

TRANSICIÓN ENERGÉTICA JUSTA

Premisas de proyección





Transición Energética Justa / Premisas de proyección

© CAF-banco de desarrollo de América Latina y el Caribe- 2024

CORPORACION ANDINA DE FOMENTO- Av. Luis Roche, Torre CAF Urb.
Altamira, Caracas (Chacao) Miranda 1060, Venezuela. RIF: G200015470

Contribución de CAF a la Facilidad Climática del Club Internacional de Bancos
para el Desarrollo

Informe coordinado por la Gerencia de Acción Climática y Biodiversidad Positiva
(GACBP), la Gerencia de Conocimiento (GC) y la Gerencia de Infraestructura Física
y Transformación Digital (GIFTD).

Edgar Salinas, ejecutivo principal, Dirección de Operaciones y Financiación
Verde (GACBP).

Walter Cont, ejecutivo sénior, Dirección de Análisis Sectorial (GC).

Juan Ríos, ejecutivo principal, Dirección de Transportes y Energía (GIFTD).

Autores

El equipo de GME estuvo compuesto, en orden alfabético, por Agustín Ghazarian,
Coline Champetier, Darío Quiroga, Francisco Baqueriza, Nicolás Barros, Laura
Souilla, Ramón Sanz y Roberto Gomelsky.

Los autores agradecen a Edgar Salinas, Walter Cont y Juan Ríos por los comentarios,
las sugerencias y el apoyo para el desarrollo de este documento.

Gestión Editorial

Dirección de Comunicación Estratégica de CAF.

**Diseño gráfico universal neuroinclusivo, que contempla los principios de
accesibilidad y visualización para lectores neurodivergentes.**

CLEIMAN - <https://cleiman.com>

Fotografías

Portada: ©AdobeStock

Internas: © CAF - © Pexels

Versión digital disponible en scioteca.caf.com con acceso abierto bajo la licencia
Deed - Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional - Creative Commons



Las ideas y opiniones expresadas en esta obra son las de los autores y no reflejan
necesariamente el punto de vista de CAF ni comprometen a la Organización. Los
términos empleados y la presentación de los datos que en ella aparecen no implican
toma alguna de posición de parte de CAF en cuanto al estatuto jurídico de los países,
territorios, ciudades o regiones ni respecto de sus autoridades, fronteras o límites.



Transición Energética Justa

Premisas de proyección

Lista de abreviaciones	13
Capítulo 1 Objetivos	15-20
1. Objetivo general	16
2. Objetivos específicos	17
3. Organización de la serie Transición Energética Justa	18
4. Aspectos organizativos	19
5. Premisas de proyección	20

Capítulo 2
Apartado metodológico
y premisas

21-85

1. Modelado de proyección	22	Año base y horizonte de planeamiento	22
		Descripción general del modelo	22
2. Escenarios y marco global	26	Definición de los escenarios	26
		Proyecciones de las variables socioeconómicas	28
		PIB per cápita y PIB	28
		Población	32
		Principales premisas del sector energía	33
3. Demanda por sector	35	Sector residencial	35
		Punto de partida	35
		Premisas	38
		Usos de calor	38
		Usos eléctricos	43
		Sector comercial, servicios y público	45
		Punto de partida	45
		Premisas	46

Sector industrial	47
Punto de partida	47
Premisas	48
Sector transporte	52
Punto de partida	52
Premisas	54
Sector agropecuario, pesca, minería y construcción	65
Punto de partida	65
Premisas	68
Sector eléctrico	69
Punto de partida	69
Premisas	72
4. Inversiones	75
Sector eléctrico	76
Generación eléctrica: proyectos futuros	76
Inversiones en infraestructura y flexibilidad	78
Redes de transmisión y distribución	78
Generación eléctrica: desmantelamiento de centrales carboneras	79
Usos finales	80
Transporte carretero	80
Eficiencia energética, electrificación y uso de combustibles alternativos	83
Captura, uso y almacenamiento de carbono	84

Trabajos citados

86-87

Anexos

88-97

TABLAS Y GRÁFICOS



Tabla 1.

PIB total proyectado por país, PPP USD per cápita de 2017 y TCMC entre 2019 y 2060, % 30

Tabla 2.

Supuestos de reemplazo por combustible, país y escenario, uso cocción 40

Tabla 3.

Principales premisas de transición energética por escenario: sector comercial, servicios y público 47

Tabla 4.

Principales premisas de transición energética, por país y escenario, sector industrial 51

Tabla 5.

Principales premisas de transición energética, por país y escenario, transporte de pasajeros 60

Tabla 6.

Principales premisas de transición energética, por país y escenario, transporte de cargas 63

Tabla 7.

Principales premisas de transición energética por escenario, transporte aéreo, marítimo y fluvial, ferroviario 65

Tabla 8.

Principales supuestos de transición energética por escenario, sector agropecuario, pesca, minería y construcción 68

Tabla 9.

Evolución CAPEX por tecnología, NRE, USD/kW 77

Tabla 10.

Evolución CAPEX, generación carboneras, NREL, USD/kW 79

Tabla 11.

Evolución del costo total de propiedad para vehículos eléctricos e híbridos, USD 81

Tabla 12.

Costo total de propiedad para vehículos fósiles, USD 82

Tabla 13.

CAPEX equivalente por sector, USD/ton CO₂e absorbida/año 84

Tabla 14.

Fórmulas de regresión lineal por país 89

Tabla 15.

Tasa efectiva anual entre 1990 y 2021 por país 91

Gráfico 1.

Sectores, niveles de actividad y variables explicativas 24

Gráfico 2.

Evolución del PIB per cápita por país, PPP USD per cápita de 2017 29

Gráfico 3.

Distribución del PIB por sector y país, % 31

Gráfico 4.

Evolución de la población por país, tomando como base el año 2019 32

Gráfico 5.

Consumo de energía final unitario, por uso y país, año 2019, TJ/1.000 habitantes 36

Gráfico 6.

Consumo de combustible en el sector residencial, por país, año 2019, % 37

Gráfico 7.

Colombia: evolución del consumo de energía útil per cápita para usos de calor, entre 2010 y 2021, TJ/1.000 habitantes 39

Gráfico 8.

Colombia: regresión consumo electricidad vs. PIBpc, período entre 1990 y 2019 44

Gráfico 9.

Consumo de combustible por país, sector comercial, servicios y público, 2019 46

Gráfico 10.

Consumo de combustible en el sector industrial, por país, año 2019 48

Gráfico 11.

Demanda de energía por uso y por combustibles, sector transporte, año 2019 53

Gráfico 12.

Relación entre la tasa de propiedad de motocicletas/automóviles y el PIB per cápita 55

Gráfico 13.

Consumo por combustible y por subsector en el sector agropecuario, pesca, minería y construcción, año 2019, % 67

Gráfico 14.

Capacidad instalada y generación eléctrica, año 2019, % 70

Gráfico 15.

Recurso solar potencial (kWh/kWp) y velocidad media del viento a 100 m (m/s) 71

Gráfico 16.	Comparativo PIB per cápita, consumo eléctrico	93
Gráfico 17.	Comparativo PIB per cápita, IDH	94
Gráfico 18.	Comparativo IDH, consumo eléctrico per cápita	95
Gráfico 19.	Comparativo IDH, consumo eléctrico mayor que 5.000 kWh	96
Gráfico 20.	Comparativo PIB, IDH (consumo eléctrico mayor que 5.000 kWh)	97

Lista de abreviaciones

ACS	agua caliente sanitaria
AFOLU	agricultura, ganadería, forestación y otros usos del suelo (<i>agriculture, forestry and other land use</i>)
AIE	Agencia Internacional de Energía (<i>International Energy Agency [IEA]</i>)
BAU	<i>Business as usual</i>
CAPEX	gastos de capital (<i>capital expenditures</i>)
CCUS	tecnología de captura, uso y almacenamiento de carbono (<i>carbon capture, use and storage</i>)
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CIIU	Clasificación Internacional Industrial Uniforme
EE	eficiencia energética
ERNC	energías renovables no convencionales
GEI	gases de efecto invernadero
GLP	gas licuado de petróleo
GNC	gas natural comprimido
GNL	gas natural licuado
IDH	índice de desarrollo humano
IREES	Instituto de Eficiencia de los Recursos y Estrategias Energéticas (<i>Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien</i>)

IRENA	Agencia Internacional de las Energías Renovables <i>(International Renewable Energy Agency)</i>
LEAP	plataforma de análisis de bajas emisiones <i>(low emissions analysis platform)</i> del SEI
NREL	Laboratorio Nacional de Energías Renovables <i>(National Renewable Energy Laboratory)</i>
NZ	<i>net zero</i>
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
O&M	operación y mantenimiento
PIB	producto interno bruto
PIBpc	producto interno bruto per cápita
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PPP	paridad del poder adquisitivo <i>(purchasing power parity)</i>
SEI	Instituto Ambiental de Estocolmo <i>(Stockholm Environment Institute)</i>
SieLAC	Sistema de Información Energética de América Latina y el Caribe
TCMC	tasa de crecimiento medio compuesta <i>(compound average growth rate)</i>
TEJ	transición energética justa
TJ	terajulio
UPME	Unidad de Planeamiento Minero Energético de Colombia
NU	Naciones Unidas
VE	vehículos eléctricos



1. Objetivo general

El objetivo general del proyecto fue desarrollar un enfoque metodológico para la definición del concepto de transición energética justa (TEJ) en un contexto nacional, con potencial de aplicación en los países miembro de CAF —banco de desarrollo de América Latina y el Caribe— y evaluar el enfoque propuesto en Brasil, Colombia, México, Perú y República Dominicana.



2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este informe son:

1. definir un enfoque metodológico para el abordaje integral de la transición energética justa en la región;
2. establecer el diagnóstico de los sistemas energéticos y —en particular, eléctricos— nacionales (países objetivo) en el ámbito del proceso de transición energética;
3. definir escenarios nacionales del modelo de desarrollo bajo en carbono de la transición energética en los países objetivo, que incluyan aquellos elementos a electrificarse en sectores energéticos actualmente no atendidos por el sector eléctrico dentro de las prospectivas de requerimientos;
4. modelar las alternativas viables de transición energética en el contexto previamente definido.

3. Organización de la serie Transición Energética Justa

El trabajo para alcanzar los objetivos indicados se desarrolló entre octubre de 2022 y octubre de 2023. La serie se organizó en siete informes.

1. Transición Energética Justa / Marco conceptual para la región, Análisis en el contexto nacional
2. Transición Energética Justa / Premisas de proyección
3. Transición Energética Justa / Escenarios Brasil
4. Transición Energética Justa / Escenarios Colombia
5. Transición Energética Justa / Escenarios México
6. Transición Energética Justa / Escenarios Perú
7. Transición Energética Justa / Escenarios República Dominicana

Los informes por país se organizaron siguiendo el orden alfabético de sus nombres.

4. Aspectos organizativos

Este informe ha sido financiado por CAF y se publica para comunicar los resultados y conclusiones obtenidos a la comunidad interesada en el desarrollo de América Latina. Por consiguiente, el documento no se elaboró siguiendo los procedimientos propios de un documento oficial. Algunas de las fuentes citadas en este informe podrían ser documentos informales de difícil obtención.

