-kohleverstromung.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- BMWK. (2023a). *Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes, zur Änderung der Heizkostenverordnung und zur Änderung der Kehr- und Prüfungsordnung*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/entwurf-geg.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- BMWK. (2023b). *Unsere Energiewende: Sicher, sauber, bezahlbar*. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>
- BMWK. (2023c, March 30). *Gesamtausgabe der Energiedaten—Datensammlung des BMWi*. Bundesministerium für Wirtschaft und. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.html>
- Cancillería. (2022). *Diálogo binacional sobre la política de reindustrialización de Colombia basada en energías renovables y el desarrollo del sector del hidrógeno verde | Cancillería*. <https://www.cancilleria.gov.co/newsroom/news/dialogo-binacional-politica-reindustrializacion-colombia-basada-energias-renovables>

- Cardoso, A., & Ethemcan, T. (2018). Ecología Política de las nuevas geografías del carbón: La cadena de carbón entre Colombia y Turquía. *Hacia Una Colombia Post Inería de Carbón: Aportes Para Una Transición Social y Ambientalemnte Justa*, 2, 43.
- CCAP, & FCDS. (2023). *Comportamiento de la deforestación en proyectos REDD+ en Colombia; Documento referente para la toma de decisiones de política pública*. Center for Clean Air Policy & Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible. <https://fcds.org.co/wp-content/uploads/2023/02/vf-document-deforestation-in-redd-projects-in-colombia.pdf>
- CIF. (2023). *GCAP Sub-Committee Meeting*. Climate Investment Funds. https://d2qx68gt0006nn.cloudfront.net/sites/cif_enc/files/meeting-documents/gcap_colombia_rep_ip2.pdf
- CLEVER. (2023). *CLEVER energy scenario*. <https://clever-energy-scenario.eu/>
- DANE. (2023, March 27). *Exportaciones*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/exportaciones>
- Delgado, R., Wild, T. B., Arguello, R., Clarke, L., & Romero, G. (2020). Options for Colombia's mid-century deep decarbonization strategy. *Energy Strategy Reviews*, 32, 100525. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100525>
- DERA. (2021). *DERA Rohstoffinformationen 50. Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/dera-rohstoffinformationen-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Destatis. (2023a, March 9). *Stromerzeugung 2022: Ein Drittel aus Kohle, ein Viertel aus Windkraft*. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_090_43312.html
- Destatis. (2023b, March 30). *Einfuhr von Steinkohle für das Jahr 2022*. Statistisches Bundesamt. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Verwendung/Tabellen/einfuhr-steinkohle-jaehrlich.html>
- DTU, ESMAP, World Bank, & Vortex. (2023). *Global Wind Atlas*. <https://globalwindatlas.info>
- Dunlap, A. (2018). The 'solution' is now the 'problem:' wind energy, colonisation and the 'genocide-ecocide nexus' in the Isthmus of Tehuantepec, Oaxaca. *The International Journal of Human Rights*, 22(4), 550–573. <https://doi.org/10.1080/13642987.2017.1397633>
- DWI. (1998). *Annual Energy Output from a Wind Turbine*. <http://xn--drmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/annu.htm>
- Ecopetrol, & TOTAL eren. (2023). *Colombia: Ecopetrol selects TOTAL eren to develop, finance, build and operate a nearly 100 MWp Solar PV farm*. Press release. https://www.total-eren.com/wp-content/uploads/2023/01/Press-Release-Rubiales-Ecopetrol_English-final.pdf
- Escobar, A. (2022). Reinterpretando las civilizaciones: De la crítica a las transiciones. *ARQ (Santiago)*, 111, 24–41. <https://doi.org/10.4067/S0717-69962022000200024>
- European Commission. (2019). *A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions and the European Investment Bank*.
- European Commission. (2020). *National energy and climate plans (NECPs)* [Text]. Energy - European Commission. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/national-energy-and-climate-plans-necps_en
- European Council. (2023, March 29). *Fit for 55: Reform of the EU emissions trading system*. <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-eu-emissions-trading-system/>
- Flechas Mejía, L., Arias Gaviria, J., Andrea Rueda, M., Pabón Restrepo, G., & Daniel Pinzón, Á. (2022). *Eliminación gradual del carbón en la generación eléctrica en Colombia*. Transforma.
- Fraunhofer ISI, consentec, ifeu, & TU Berlin. (2023). *Langfristszenarien*. <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>