Las conclusiones y opiniones expresadas aquí son exclusivamente las de sus autores y no deben atribuirse a CAF o GME, sus organizaciones afiliadas o directores ejecutivos y no reflejan necesariamente sus puntos de vista.

CAF y GME no garantizan la exactitud de los datos incluidos en esta publicación y no aceptan responsabilidad alguna por las consecuencias de su uso. Los colores, bordes, nombres y clasificaciones de cualquier mapa de este informe no implican juicio de CAF sobre la condición jurídica o de otro tipo de los territorios, ni la aprobación o aceptación de dichas fronteras.

Los informes de esta serie son documentos de debate y, por lo tanto, están sujetos a los mismos derechos de autor que otras publicaciones de CAF.

CAF promueve la difusión de sus trabajos y autoriza su reproducción inmediata, a título gratuito, si no se usan para fines comerciales.

Edgar Salinas, Juan Ríos y Walter Cont de CAF formaron un grupo de trabajo que estableció los términos de referencia y desarrollo de los mencionados informes por parte de los consultores de GME.

El equipo de GME estuvo compuesto, en orden alfabético, por Agustín Ghazarian, Coline Champetier, Darío Quiroga, Francisco Baqueriza, Nicolás Barros, Laura Souilla, Ramón Sanz y Roberto Gomelsky.

5. Premisas de proyección

El objetivo de este informe es describir de forma más detallada las hipótesis, las premisas, los criterios y la metodología aplicados para elaborar los escenarios de transición energética del modelo de la plataforma de análisis de bajas emisiones (LEAP, por sus siglas en inglés).

El informe presenta la estructura general del modelo, los escenarios y la proyección de las variables socioeconómicas, las premisas y los aspectos metodológicos detallados para cada sector de demanda, la proyección del sector eléctrico y las hipótesis usadas para estimar las inversiones necesarias para cada escenario.

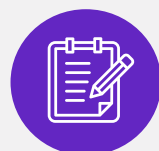


1. Modelado de proyección



Año base y horizonte de planeamiento

El año base considerado para la proyección es el año 2019. El horizonte de planeamiento se inicia en 2019 y termina en 2060.



Descripción general del modelo

Para la realización del estudio se utilizó el modelo LEAP, desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI, por sus siglas en inglés). El modelo LEAP es una herramienta (software) utilizada para el análisis de políticas energéticas y la evaluación de la mitigación del cambio climático. En este caso, se lo utilizó para la modelización de las emisiones del sector energía relacionadas con la quema de combustibles en cada país estudiado.

En términos de metodologías de modelado, el modelo LEAP es particularmente versátil.

- Se parte de la información de los balances energéticos que garantizan la integridad de la información que se está utilizando.
- La demanda energética se puede proyectar utilizando metodologías:
 - *bottom-up* (de abajo hacia arriba), a partir de datos específicos detallados para llegar a una proyección total, o
 - *top-down* (de arriba hacia abajo).

En este trabajo, se optó por un modelado *bottom-up* y se dividió la demanda en sectores (residencial, industrial, transporte, etc.) que, a su vez, se subdividieron en ramas y usos.

- La oferta energética brinda una amplia gama de metodologías de simulación que permiten estimar un despacho anual de generación de electricidad o incorporar los resultados de otros modelos de optimización más especializados utilizando las demandas producidas con el modelo LEAP¹.

Los sectores de demanda modelados se proyectan según un nivel de actividad y una variable explicativa, resumidos simplificadaamente en el gráfico 1.

¹ En el marco de este estudio, se utilizaron únicamente las herramientas de simulación del modelo LEAP. No se incorporaron resultados de despacho de otros programas.

Gráfico 1 ▶ Sectores, niveles de actividad y variables explicativas

Sector	Nivel de actividad	Variable explicativa
Residencial	Población	Consumo per cápita
Transporte carretero	Variable objetivo, parque automotor	Consumo promedio por vehículo
Transporte no carretero	PIB total	Intensidad energética
Industrial	PIB sectorial	Intensidad energética por rama y usos
Comercial, servicios y público	PIB sectorial	Intensidad energética
Agropecuario, pesca, minería y construcción	PIB sectorial	Intensidad energética

Fuente: Elaboración propia.

El producto interno bruto (PIB) sectorial es uno de los principales motores de crecimiento de la demanda de energía, en particular, para los sectores productivos, mientras que la evolución de la población desempeña un papel preponderante en el crecimiento de la demanda de energía del sector residencial. El sector transporte carretero depende de la evolución de la cantidad de vehículos que, a su vez, está relacionada con el PIB per cápita en el caso del transporte de pasajeros y el PIB en el caso del transporte de cargas. El transporte no carretero se proyecta en función del PIB global.

A continuación, se describen con más detalle los escenarios propuestos y la modelación adoptada para este estudio por sectores de demanda y para el sector eléctrico. Dado que la estrategia de descarbonización busca sustituir combustibles fósiles (carbón mineral, petróleo y sus derivados, gas natural, etc.), la cadena de valor asociada a estos combustibles no se analizó en detalle sobre la presunción de que existirá oferta suficiente.



2. Escenarios y marco global



Definición de los escenarios

Se estudiaron tres escenarios para caracterizar diferentes caminos hacia una transición energética justa.

A Escenario *Business as Usual*

El escenario *Business as Usual* (BAU) representa la evolución esperada siguiendo los lineamientos de políticas públicas nacionales y tendencias actuales. En este escenario, se reconocen las políticas observadas y en desarrollo orientadas a la reducción de emisiones. Por ejemplo, se toman en cuenta los avances de la región en materia de introducción de energías renovables (socializando —al principio— el mayor costo a través de los mercados mayoristas y licitaciones); eficiencia energética (instrumentando el etiquetado y los estándares mínimos de eficiencia energética [MEPS, por sus siglas en inglés]); eliminación paulatina del carbón y el fueloil en las matrices energéticas y producción de biocombustibles para el transporte, etc.

En este escenario, se buscará introducir tasas de evolución consistentes con el pasado, sobre todo, durante los primeros años de la proyección.

B Escenario *Net Zero 2050*

Este escenario establece el horizonte de tiempo más ambicioso, con un cumplimiento inmediato de lo establecido en el artículo 4 del Acuerdo de París². Este escenario se enfoca en disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector energía³ a un mínimo permisible⁴, de modo que el país logre gestionar la absorción de CO₂ en el balance general del inventario nacional de GEI⁵. El escenario *Net Zero* toma como objetivo que las emisiones de GEI sean iguales a los ahorros que producen los sumideros en cada país de la región.

C Escenario *Net Zero 2060*

En concordancia con el Acuerdo de París, que establece alcanzar el equilibrio de emisiones en la segunda mitad del siglo, el escenario *Net Zero 2060* (NZ 2060) plantea un horizonte de tiempo más realista en función de las realidades de la región y considera un mínimo de 10 años más allá del escenario *Net Zero 2050* (NZ 2050). El escenario NZ 2060 debería permitir la gradualidad de ajustes necesarios al marco regulatorio y prácticas de mercado, nivelación de costos de tecnologías y amortización de activos, entre otros aspectos. Según las proyecciones elaboradas para el crecimiento del PIB, se espera que los países se

² Acuerdo de París, párrafo 4.1: “alcanzar un equilibrio entre las emisiones antropógenas por las fuentes y la absorción antropógena por los sumideros en la segunda mitad del siglo”.

³ El análisis realizado se centra en las emisiones relacionadas con la quema de combustibles, tanto en los procesos de demanda de energía por sector, como en la generación eléctrica. Las emisiones de GEI provenientes de otros sectores (por ejemplo, procesos industriales, desechos, emisiones fugitivas, etc.) no se detallan en este estudio, pero se las estima a grandes rasgos y se las sustrae para la estimación del potencial de reducción nacional.

⁴ Se entiende que la reducción de emisiones se debe lograr mediante una articulación efectiva de medidas regulatorias, promoción de eficiencias de mercado, transferencia de tecnología e inversiones.

⁵ Se espera que las absorciones de CO₂ provengan de medidas implementadas en el sector agricultura, ganadería, forestación y otros usos del suelo (AFOLU, por sus siglas en inglés) o por la vía de adopción de tecnologías de captura, uso y almacenamiento de CO₂ (CCUS, por sus siglas en inglés).

aproximen a las características de consumo e índice de desarrollo humano (IDH) necesarias para un desarrollo sostenible entre 2050 y 2070.

Al igual que el anterior, este escenario se enfoca en disminuir las emisiones de GEI del sector energía a un mínimo permisible, de modo que el país logre gestionar la absorción de CO₂ en el balance general del inventario nacional de GEI. El escenario NZ toma como objetivo que las emisiones de GEI sean iguales a los ahorros que producen los sumideros en cada país de la región.



Proyecciones de las variables socioeconómicas

PIB per cápita y PIB

En línea con el planteamiento de una **transición energética justa**, los escenarios se acompañan de un desarrollo socioeconómico similar en la región, **alcanzando niveles de PIB per cápita suficientes para ser considerados países de altos ingresos**.

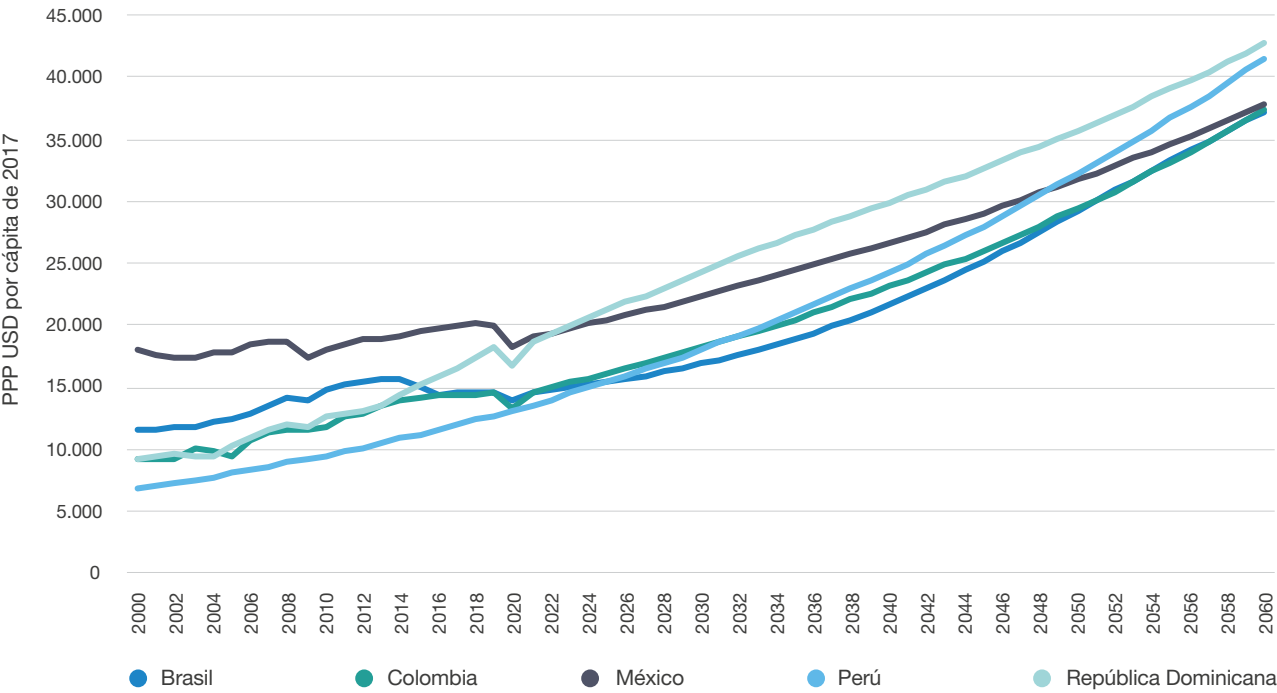
Para definir la meta del nivel de PIB per cápita consistente con un nivel de vida digno, se consideraron dos criterios: el IDH y el consumo eléctrico per cápita. A partir de estos criterios, se determinó:

- el PIB promedio del quintil inferior de países con muy alto IDH ($\geq 0,8$) y
- el PIB promedio del quintil inferior de los países con consumos eléctricos mayores que 5.000 kWh per cápita/año. Este valor se utiliza en la planificación energética para considerar cuáles son los países industrializados y desarrollados.