- Germer, S., & Kleidon, A. (2019). Have wind turbines in Germany generated electricity as would be expected from the prevailing wind conditions in 2000-2014? *PLOS ONE*, 14(2), e0211028. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211028>
- giz. (2023). *Fomentar proyectos de hidrógeno en países en desarrollo y emergentes: H2-Uppp*. <https://www.giz.de/en/worldwide/107567.html>
- Gobierno de Colombia. (2021). *Evaluación de las vías de neutralidad de carbono a través de la metodología de toma de decisiones robustas (RDM) en varios escenarios futuros inciertos utilizando el modelo GCAM*. Universidad de los Andes, Universidad de Ibagué, Universidad de Maryland. <https://e2050colombia.com/wp-content/uploads/estudios/EstudioAEvaluacionDeLasViasDeNeutralidad.pdf>
- Gobierno de Colombia. (2022). *Colombia, Potencia mundial de la vida. Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. DNP Departamento Nacional de Planeación.
- H2LAC. (2022, November 8). *GIZ Colombia realiza capacitación junto con el Ministerio de Minas y Energía, el FENOGE y el apoyo de HINICIO*. <https://h2lac.org/noticias/giz-colombia-realiza-capacitacion-junto-con-el-ministerio-de-minas-y-energia-el-fenoge-y-el-apoyo-de-hinicio/>
- Hickel, J. (2021). How to Achieve Full Decolonization. *New Internationalist*, 15.
- Hickel, J., Sullivan, D., & Zoomkawala, H. (2021). Plunder in the Post-Colonial Era: Quantifying Drain from the Global South Through Unequal Exchange, 1960–2018. *New Political Economy*, 26(6), 1030–1047. <https://doi.org/10.1080/13563467.2021.1899153>
- IADB. (2021). *BID aprueba línea de crédito para acelerar la transición energética en Colombia* | IADB. <https://www.iadb.org/es/noticias/bid-aprueba-linea-de-credito-para-acelerar-la-transicion-energetica-en-colombia>
- i-deals, & Montoya & Asociados. (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno*. Ministerio de Minas y Energía. https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, & DNP. (2022). *Informe del inventario nacional de gases efecto invernadero 1990-2018 y carbono negro 2010-2018 de Colombia*. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Annex%20BUR3%20COLOMBIA.pdf>
- Infante-Amate, J., Urrego Mesa, A., & Tello Aragay, E. (2020). Las venas abiertas de América Latina en la era del Antropoceno: Un estudio biofísico del comercio exterior (1900-2016). *Diálogos Revista Electrónica*, 21(2), 177–214. <https://doi.org/10.15517/dre.v21i2.39736>
- IPCC. (2023). *Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6). Summary for policymakers*. https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- Kohleausstiegsgesetz. (2020). *DIP - Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz)*. <https://dip.bundestag.de/vorgang/.../258735>
- Latam, M. (2022). *El camino hacia la descarbonización en la industria de América Latina*. Manufactura Latam. <https://www.manufactura-latam.com/es/noticias/el-camino-hacia-la-descarbonizacion-en-la-industria-de-america-latina>
- Liu, Z., Song, J., Kubal, J., Susarla, N., Knehr, K. W., Islam, E., Nelson, P., & Ahmed, S. (2021). Comparing total cost of ownership of battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles. *Energy Policy*, 158, 112564. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112564>
- Massol Deyá, A. (2018). *De la autogestión a la insurgencia energética: Una historia de supervivencia, resistencia y gobernanza comunitaria*. Ponencia dictada en el Simposio de la Revista Jurídica de la Universidad de Puerto Rico titulado Derecho y Desastre: Puerto Rico ante la crisis fiscal y humanitaria el pasado 3 y 4 de mayo de 2018.
- Merten, Frank, Scholz, Alexander, Krüger, Christine, Heck, Simon, Girard, Yann, Mecke, Marc, & Goerge, Marius. (2022). *Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung - Update: Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW e.V. (LEE-NRW)* (p. 4278 KB, 128 pages) [Application/pdf]. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://doi.org/10.48506/OPUS-7948>

- Minenergía. (2022a). *Diálogo social para definir la hoja de ruta para la Transición Energética Justa en Colombia*. <https://bit.ly/HojaRutaTransicionEnergeticaJustaCO>
- Minenergía. (2022b). *El Gobierno financiará 10 proyectos de estudios para el desarrollo de hidrógeno verde y azul en Colombia por más de \$6.500 millones*. <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/el-gobierno-financiar%C3%A1-10-proyectos-de-estudios-para-el-desarrollo-de-hidr%C3%B3geno-verde-y-azul-en-colombia-por-m%C3%A1s-de-6500-millones/>
- Minenergía. (2023, March 15). *Una Transición Energética Justa y Sostenible*. <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/una-transici%C3%B3n-energ%C3%A9tica-justa-y-sostenible/>
- Minminas, & ANH. (2022). *Balance de contratos de hidrocarburos y recursos disponibles para la Transición Energética Justa*. Ministerio de Minas y Energía, Agencia Nacional de Hidrocarburos. https://minenergia.gov.co/documents/9628/DIAGNOSTICO_GENERAL_DE_CONTRATOS_DE_HIDROCARBUROS_2022.pdf
- Mintransporte. (2022). *Estrategia Nacional de Transporte Sostenible*. <https://www.mintransporte.gov.co/loader.php?IServicio=Tools2&ITipo=descargas&IFuncion=descargar&idFile=29787>
- Moncado, A. (2022, May 27). *Situación del autoabastecimiento de hidrocarburos en Colombia*. Blog del Sector Minero - Energético. <https://boletinmineroenergetico.uexternado.edu.co/situacion-del-autoabastecimientos-de-hidrocarburos-en-colombia/>
- Monsalve, M. M. (2022, January 2). *¿Eliminar el carbón? Discusión incómoda en Colombia* [Text]. ELESPECTADOR.COM. <https://www.elespectador.com/ambiente/eliminar-el-carbon-discusion-incomoda-en-colombia/>
- Morozov, E. (2013). *To save everything, click here: The folly of technological solutionism* (First edition). PublicAffairs.
- Nirmal, P., & Rocheleau, D. (2019). Decolonizing degrowth in the post-development convergence: Questions, experiences, and proposals from two Indigenous territories. *Environment and Planning E: Nature and Space*, 2(3), 465–492. <https://doi.org/10.1177/2514848618819478>
- OECD. (2023). *Colombia (COL) and Germany (DEU) Trade | OECD - The Observatory of Economic Complexity*. <https://oec.world/en/profile/bilateral-country/col/partner/deu?>
- Petro, G., & Márquez, F. (2022). *Colombia, Potencia mundial de la vida. Programa de Gobierno*. <https://drive.google.com/file/d/1nEH9SKih-B4DO2rhjTZAKiBZit3FChmF/view?usp=sharing>
- Quijano, A. (2013). Sobre la colonialidad del poder. Conferencia magistral impartida por Aníbal Quijano. *Contextualizaciones Latinoamericanas*, 1(8/6). <http://contexlatin.cucsh.udg.mx/index.php/CL/article/view/2792>
- Quiroga Rubio, L. (2023, March 17). Artículo que prohíbe minería de carbón a cielo abierto se eliminó del PND. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/articulo-que-prohibe-mineria-de-carbon-a-cielo-abierto-se-elimino-del-pnd-751312>
- Ragwitz, M., Weidlich, A., Biermann, D., Brandes, J., Brown, T., Burghardt, C., Dütschke, E., Erlach, B., Fishedick, M., Fuss, S., Geden, O., Gierds, J., Herrmann, U., Jochem, P., Kost, C., Luderer, G., Neuhoff, K., Schäfer, M., Wagemann, K., ... Zheng, L. (2023). *Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland—Technologie-umbau, Verbrauchsreduktion -und Kohlenstoffmanagement* (Schriftenreihe Energiesysteme Der Zukunft). acatech- — Deutsche Akademie- der- Technikwissenschaften- e. V.-. <https://www.acatech.de/publikation/transformationspfade-klimaneutralitaet/download-pdf?lang=de>
- Rodríguez-de-Francisco, J. C., del Cairo, C., Ortiz-Gallego, D., Velez-Triana, J. S., Vergara-Gutiérrez, T., & Hein, J. (2021). Post-conflict transition and REDD+ in Colombia: Challenges to reducing deforestation in the Amazon. *Forest Policy and Economics*, 127, 102450. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102450>