Estos datos se definen como los valores de referencia que los países deben alcanzar para tener un nivel de vida digno. El PIB per cápita meta (medido en dólares estadounidenses [USD], paridad del poder adquisitivo [PPP, por sus siglas en inglés] con base en 2017) de acuerdo con el primer indicador es de USD 21.000 y de USD 33.000 para el segundo indicador. Por lo cual, se consideró este segundo valor como el valor de referencia para los objetivos planteados en el artículo 4 del Acuerdo de París. Este valor es compatible con un IDH $\geq 0,8$.

Las proyecciones del PIB se realizaron mediante modelos estocásticos detallados en anexo. El PIB per cápita por país resultante se presenta en el gráfico 2 y el PIB por país se presenta en la tabla 1:

Gráfico 2 ► Evolución del PIB per cápita por país, PPP USD per cápita de 2017



Fuente: Elaboración propia.

El PIB total se calcula a partir del PIB per cápita y de la proyección de la población presentada en el subapartado “Población”. Se espera un crecimiento sostenido para todos los países estudiados, aproximadamente entre 2 % y 3,5 % con diferencias que reflejan el nivel del PIB per cápita inicial y las tendencias históricas recientes.

Tabla 1 ▶ PIB total proyectado por país, PPP USD per cápita de 2017 y TCMC entre 2019 y 2060, %

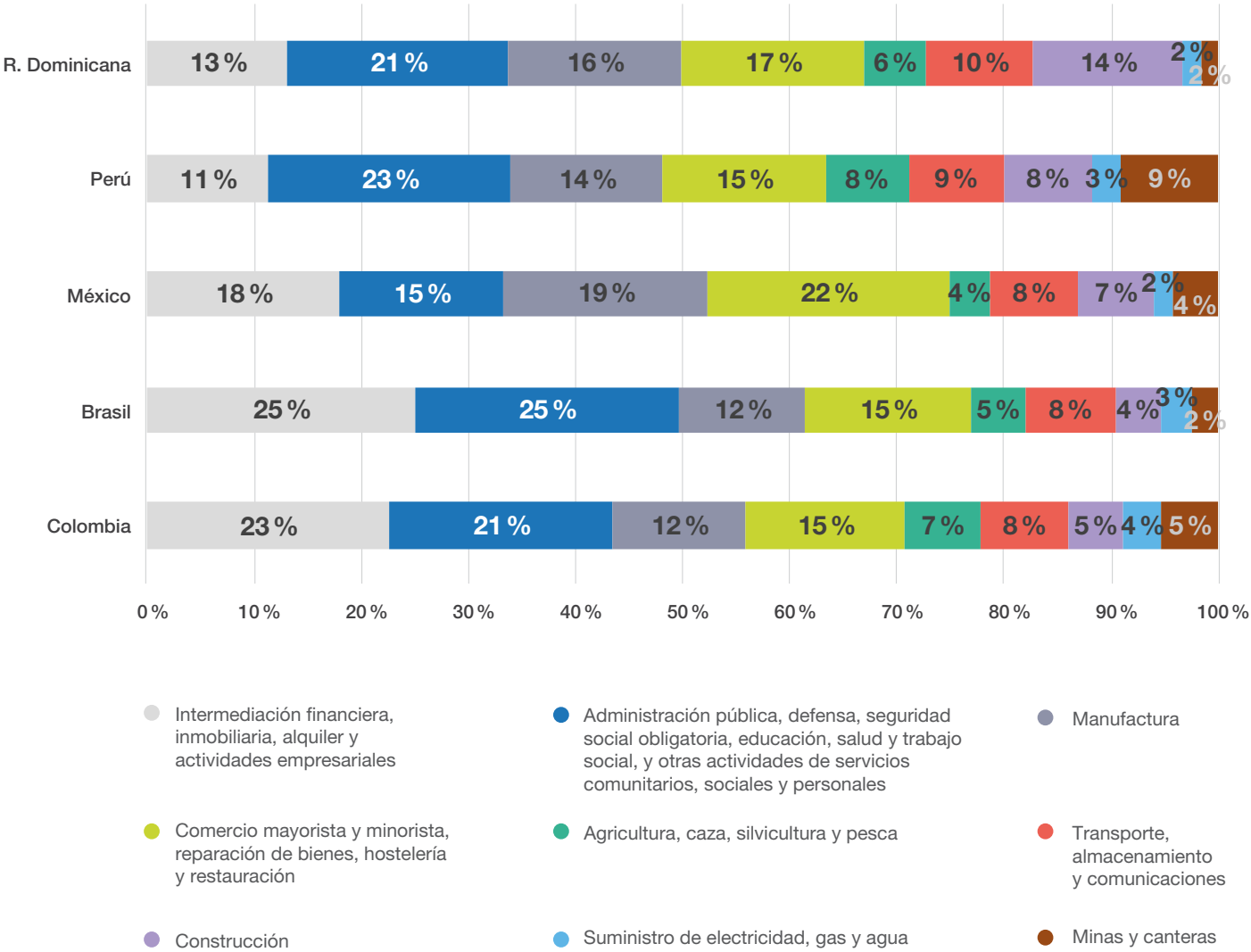
	2019	2030	2040	2050	2060	TCMC período
BRA	3.110.059	3.779.951	4.996.912	6.736.951	8.460.524	2,5 %
COL	733.546	984.185	1.301.385	1.674.808	2.109.590	2,6 %
MÉX	2.509.774	3.006.961	3.757.355	4.564.218	5.403.887	1,9 %
PER	418.610	661.382	965.078	1.350.929	1.807.592	3,6 %
RDO	197.736	291.340	379.659	471.112	571.919	2,6 %

Fuente: Elaboración propia.

El PIB por sector se proyecta suponiendo que se mantiene la proporción de cada sector conforme a los valores de 2021 (véase el gráfico 3). Esto se traduce en una tasa de crecimiento del PIB por sector igual a la tasa de crecimiento del PIB total⁶.

⁶ Esta premisa busca simplificar el trabajo de simulación.

Gráfico 3 ▶ Distribución del PIB por sector y país, %



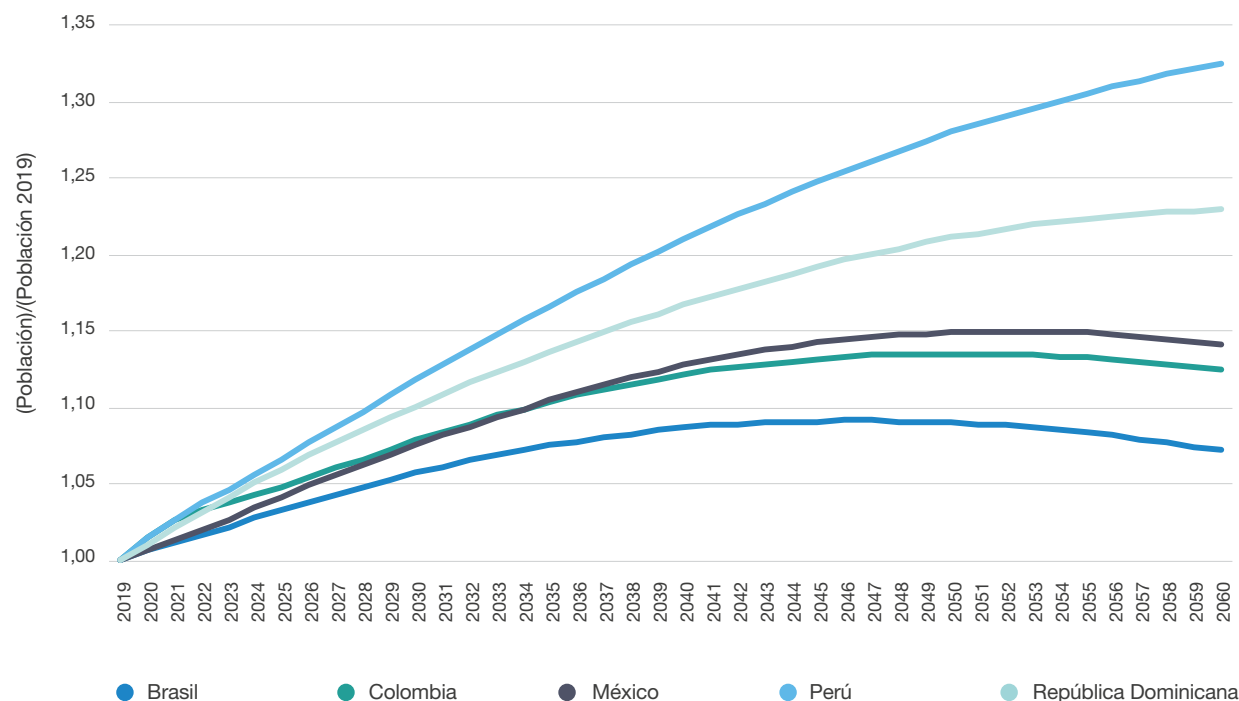
Fuente: Elaboración propia con base en datos históricos de la CEPAL.

Población

En cuanto a la proyección de la población, se utilizaron las proyecciones elaboradas por Naciones Unidas y CEPAL⁷. Se espera una desaceleración del crecimiento de la población en el futuro, con un crecimiento negativo a largo plazo en Brasil, Colombia y México. El gráfico 4 muestra la evolución de la población en cada país respecto a 2019.

Gráfico 4

► Evolución de la población por país, tomando como base el año 2019



Fuente: Elaboración propia con base en datos de la CEPAL
<https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=1&lang=es>

⁷ <https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=1&lang=es>



Principales premisas del sector energía

El marco general del estudio engloba la definición de premisas para cinco países analizados en la serie. Si bien cada país tiene sus características propias, el estudio uniformizó, cuando es posible, las premisas utilizadas, asumiendo que los países atravesarán procesos similares para la transición energética justa. Se consideraron las particularidades inherentes a cada país, como la industria del carbón en Colombia, los biocombustibles en Brasil, el gas natural a precios muy competitivos en México, el gas en Perú y la escasez de recursos naturales fósiles en República Dominicana, entre otros.

Para alcanzar los objetivos de descarbonización planteados en cada escenario, las premisas consideradas fueron más ambiciosas en el caso de los escenarios NZ. Las principales premisas se basan en las medidas a continuación.

- **Mejoras en la eficiencia energética.** Esto se aplica en todos los sectores, con reemplazos de equipamientos, mayor eficiencia térmica de las viviendas, optimización del uso de energía en los procesos industriales y recambio tecnológico hacia aparatos e instalaciones más eficientes, mayor eficiencia de los vehículos de transporte, etc.
- **Cambios de conductas.** Esto se refiere, en particular, a la reducción de los recorridos medios por vehículos (km/vehículo), como consecuencia de la digitalización de la sociedad (teletrabajo, etc.), del desarrollo del transporte público, de mejoras logísticas y transferencia del transporte de carga de camiones al sistema ferroviario.
- **Sustitución de combustibles.** En la mayoría de los sectores, se tiende a una mayor electrificación de los usos, a excepción de los usos o ramas industriales donde hay baja posibilidad de electrificación. En estos casos, el reemplazo de los combustibles más contaminantes por gas natural o el uso de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ son las opciones

proyectadas. El hidrógeno y derivados de bajas emisiones pueden también contribuir a la descarbonización del sector industrial (fertilizantes, refino) y transporte terrestre pesado, marítimo y aéreo (combustibles sintéticos).

- **Matriz de generación eléctrica con tecnologías no fósiles.** Se incentiva un desarrollo muy significativo de energías renovables y, en algunos casos, nuclear, y el cierre de centrales a carbón y combustibles líquidos. Es importante recordar que la composición de la generación eléctrica es clave en escenarios donde se plantea una fuerte electrificación de la matriz de consumo para garantizar que esta sustitución tenga el efecto esperado en términos de reducción de GEI. Esta integración de energías renovables deberá acompañarse del desarrollo de infraestructuras de red, redes inteligentes y baterías para facilitar la integración de la generación eléctrica variable.

Para las premisas relativas al sector energético, la bibliografía analizada engloba tanto documentos generales que marcan lineamientos para todos los países como particulares de acuerdo con la realidad de cada uno de los mismos.



3. Demanda por sector



Sector residencial

Punto de partida

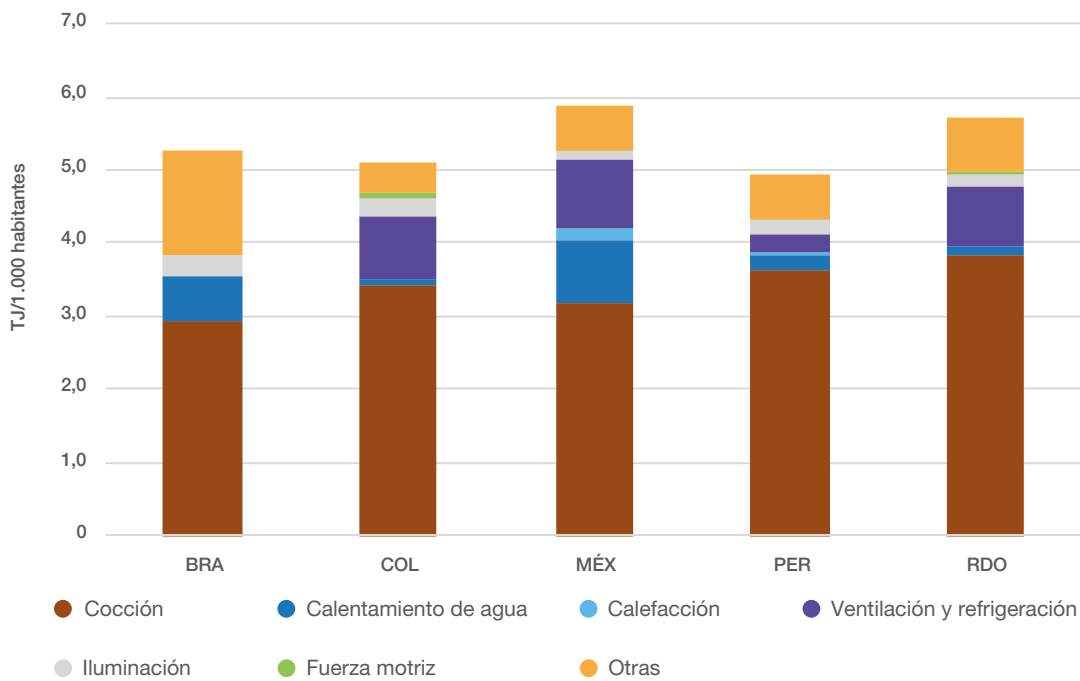
Para analizar y proyectar el consumo energético del sector residencial, se estima la **proyección de la población y del consumo unitario** por uso y por fuente per cápita.

- **Consumo por usos.** El consumo residencial presenta dos tipos de usos⁸, los usos de calor (mayormente: cocción, agua caliente sanitaria [ACS], calefacción) que utilizan distintas fuentes de energías (combustibles, electricidad, energías renovables) con potencial de sustitución y los usos eléctricos (iluminación, refrigeración, aire acondicionado, etc.).

⁸ Cabe destacar que esta clasificación se refiere al uso final, no así al combustible utilizado, pudiendo existir parte del uso de calor suministrado con energía eléctrica. Al contrario, los usos llamados “eléctricos” son únicamente suministrados por electricidad.

Gráfico 5

► Consumo de energía final unitario, por uso y país, año 2019, TJ/1.000 habitantes



Fuente: Elaboración propia con base en datos de (EPE, 2019), (UPME, 2019), (SENER, 2022), (Engrinter, Mercados Energéticos Consultores, Datum, 2016) y (Fundación Bariloche, 2020).

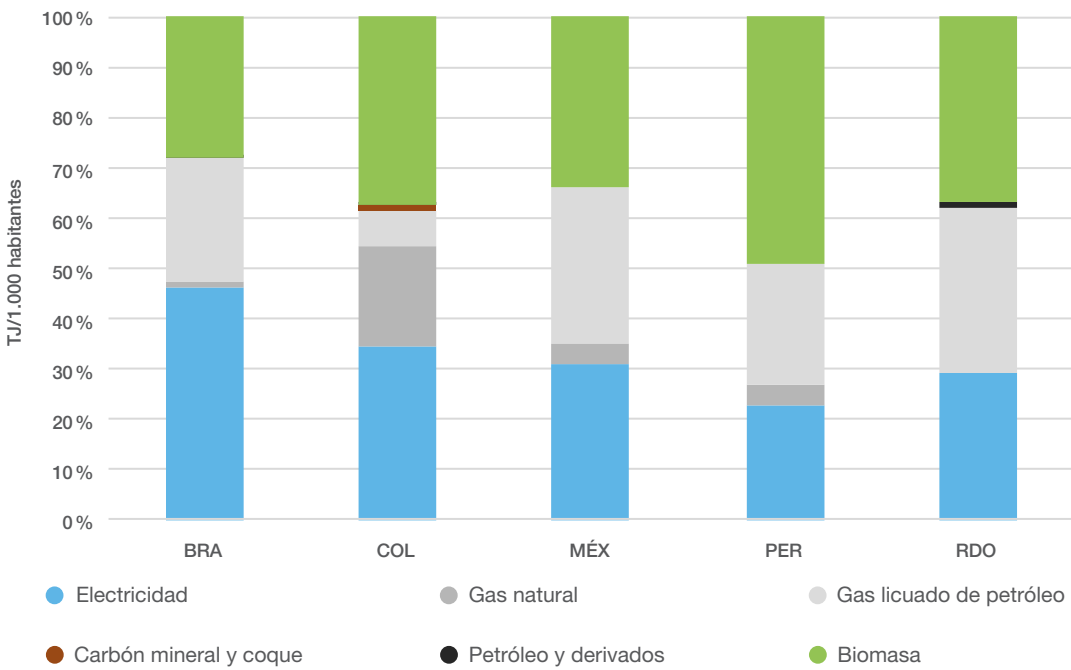
En los países estudiados, la cocción es el uso con mayor consumo de energía final en el sector residencial, superando en todos los casos el 50 % del mismo, mientras los consumos de calefacción y fuerza motriz son muy menores. Además, el uso calentamiento de agua es poco significativo en Colombia, Perú y República Dominicana.

El consumo energético residencial se ubica entre 5 y 6 TJ/1.000 habitantes en los cinco países.

- **Consumo por combustibles.** En general, el sector residencial presenta un alto consumo de biomasa, en particular para el uso cocción, debido a su disponibilidad y el nivel de desarrollo de los países analizados. Si bien el consumo de energía eléctrica viene en aumento, no es el combustible predominante en el sector.

Gráfico 6

► Consumo de combustible en el sector residencial, por país, año 2019, %



Fuente: Elaboración propia con base en datos del sieLAC, OLADE.

Premisas

Los usos de calor y los usos eléctricos, que responden a diferentes dinámicas históricas y potencial evolución futura, se analizan por separado⁹. Los siguientes subapartados describen la metodología de proyección utilizada para cada uso. A modo ilustrativo, se presentan gráficos de correlación correspondiente al caso de Colombia. Este proceso se replicó para cada país del estudio.

Usos de calor

Los usos de calor, donde predomina la cocción por sobre los usos calentamiento de agua y calefacción, presentan un gran potencial de **electrificación**. El reemplazo del uso de la leña puede derivar en grandes ganancias en **eficiencia**¹⁰.

A Cocción

Se analizan las tendencias históricas de consumo en términos de energía útil¹¹ por 1.000 habitantes, que se usan para la proyección para el futuro. Se plantean supuestos de sustituciones de combustibles por escenario (que corresponden al reemplazo de la leña por artefactos de cocción eléctricos o a gas natural).

⁹ Al analizar la elasticidad del ingreso del consumo residencial final per cápita respecto del PIBpc en cada uno de los países analizados, se concluye que esta no resulta una buena estimación para proyectar el consumo residencial y es necesario analizar los usos de calor por un lado y los usos eléctricos por otro lado.

¹⁰ La sustitución por energía eléctrica (o gas natural) genera un aumento en la relación energía útil/energía final, lo cual promueve una disminución en la intensidad energética (consumo energético per cápita).