- RUNT. (2023, March 28). *Parque automotor registrado en RUNT | RUNT*.
<https://www.runt.com.co/runt-en-cifras/parque-automotor>
- SCI4climate.NRW. (2022). *Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland*. Wuppertal Institut/Sascha Samadi.
https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2022/SCI4climate.NRW-Samadi-2022-Vergleich-aktueller-Klimaschutzszenarien-fu_r-Deutschland.pdf
- Solargis, ESMAP, & World Bank. (2023). *Global Solar Atlas*. World Bank.
<https://globalsolaratlas.info/download/colombia>
- Stockholm Environment Institute, Vega Araújo, J., & Muñoz Cabré, M. (2023). *Solar and wind power in Colombia: 2022 policy overview*. Stockholm Environment Institute.
<https://doi.org/10.51414/sei2023.015>
- Sydney, E. B., Letti, L. A. J., Karp, S. G., Sydney, A. C. N., Vandenberghe, L. P. de S., de Carvalho, J. C., Woiciechowski, A. L., Medeiros, A. B. P., Soccol, V. T., & Soccol, C. R. (2019). Current analysis and future perspective of reduction in worldwide greenhouse gases emissions by using first and second generation bioethanol in the transportation sector. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100234. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100234>
- UA, & WTW. (2022). *Understanding the impact of a low carbon transition on Colombia*. Universidad de los Andes & Willis Towers Watson.
- UK Government, Gobierno de Colombia, NICFI, Embajada de Noruega Bogotá, & Embajada de la República Federal de Alemania Bogotá. (2023). *Declaración conjunta de intención (DCI)*.
https://www.norway.no/globalassets/2-world/colombia/pictures/infografia_1_aliados.pdf
- Umweltbundesamt. (2021). *Narrative einer erfolgreichen Transformation zu einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland*. Umweltbundesamt.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-02-19_texte_26-2021_narrative-rtd2050.pdf
- Umweltbundesamt. (2022). *Trendtabellen THG nach Sektoren*.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#treibhausgas-emissionen-nach-kategorien>
- Umweltbundesamt. (2023a). *Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes*. Umweltbundesamt.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2023_03_15_em-entwicklung_in_d_ksg-sektoren_pm.xlsx
- Umweltbundesamt. (2023b, March 30). *Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs>
- Umweltbundesamt. (2023c, March 30). *Fahrleistungen, Verkehrsleistung und Modal Split in Deutschland* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split>
- UNEP. (2021, November 9). *Climate Action Note | Data you need to know*. United Nations Environmental Programme. <https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-the-climate.html>
- UNFCCC. (2020). *What is the Paris Agreement?* <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement>
- UPME. (2020). *Plan de expansión de referencia generación—Generación 2020-2034. Volumen 2. Generación*.
https://www1.upme.gov.co/siel/Plan_expansin_generacion_transmision/Plan_expansion_2020_2034.zip
- UPME. (2023a). *Capacidad asignada por recurso*. twitter.
<https://twitter.com/UPMEOficial/status/1641163178913456128/photo/2>