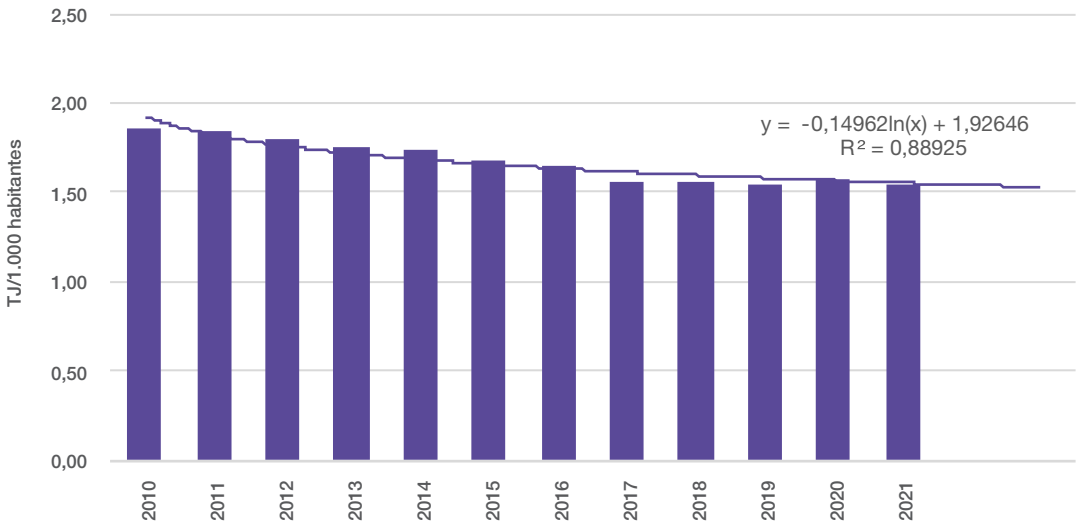
¹¹ Según OLADE, BID, 2017, la energía final “es la cantidad de fuente energética que se consume en cada uno de (los) sectores económicos y sociales del país”. Por otra parte, la energía útil “es la cantidad de energía realmente utilizada para cumplir la tarea productiva del equipo o aparato consumidor, por ejemplo, el calor necesario que deban absorber los alimentos para cocinarse”.

Tendencias históricas de consumo en términos de energía útil

El gráfico 7 ejemplifica el análisis del consumo histórico de combustible por 1.000 habitantes para los usos de calor en Colombia, así como la proyección considerada para este caso (véase la ecuación).

Gráfico 7

► Colombia: evolución del consumo de energía útil per cápita para usos de calor, entre 2010 y 2021, TJ/1.000 habitantes



Fuente: Elaboración propia con base en datos del sieLAC, OLADE.

La tendencia histórica decreciente ilustra tanto las ganancias en eficiencia energética del uso cocción (utilización de equipos más eficientes) como también los cambios de conductas (tendencia a cocinar menos tiempo), que se espera, seguirán en el futuro¹².

Supuestos de sustituciones de combustibles

El combustible utilizado (efecto sustituciones) dependerá tanto del país en estudio como del escenario y alcanzará niveles de electrificación mayores en los escenarios NZ y una tendencia similar a la histórica en el escenario BAU, tal como se ilustra en la tabla 2 (las metas están expresadas en términos de energía útil).

Tabla 2 ▶ Supuestos de reemplazo por combustible, país y escenario, uso cocción

	País	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Leña	Todos	Reemplazo total de la leña a largo plazo (reemplazo acelerado para los escenarios NZ).		
Electricidad	Todos	2060: baja penetración eléctrica (≤40 %), excepto Brasil (50 %).	2050 y 2060: mayormente eléctrico (≥80 %).	
GN y GLP	Todos	2060: alta penetración de GN y GLP (≥50 %). 50 % para Brasil. Solo GLP para República Dominicana.	2050 y 2060: participación restante. República Dominicana: solo GLP.	

Fuente: Elaboración propia.

12 Al analizar la tendencia histórica, se considera que ya se incorporan elementos de eficiencia energética debido a la utilización de equipos más eficientes, que reducen la energía final demandada. Por lo tanto, no se realizaron supuestos extra de eficiencia en el segmento cocción.

Los escenarios NZ plantean mayor ambición en sustitución de combustibles, principalmente la electrificación, mejoras en la eficiencia energética y cambios de conducta. Esto implica un aumento significativo en la demanda eléctrica. Las tecnologías no fósiles son clave para alcanzar los bajos niveles de emisiones requeridos.

B Agua caliente sanitaria

Si bien en la actualidad representa un uso menor en América Latina, se entiende que el aumento del poder adquisitivo (PIB per cápita) puede estar acompañado de un aumento del consumo per cápita del agua caliente sanitaria en el futuro.

En los países de la Unión Europea (los cuales poseen, en general, un PIB per cápita similar al objetivo del PIB per cápita de largo plazo planteado para los tres escenarios), la intensidad energética para el consumo de agua caliente sanitaria alcanza en promedio 3,5 TJ/1.000 habitantes y es muy variable entre los distintos países. En los cinco países estudiados, Brasil y México parten de un consumo de 0,8 TJ/1.000 habitantes mientras que los demás, de un consumo menor a 0,2 TJ/1.000 habitantes. De los países de la Unión Europea, se toma como referencia el consumo de energía útil en Portugal (1,4 TJ/1.000 habitantes, año 2019), debido a que es un país con un clima similar a la región y a que cumple con los indicadores de los países objetivo definidos al momento de estimar los crecimientos del nivel de actividad.

En el caso de Brasil, Colombia, Perú y México, para el escenario BAU, se optó por utilizar un objetivo de un 75 % del consumo actual de Portugal en energía útil para el año 2060 y se conserva el *fuel share* actual para este uso. El ahorro del 25 % corresponde a una mejora de eficiencia de 0,7 % anual respecto a la situación actual, en línea con el rango manejado por la Agencia Internacional de Energía (AIE). Este uso se considera fuertemente eléctrico, ya que es un uso que se desarrollará casi por completo.

Por otra parte, para los escenarios NZ se debe alcanzar una mejora en la eficiencia todavía mayor, del 50 %. El consumo de combustible fósil en estos casos se elimina, siendo el restante eléctrico y solar (60 % y 40 %, respectivamente).

Por otra parte, en República Dominicana, se consideró el incremento del consumo en calentamiento de agua proporcional al incremento del PIB por entender que la mayor riqueza conlleva a mayor confort; sin embargo, no se desarrollará este uso a niveles de los países objetivo debido al clima caluroso.

C Calefacción

De forma similar al punto anterior, los países estudiados presentan hoy en día un consumo muy menor de calefacción ($\leq 0,2$ TJ/1.000 habitantes). En Portugal, el uso para calefacción asciende a 3,7 TJ/1.000 habitantes en energía final (2,2 TJ/1.000 habitantes en energía útil). Nuevamente, para Colombia, Perú y México se considera un objetivo del 75 % del consumo actual en Portugal para el año 2060 (es decir, una mejora de la eficiencia de 0,7 % anual respecto de la situación actual, en línea con el rango manejado por la AIE). Para los escenarios NZ, se debe alcanzar una mejora en la eficiencia todavía mayor, del 50 %.

Por tratarse de un uso por desarrollar, se entiende que tecnologías más competitivas en cuanto al costo ingresarán en el mercado. Por lo tanto, se prevé que la calefacción será mayormente eléctrica por tratarse de un consumo que se desarrollará casi desde cero.

Debido a que gran parte de la población brasileña vive en zonas de climas más cálidos que Portugal, los objetivos definidos para este país son menores que los objetivos seleccionados para Colombia, Perú y México. Por último, no se prevé la utilización de calefacción en República Dominicana debido a su clima cálido.

Usos eléctricos

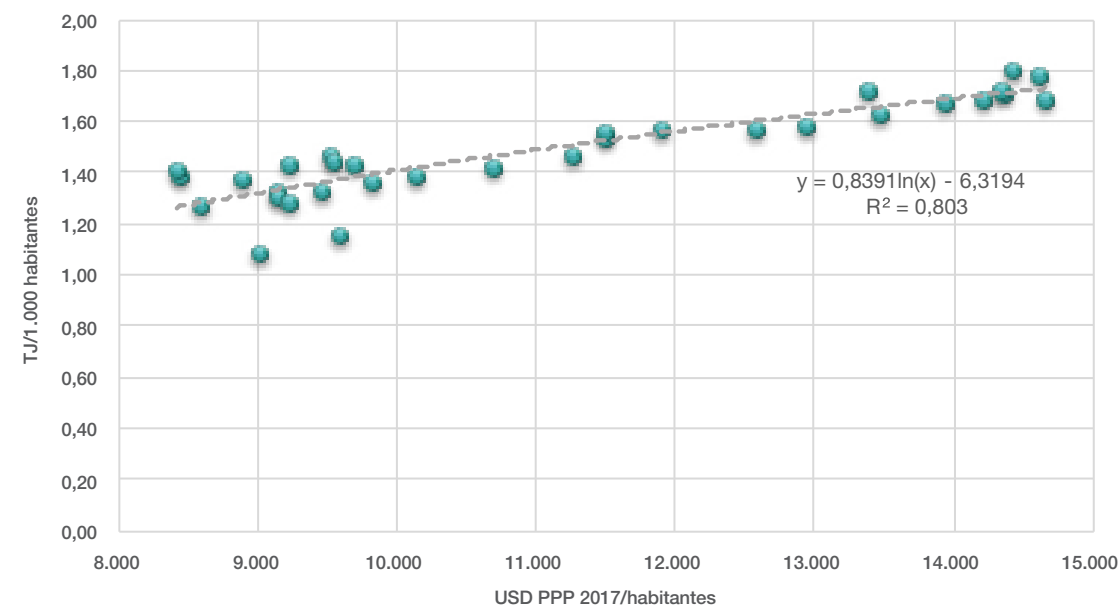
Los usos eléctricos¹³ (iluminación, refrigeración, aire acondicionado, bombeo de agua, etc.) no presentan potencial de sustitución. El incremento futuro del PIB per cápita se puede acompañar de **eficiencia energética** (EE), pero también de **consumos adicionales de electricidad** (adquisición de nuevos electrodomésticos, aire acondicionado, etc.).

¹³ Dentro de esta rama se encuentran las siguientes categorías: electrónicos, fuerza motriz, iluminación, otros, refrigeración y televisión.

Para proyectar el consumo eléctrico, se realizó una regresión contra el PIBpc, en términos de **energía final**¹⁴, como se muestra en el gráfico 8 para el caso colombiano. Esta elasticidad histórica refleja el aumento de los usos eléctricos con el nivel de vida y es idéntica en los tres escenarios.

Gráfico 8

► Colombia: regresión consumo electricidad vs. PIBpc, período entre 1990 y 2019



Fuente: Elaboración propia con base en datos del sieLAC, OLADE.

¹⁴ Los usos eléctricos, por los cuales no existe potencial de sustitución por otros combustibles, se deben analizar en términos de energía final, mientras que los usos calor se deben analizar en términos de energía útil para eliminar el impacto de la eficiencia de cada combustible/proceso al momento de considerar sustituciones.

Por otro lado, se plantearon supuestos de eficiencia energética por escenario.

- i. **Escenario BAU.** Se considera entre 0,5 % y 1,0 % anual para todos los usos.
- ii. **Escenarios NZ 2050 y NZ 2060.** Se prevé una mejora en eficiencia superior, entre 1,0 % y 1,5 %, para alcanzar las metas de neutralidad de carbono.

A modo de referencia, según la AIE (IEA, 2022), la **eficiencia energética (EE)** en el sector residencial mejoró en una tasa de entre 1,5 % y 2,0 % anual en el período comprendido entre 2000 y 2015 y solo 0,5 % anual entre 2016 y 2020.



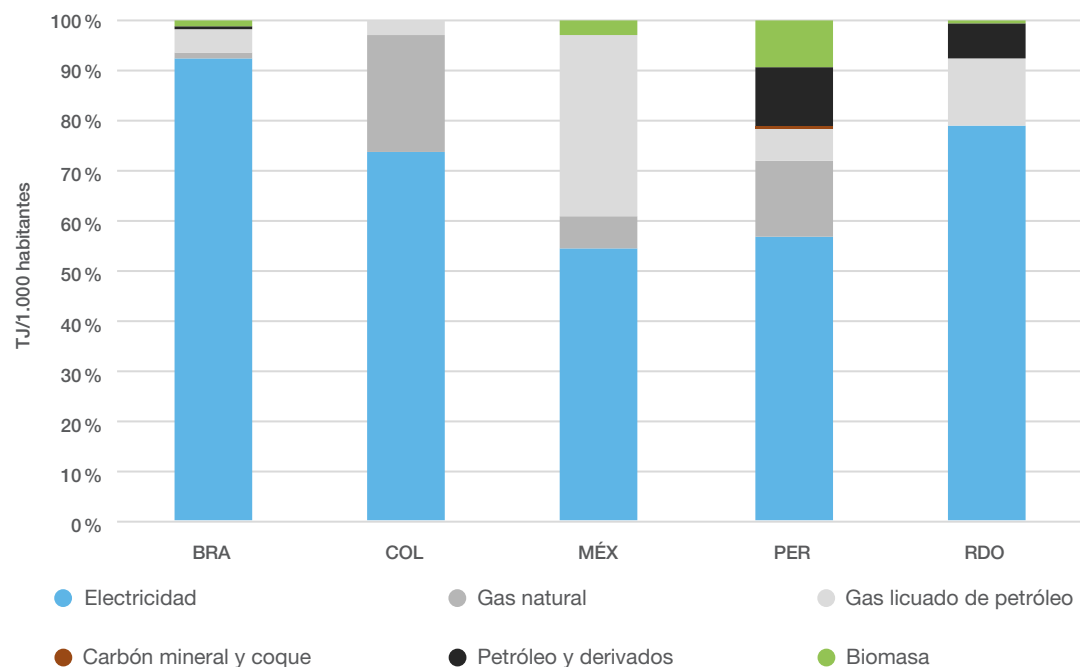
Sector comercial, servicios y público

Punto de partida

El sector comercial, servicios y público está conformado por varios subsectores; por ejemplo, la Administración pública, los hospitales, hoteles y comercios. Suele ser un sector de poco peso en términos de consumo energético (≤ 7 % del total, en 2019) respecto a los sectores transporte, industrial y residencial. El gráfico 9 muestra el consumo final por combustibles y por país. Es un sector con gran participación eléctrica.

Gráfico 9

► Consumo de combustible por país, sector comercial, servicios y público, 2019



Fuente: Elaboración propia con base en los datos del sieLAC (OLADE) y balances energéticos nacionales.

Premisas

Para estimar el consumo energético del sector comercial, se partió del consumo del año 2019 y se proyectó **a partir del crecimiento del PIB y la intensidad energética obtenida para el año base**, por fuente, sin diferenciar por uso final. Se plantean diferentes premisas en cuanto a eficiencia energética y sustitución entre combustibles.

Para el escenario BAU de todos los países, se consideró una mejora en la eficiencia del 1 % anual, ya que se entiende que aplican mejoras similares a las que se detallan en el sector residencial, alcanzando el 34 % acumulado en el período.

Para los escenarios NZ 2060 y NZ 2050, se alcanza una mayor penetración de energía eléctrica al final del período. Además, se consideró una mejora en la eficiencia del 1,6 % y 2,2 % anual respectivamente, alcanzando en ambos escenarios una reducción total del consumo de energía debido a medias de eficiencia energética del 50 % al final del período.

Tabla 3

► Principales premisas de transición energética por escenario: sector comercial, servicios y público

	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Eficiencia energética	-1 % anual (-34 % acumulado a 2060)	-2,2 % anual (-50 % acumulado a 2050)	-1,6 % anual (-50 % acumulado a 2060)
Sustituciones	Leve electrificación del sector	2050 y 2060: el consumo eléctrico desplaza casi totalmente a los combustibles fósiles.	

Fuente: Elaboración propia.



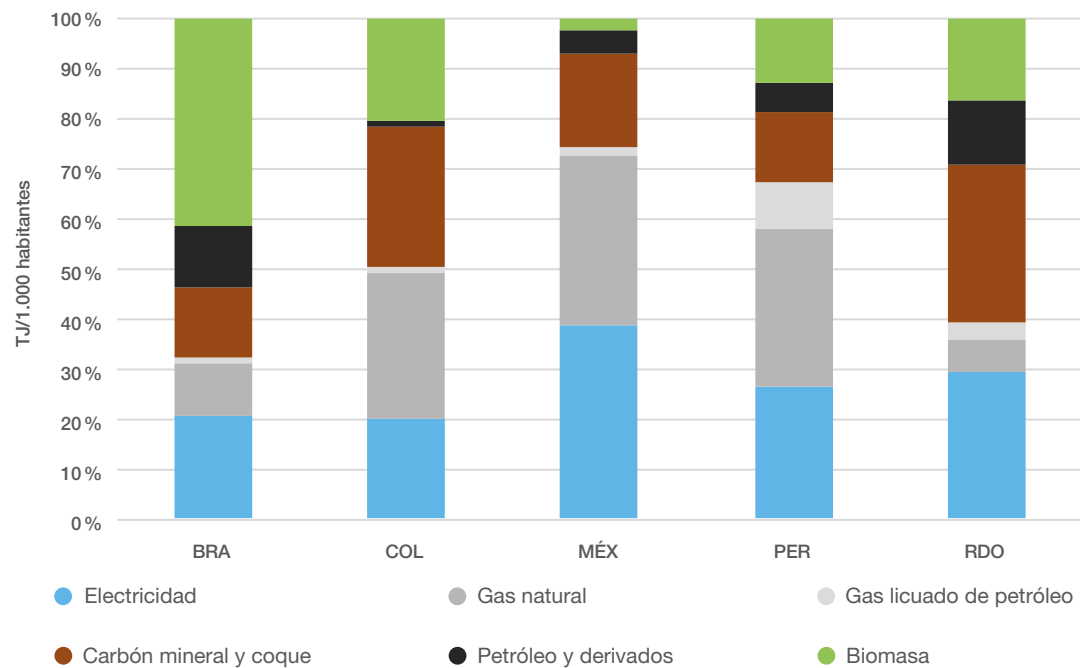
Sector industrial

Punto de partida

En todos los países estudiados, el sector industrial es el segundo de mayor demanda energética después del sector transporte. Suele haber una baja penetración de la energía eléctrica, condicionada por varios sectores de difícil electrificación, por ejemplo, las industrias del acero y cemento.

Gráfico 10

► Consumo de combustible en el sector industrial, por país, año 2019



Fuente: Elaboración propia con base en datos del sieLAC, OLADE.

Premisas

La industria se proyectó con información de consumos energéticos del año 2019 desagregada con un dígito de la Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU) adicional al del PIB sectorial, por rama de actividad. A su vez, para cada rama industrial se desagrega el consumo por usos finales.

Para la **proyección** del consumo energético se utiliza el **crecimiento esperado del PIB, en conjunto con la intensidad energética por rama y uso** que se obtuvo para el año 2019, principalmente a partir de los balances de energía final y útil disponibles. Se tomó como premisa que las ramas de actividad mantendrán su participación sobre el total del PIB industrial durante el horizonte de planeamiento¹⁵.

Las medidas de transición se centran en **mejoras en términos de eficiencia y sustitución de combustibles**. La eficiencia energética se modela a través de una reducción de la intensidad energética mientras las sustituciones entre combustibles se realizan en términos de energía útil, con tasas de participación anuales.

En el caso de la sustitución de combustibles, surgen como apropiadas además de la electrificación, la alternativa solar para calentamiento indirecto (calentamiento de agua) y del gas natural como sustituto del carbón.

En los casos donde no se puede sustituir al carbón, se pueden considerar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono a largo plazo. La eficiencia energética se logra gracias a la optimización del uso de energía en los procesos industriales y el recambio tecnológico hacia aparatos e instalaciones más recientes y eficientes.

Es importante recordar que las posibilidades de sustitución pueden variar mucho de un subsector a otro, dada la variedad de procesos industriales existentes. Para realizar las proyecciones, se agruparon los subsectores industriales en una cantidad limitada de sectores (menor que 10).

El análisis se centró más en detalle en los subsectores de mayor consumo y sus usos asociados. Los principales sectores y usos suelen ser parecidos en todos los países estudiados. El sector alimentos, bebidas y tabaco suele ser uno de los mayores consumidores de energía, junto con los sectores hierro y aleaciones, minerales no metálicos (en particular, cemento) e industrias varias.

¹⁵ Esta premisa implica que no se modelan cambios estructurales dentro del sector industrial y se aplica la misma tasa de crecimiento del PIB para todas las ramas de actividad.

En el sector alimentos, bebidas y tabaco, el calor (ya sea directo o indirecto) es la demanda mayoritaria de energía. Generalmente, esta energía se suministra mediante calderas de combustibles fósiles que calientan agua o generan vapor o mediante la transferencia de calor desde gases de combustión calientes.

También se utiliza la calefacción directa en algunas aplicaciones. Este calor se utiliza en diversas etapas de procesamiento de alimentos como pasteurización, esterilización, secado y cocinado, entre otros. Existen tecnologías de calentamiento eléctrico, lo cual permite la mayor electrificación de este subsector.

Para los sectores cemento y hierro y aleaciones, se planteó principalmente la sustitución de los combustibles actuales (generalmente combustibles sólidos como carbón mineral y coque de petróleo) por gas natural, así como un leve incremento de la participación de la electricidad (IEA, 2021).

Las hipótesis consideradas por país y por subsector se resumen en la tabla 4. Estas premisas toman en cuenta tanto las particularidades de los subsectores como de los países.



Tabla 4 ▶ Principales premisas de transición energética, por país y escenario, sector industrial

	País	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Eficiencia energética	Todos	Mejora de la intensidad energética sobre la energía útil		
		• -0,5 % anual • -19 % acumulado	• -1 % anual • -27 % acumulado	• -1 % anual • -34 % acumulado
Sustituciones por país	Todos	En función de las tendencias históricas	• Fueloil y diésel: reemplazo total por GN y GLP entre 2019 y 2035. • Carbón: sustitución parcial o total por GN y electricidad.	
	COL	Las consideraciones a continuación se tienen en cuenta para las ramas industriales con alta penetración de carbón: • Con potencial de sustitución: reducción fuerte del consumo (mayor en NZ) y sustitución parcial por GN. • Con bajo potencial de sustitución: se consideran tecnologías de captura y almacenamiento de carbono a largo plazo en los escenarios NZ (AIE).		
Sustituciones por subsector	Alimentos, bebidas, tabaco	Incremento del peso de la electricidad y energía solar, en línea con procesos con potencial de electrificación en el sector (secado, tostado, etc.)		
	Cemento, cerámica	• Cemento: sector más difícil de electrificar. Reemplazo parcial del carbón por el gas. • Cerámica: potencial de conversión a hornos eléctricos.		
	Industrias varias	Gran heterogeneidad de este grupo. Reemplazo del carbón (y de la biomasa) por GN, GLP y electricidad.		
	Hierro y aleaciones	Sustitución de los combustibles actuales por gas natural y leve incremento en la participación eléctrica.		

Fuente: Elaboración propia.