- UPME. (2022). *Proyección Demanda 2022/2036*. Looker Studio.
<http://lookerstudio.google.com/reporting/f1ef21bf-9ca1-4df8-9bed-4f59ee7515d8/page/iX4iB?feature=opengraph>
- UPME. (2023b, March 29). *Balance energético colombiano*.
<https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx>
- US EPA, O. (2022, February 10). *Green Power Equivalency Calculator—Calculations and References* [Overviews and Factsheets]. <https://www.epa.gov/green-power-markets/green-power-equivalency-calculator-calculations-and-references>
- Valencia Hernandez, V. (2022). *Opciones de descarbonización del transporte terrestre en ciudades de Colombia: Escenarios a partir de un modelo de dinámica de sistemas* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión].
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/83202/1017243836.2022.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Valero, A., Valero, A., & Calvo, G. (2021). *Material Limits of the Energy Transition*. Springer.
- VDA. (2023). *Klima, Umwelt und Nachhaltigkeit*. <https://www.vda.de/de/themen/klima-umwelt-und-nachhaltigkeit>
- Watari, T., McLellan, B. C., Giurco, D., Dominish, E., Yamasue, E., & Nansai, K. (2019a). Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. *Resources, Conservation and Recycling*, 148, 91–103.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015>
- Watari, T., McLellan, B. C., Giurco, D., Dominish, E., Yamasue, E., & Nansai, K. (2019b). Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. *Resources, Conservation and Recycling*, 148, 91–103.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015>
- West, T. A., Wunder, S., Sills, E. O., Börner, J., Rifai, S. W., Neidermeier, A. N., & Kontoleon, A. (2023). Action needed to make carbon offsets from tropical forest conservation work for climate change mitigation. *ArXiv Preprint ArXiv:2301.03354*.
- Wiese, F., Thema, J., & Cordroch, L. (2022). Strategies for climate neutrality. Lessons from a meta-analysis of German energy scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 2.
<https://doi.org/10.1016/j.rset.2021.100015>
- World Bank. (2010). *Wind Energy in Colombia*. World Bank.
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/766921468018592029/pdf/558420PUB0wind1IC0dislosed071221101.pdf>
- World Bank. (2013). *Energy use (kt of oil equivalent) | Data | Graph*.
<http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.KT.OE/countries/EU-US-Z4-8S-ZQ-ZG-ZJ?display=graph>
- World Bank, The Renewables Consulting Group, & ERM. (2022). *Hoja de ruta Energía Eólica costa afuera (ES/EN)*. Ministerio de Minas y Energía.
<https://www.minenergia.gov.co/es/micrositios/enlace-ruta-eolica-offshore/>
- WVMetalle. (2023). *Energie- und Klimapolitik*. <https://www.wvmetalle.de/btw21/energie-und-klimapolitik.html>
- XM. (2023, March 29). *Capacidad efectiva por tipo de generación*.
<http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- Zografos, C., & Robbins, P. (2020). Green Sacrifice Zones, or Why a Green New Deal Cannot Ignore the Cost Shifts of Just Transitions. *One Earth*, 3(5), 543–546.
<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.012>

Anexo: Estrategias y políticas públicas existentes y previstos

Este anexo lista estrategias, hojas de ruta, proyectos de ley o análisis claves para la transición energética en los países analizados. Las tablas no son exhaustivas pues el marco político y legal es extenso y complejo y ya hay un importante número de análisis. La lista constituye una priorización de los autores. Por limitación de espacio no se pueden resumir, pero las tablas sintetizan los contenidos principales.