Sector transporte

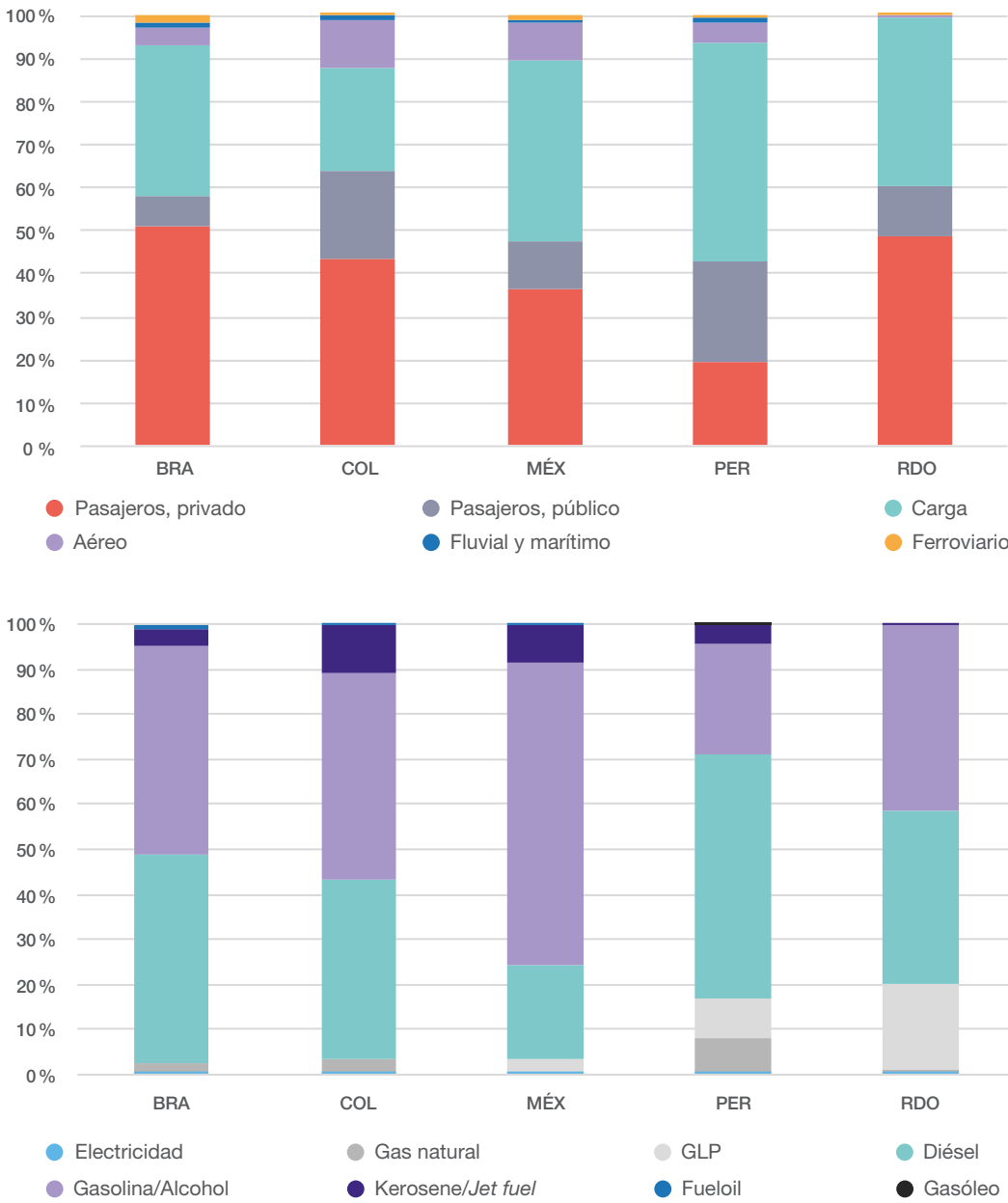
Punto de partida

El sector transporte es el máximo consumidor de energía y emisor de gases de efecto invernadero en los cinco países en estudio. Consume mayormente combustibles líquidos (diésel, gasolina, etc.). Si bien las ventas de vehículos eléctricos aumentaron en varios países en los últimos años, estos vehículos representan una baja proporción del consumo final en los países en estudio.

El transporte carretero representa más del 85 % del consumo total, liderado por el transporte carretero de pasajeros (a excepción de Perú, donde el transporte de cargas representa más de la mitad).



Gráfico 11 ▶ Demanda de energía por uso y por combustibles, sector transporte, año 2019



Fuente: Elaboración propia con base en datos del sieLAC (OLADE), balances energéticos nacionales y balances de energía útil.

Premisas

El sector transporte se proyecta conforme a la siguiente estructura para reflejar los principales motores que varían según cada segmento:

- transporte carretero de pasajeros (autos, motos, ómnibus, etc.);
- transporte carretero de cargas (camiones, tractocamiones);
- otros (aéreo, marítimo y fluvial, ferroviario).

Transporte carretero de pasajeros

Para estimar el nivel de consumo energético o nivel de actividad del sector transporte carretero de pasajeros se estimó:

- la **evolución del parque automotor** (cantidades de motos, autos, camionetas, ómnibus, etc.); la cantidad de vehículos privados es idéntica en los tres escenarios, y
- el **consumo promedio por vehículo** calculado como recorrido medio anual dividido el rendimiento en km por unidad de energía.

A Proyección del parque automotor de pasajeros

i. Transporte privado (motos, autos, camionetas)

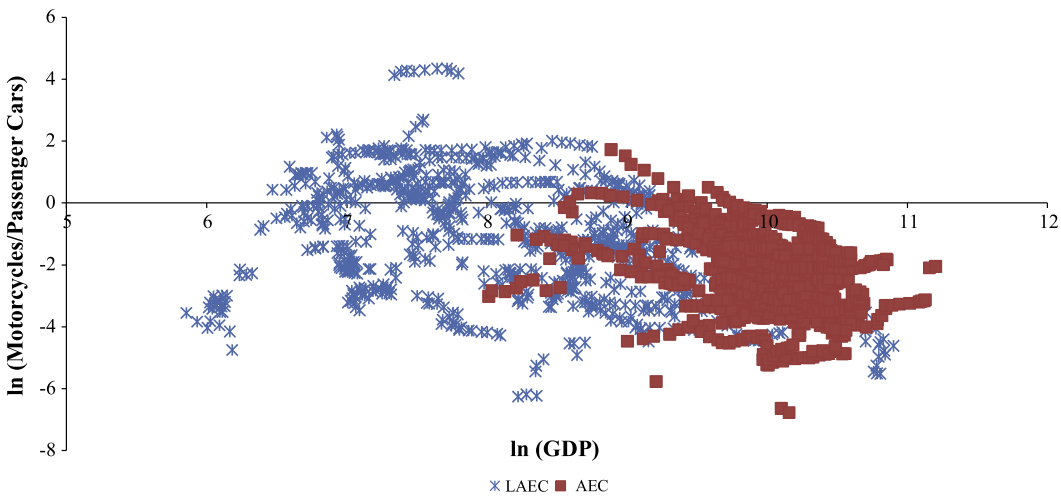
Dado el análisis de correlaciones entre el PIB per cápita, el IDH y el consumo eléctrico (véase “Anexo. Aspectos metodológicos detallados”), se aseguró la identificación de países con alto grado de desarrollo. De esta forma, se tomaron los datos de la cantidad de autos y motos por cada 1.000 habitantes en los países desarrollados y se estimó un promedio de 635 unidades. Dicho promedio se utilizó como **punto de saturación** a largo plazo (2060) y se realizaron proyecciones

utilizando una función logística *logit* para estimar la cantidad de vehículos de transporte privado en el futuro.

Adicionalmente, para estimar la cantidad de vehículos por tipo (motos/autos), se utilizaron las conclusiones de Law (Law, 2015) sobre la relación entre la **cantidad de motos por cada 1.000 habitantes y el PIB per cápita** que indica que esta relación tiene una forma de **“U” invertida**¹⁶. Esto último implica que, en un principio, la cantidad de motos por cada 1.000 habitantes tiene una relación positiva con el PIB per cápita hasta alcanzar un máximo, a partir del cual, conforme aumenta el nivel de desarrollo de los países, la cantidad de motos comienza a decrecer por cada 1.000 habitantes y aumenta la cantidad de autos.

Gráfico 12

► Relación entre la tasa de propiedad de motocicletas/automóviles y el PIB per cápita



Fuente: Law, Hamid & Goh (2015).

16 Law, Hamid & Goh (2015), *The motorcycle to passenger car ownership ratio and economic growth: A cross-country analysis*

Según el análisis de Law (Law, 2015), la tasa de propiedad de motos comienza a decrecer a partir de niveles de PIB per cápita entre USD 4.000 y USD 6.000 (medidos en USD constantes de 2011). Dado que nuestras estimaciones están basadas en el PIB/PPP de 2017, se utilizaron los PIB a precios constantes de los países en estudio y se analizó su relación con los precios medidos en PPP. El valor estimado por Law equivale a valores de entre USD 9.000 y USD 10.000 cuando se mide el PIB según el PPP de 2017.

Con base en las proyecciones del PIB per cápita por país, se tomaron los valores presentados previamente para utilizarlos como punto máximo de saturación en la cantidad de motos. De esta forma, cada país tiene un año y una cantidad de motos máxima alcanzada según su grado esperado de desarrollo y crecimiento.

ii. Transporte público (ómnibus)

Al igual que con el transporte privado, se tomó el promedio de la cantidad de vehículos de pasajeros cada 1.000 habitantes en países desarrollados como punto de saturación esperado de los países en desarrollo a largo plazo.

Al haber encontrado que el punto de saturación se ubica en 8 vehículos de pasajeros por cada 1.000 habitantes, se tomó dicha saturación y se realizó la proyección de la cantidad de ómnibus utilizando un modelo econométrico basado en una ecuación de tipo logit y se usó el punto de saturación como valor de saturación para los cinco países en estudio.

B Premisas de transición energética

Las medidas de transición energética contempladas son:

- transición de **combustible usado**/tipo de motor, que depende del tipo de vehículo (motos, autos, camionetas, ómnibus) y del escenario. En particular, una de las principales opciones contempladas es la electrificación del parque vehicular que permite reducir las emisiones y el consumo total (una reducción de entre el 75 % y el 80 % del consumo por km). Asimismo, el

uso de vehículos híbridos permite una reducción significativa del consumo energético;

- mejora del rendimiento** de los vehículos y de la eficiencia media del parque vehicular como consecuencia de los avances tecnológicos y/o la reducción de peso de los vehículos por categoría, y
- reducción de los recorridos (km/tipo de vehículo) como consecuencia de la **digitalización** de la sociedad (teletrabajo, etc.) y del desarrollo del **transporte público**.

C Transición en términos de combustible usado

La Unión Europea estableció un acuerdo que asegura que todos los autos y todas las camionetas que se registren en Europa a partir de 2035 deberán ser amigables con el medio ambiente (cero emisiones)¹⁷. Si bien la normativa no aplica a motos, es de esperar que, con el fin de combatir el cambio climático, se tome una política similar para este tipo de vehículos. Además, otros países como India, uno de los mayores mercados de motos del mundo, tomó iniciativas en este sentido¹⁸. En este contexto, suponiendo que en América Latina se ponga en práctica una medida similar a partir de 2045, es de esperar que a 2060 se alcance el 100 % del parque de motocicletas de origen eléctrico.