8.1 Colombia

Tab. 3: Políticas de transición energética en Colombia, documentos claves

Tema	Documento	Contenido	Autor/referencia
Electricidad/ eólica	Wind Energy in Colombia	Análisis tecno-económico de eólica	World Bank (2010)
Electricidad	Plan de expansión de referencia generación - generación	Resultados de modelo cuantitativo de evolución de capacidad eléctrica hasta 2034	UPME (2020)
Hidrógeno	Hoja de Ruta del Hidrógeno	Análisis tecno-económico, demanda nacional/internacional, potenciales, mapa de acción	i-deals et al. (i-deals & Montoya & Asociados, 2021)
Carbono neutralidad largo plazo	Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París [Gobierno Duque]	Evaluación: escenarios de modelo cuantitativo de carbono neutralidad hasta 2050	Evaluación: Gobierno de Colombia (2021) Versión journal paper: Delgado et al. (2020)
Transporte	Estrategia Nacional de Transporte Sostenible [Gobierno Duque]		Mintransporte (2022)
Importaciones/ exportaciones, economía	Comprensión del impacto de la transición baja en carbono en Colombia	Análisis de riesgos económicos en la transición climática y energética	UA & WTW (2022)
Eólica costa afuera	Hoja de ruta Energía Eólica costa afuera	Análisis de energía eólica costa afuera: tecno-económico, ambiental y social, abastecimiento, financiero, marco regulatorio	World Bank et al (2022)
Transición energética general	Colombia, Potencia mundial de la vida. Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026	Bases del PND	Gobierno de Colombia (2022)
Transición energética general	Diálogo social para definir la hoja de ruta para la Transición Energética Justa en Colombia [Gobierno Petro]	Definición del proceso de elaboración de la hoja de ruta (la misma prevista para 2023)	Ministerio de minas y energía (2022a)

8.2 Alemania / Unión Europea

Tab. 4: Políticas de transición energética en Alemania, documentos seleccionados

Tema	Documento	Contenido	Autor/referencia
Escenarios de transición energética	Publicaciones	Análisis y comparación de escenarios de carbono neutralidad hasta 2050	SCI4climate.NRW (2022) Wiese et al. 23/6/23 11:47:00
Escenarios oficiales de gobierno	Langfristszenarien	Página web con acceso a los escenarios a largo plazo oficiales del gobierno para la descarbonización de Alemania	Fraunhofer ISI et al. (2023)
Ley de edificaciones	Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes, [...]	Ley de edificaciones, incluye regulación de sistemas de calefacción	BMWK (2023a)
Aceleración aumento de energías renovables	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien	Revisión de ley de energías renovables, incluye: clasificación de FNCRE como prioritario (permisos acelerados), licitaciones públicas aumentadas, subsidios para abastecimiento e hidrógeno, elevada remuneración para PV, ayudas a cooperativas energéticas, participación de entes locales etc.	BMJ (2022)

Tab. 5: Políticas de transición energética en la Unión Europea, documentos seleccionados

Tema	Documento	Contenido	Autor/referencia
Estrategia a largo plazo	A Clean Planet for all [...]	Estrategia para una Unión Europea a largo plazo (2050) neutro en emisiones GEI	European Commission (2019)
Estrategias nacionales mediano plazo	National Energy and Climate plans	Página con acceso a las estrategias nacionales a mediano plazo (2030)	European Commission (2020)
ETS: Sistema de certificados GEI	Infographic	Información sobre revisión acordada del sistema de certificados GEI (directiva en elaboración)	European Council (2023)
Regulación vehículos	Directive [...] setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles [...]	Revisión de directiva para UE: nuevos carros utilizando combustibles fósiles no se podrán vender en la UE	Directiva 2019/631/EU
Regulación construcción	Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)	Revisión 2023 incluye: restricciones y eliminación de sistemas de calefacción fósil, puntos de carga y parqueadero bicicletas mandatorio	Directiva 2010/31/EU
Asegurar cadenas de provisión seguros y sostenibles	Critical raw materials act	Revisión 2023 incluye: regulación de materiales críticos y estratégicos con referencias de extracción, procesamiento y reciclaje doméstico y concentración de importaciones	EU 2019/102