En cuanto al transporte público de pasajeros, existen varias iniciativas alrededor del mundo para eliminar los vehículos a combustión. Holanda, Dinamarca y Nueva Zelanda encabezan este movimiento al haber fijado metas de compra de vehículos 100 % eléctricos a partir de 2025 y llegar a una flota completamente eléctrica para 2030. En América Latina, Colombia y Chile propusieron que el 100 % de sus

¹⁷ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6462

¹⁸ <https://soymotero.net/noticia/a-partir-de-2025-en-india-solo-se-podran-vender-motos-electricas-28858/>

adquisiciones sean eléctricas a partir de 2035¹⁹. En este marco, se proyectó que, para el año 2060, en todos los escenarios, todos los ómnibus sean eléctricos y que dicha meta se alcanzará en 2040 en los dos escenarios NZ en todos los países (tabla 5).

En cuanto a los autos, vehículos todoterreno y camionetas, se entiende que es un segmento más dificultoso de reemplazar. Si bien se espera que las ventas sean casi completamente eléctricas en 2050, se estima que su participación alcance un 30 % eléctrico y 20 % híbrido en 2060 para todos los países en estudio, donde el restante 50 % dependerá de la disponibilidad de recursos de cada país. En los escenarios NZ, se debe alcanzar una contribución de 80 % eléctrico y 20 % híbrido al final del período.

En el caso de Brasil, en línea con el programa de transición energética (CEBRI, 2023) se prevé un mayor uso de biocombustibles. En el escenario BAU, se espera que el 20 % de los vehículos sea híbrido, otro 20 % sea eléctrico, un 20 % utilice diésel verde, y el resto sea a gasolina en 2060. Para los escenarios NZ, se consideró que la participación será 20 % híbrido, 40 % eléctrico y 40 % diésel verde para el año horizonte.

D Mejora de rendimiento

Para determinar la eficiencia del parque vehicular se considera el informe *Energy Efficiency 2022* (AIE): “[...] La mejora promedio anual (reducción) en el consumo de energía por kilómetro recorrido por pasajero (consumo específico de combustible) desde 2000 hasta 2020 para automóviles y camionetas fue del 1,7 %, seguido por motocicletas y triciclos con 0,8 % y ómnibus con 0,8 %”. En este estudio, se optó por supuestos conservadores en el escenario BAU y se estimó una mejora de 0,5 % anual en la relación km/galón de combustible.

¹⁹ <https://theicct.org/decarbonizing-bus-fleets-global-overview-of-targets-for-phasing-out-combustion-engine-vehicles/>

Por otra parte, para los escenarios NZ se recurrió al balance de energía útil del sector de transporte (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]) donde se especifican rendimientos máximos alcanzables por tipo de vehículos/ combustibles (mejores tecnologías disponibles [BAT, por sus siglas en inglés]). Se tomó como premisa que, al final del período de estudio, los rendimientos alcanzados en el parque automotor son los correspondientes a la mejor tecnología disponible hoy en día.

E Reducción de los recorridos

Otro aspecto para considerar es el tipo de transporte utilizado por los pasajeros. En el escenario BAU, se prevé una sustitución de transporte liviano de pasajeros por ómnibus y transporte ferroviario. Además, el fenómeno de digitalización genera una disminución extra en el transporte privado de pasajeros. Estos descensos alcanzan el 7,5 %, 2,5 % y 7,5 %, respectivamente. En los escenarios NZ, se deben duplicar las ambiciones en este sentido. En resumen, se consideraron las premisas de la tabla 5.



Tabla 5 ▶ Principales premisas de transición energética, por país y escenario, transporte de pasajeros

	País	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Rendimiento autos y camionetas	Todos	Mejora de 0,5 % anual	Mejora de 2,1 % anual	Mejora de 1,6 % anual
Sustituciones de parque vehicular por país	Brasil	Motos y ómnibus: 100 % eléctricos (2060). Autos y camionetas (2060): 20 % eléctricos, 20 % híbridos, 20 % combustible sintético y 40 % gasolina.	Motos y ómnibus: 100 % eléctricos (2040). Autos y camionetas (2060): 40 % eléctricos, 40 % combustibles sintéticos y 20 % híbridos.	
	República Dominicana	Motos y ómnibus: 100 % eléctricos (2060). Autos y camionetas (2060): 30 % eléctricos, 20 % híbridos y 50 % combustibles fósiles, con mayor penetración de GNC y GNL.	Motos y ómnibus: 100 % eléctricos (2040). Autos y camionetas (2060 RD): 65 % eléctricos, 20 % híbrido, 5 % biodiésel y 10 % GLP/GNC	
	Resto	Motos y ómnibus: 100 % eléctricos (2060). Autos y camionetas (2060): 30 % eléctricos, 20 % híbridos y 50 % combustibles fósiles, con mayor penetración de GNC y GNL.	Motos y ómnibus: 100 % eléctricos (2040). Autos y camionetas (2060): 80 % eléctricos y 20 % híbridos.	
Recorrido medio anual (reducción a 2060 o 2050)	Todos	Reemplazo por ómnibus: -7,5 % Transporte ferroviario: -2,5 % Digitalización: -7,5 %	Reemplazo por ómnibus: -15 % Transporte ferroviario: -5 % Digitalización: -15 %	
Transporte público	Todos	Flota existente proyectada con base en el crecimiento histórico (regresión lineal). Crecimiento adicional en reemplazo de km de recorridos de autos y motos. Se asume que el ómnibus transportará 10 veces más personas en forma simultánea (UPME). En el caso del transporte ferroviario, se asume un consumo en energía por pasajero-km 7 veces menor (Agencia Francesa de Medio Ambiente y de Gestión de la Energía [ADEME]). 20 % ómnibus GNC en 2030. 100 % ómnibus eléctricos en 2050 o 2060.		

Fuente: Elaboración propia.

Transporte carretero de cargas

Para estimar el nivel de consumo energético o nivel de actividad del sector transporte de cargas se estimó:

- la **evolución del parque automotor** (cantidades de camiones + tractocamiones) y
- el **consumo promedio por vehículo** calculado como recorrido medio anual dividido el rendimiento en km por unidad de energía. En el caso del transporte de cargas, se espera un recorrido medio anual por vehículo constante en el futuro.

A Proyección del parque automotor de cargas

Para estimar la evolución futura del parque automotor de cargas, se realizaron regresiones entre el parque de carga y el PIB de los países analizados. Se observaron altos grados de correlación entre los resultados que justifican la elección de dicho método para la estimación.

Asimismo, se proyectaron las flotas de transporte de carga con el método de regresión lineal utilizando el PIB total (medido en PPP de 2017) como variable independiente.

El transporte de carga se segmenta en dos tipos de camiones: camiones y tractocamiones (los tractocamiones son aquellos utilizados para transporte de grandes cargas; se venden con acoplados por separado). Los camiones y tractocamiones conservan su peso relativo actual en las proyecciones.

B Premisas de transición energética

Las medidas de transición energética contempladas son:

- **mejora de rendimiento de los vehículos;**
- **transición en términos de combustible usado**/tipo de motor, que depende del tipo de vehículo (camión/tractocamión) y del escenario. Los combustibles de la transición dependen del horizonte de tiempo considerado: GNC, GNL, electricidad (a partir de 2023) y derivados del hidrógeno (a partir de 2040). El gas (GNC, GNL) desempeña un papel importante en el período entre 2030 y 2040;
- **mejora logística y transferencia a transporte ferroviario** (que implican una reducción de la cantidad de vehículos; el recorrido medio anual por camión y tractocamiones sigue constante).

Las premisas contempladas son similares entre los países, entendiendo que todos los países llegan a un mismo nivel de desarrollo económico y de acceso a soluciones tecnológicas.

Las premisas específicas para Brasil reflejan las políticas actuales (enfoque hacia el desarrollo de combustibles verdes producidos a partir de biomasa), mientras que en República Dominicana, las distancias más cortas pueden permitir una mayor electrificación del sector transporte de carga.

Se prevé una menor penetración eléctrica para los tractocamiones que para los camiones, ya que las soluciones tecnológicas para transportar cargas muy pesadas están todavía en desarrollo y la electrificación no es siempre una solución.

Tabla 6 ▶ Principales premisas de transición energética, por país y escenario, transporte de cargas

	País	Tipo de vehículo	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Rendimiento	Todos		Mejora de 0,2 % a 0,5 % anual según combustible.	Mejora de 0,4 % a 0,5 % anual según combustible.	
Logística y transferencia	Todos		-	Mejoras logísticas: 10 % de camiones y tractocamiones. Transferencia a ferroviario: 10 % de camiones y tractocamiones.	
Sustituciones de parque vehicular por país	COL, PER, MÉX	Camiones	2060: 10 % eléctricos, 40 % a GNC y 50 % diésel.	2050 o 2060: 80 % eléctricos y 20 % a GNC.	
		Tractocamiones	2060:50 % GNL y 50 % diésel.	2050 o 2060: 60 % eléctrico, 30 % H ₂ (pila de combustible) y 10 % GNC (diésel en MÉX).	
	RDO	Camiones	2060: 30 % eléctrico y 70 % diésel.	2050 y 2060: 90 % eléctrico y 10 % diésel.	
		Tractocamiones	2060: 10 % eléctrico y 90 % diésel.	2050 y 2060: 70 % eléctrico, 20 % H ₂ (pila de combustible) y 10 % diésel.	
	BR	Camiones	2060: 70 % diésel y 30 % <i>flex fuel</i> .	2050 y 2060: 50 % combustible verde y 50 % eléctrico.	
		Tractocamiones	2060: 90 % diésel y 10 % <i>flex fuel</i> .	2050 y 2060: 20 % combustible verde, 40 % eléctrico y 40 % H ₂ (pila de combustible).	

Fuente: Elaboración propia.

El consumo energético para el sector se proyectó a partir del crecimiento del PIB global y la intensidad energética obtenida para 2019, para cada tipo de transporte, por fuente y sin diferenciar por uso final, ya que la información disponible no permite separar los consumos de flota (que son los más importantes) de los consumos para otros usos de la energía en terminales, almacenamiento, logística, etc.

En la tabla 7, se destacan las premisas para los sectores aéreo, marítimo y ferroviario que se aplican a todos los países del estudio. Son sectores de transformación más difícil (en particular, los subsectores aéreo y marítimo/fluvial no son electrizables con las tecnologías disponibles actualmente, aunque en el futuro podrían desarrollarse nuevas tecnologías en algunos casos).

Algunas de las opciones de transición energética disponibles para las unidades de transporte son los combustibles sintéticos y el amoníaco (derivados del H₂) o los combustibles verdes para Brasil (elaborados a partir del hidrotratamiento de aceites vegetales, el proceso Fischer-Tropsch, los procesos fermentativos u oligomerización de alcoholes²⁰).

Se mantiene el *fuel share* actual para el escenario BAU, mientras que el uso de combustibles alternativos se desarrolla para los escenarios NZ. A modo de referencia, Europa recientemente anunció nuevas normas que impondrán al menos 70 % de combustibles verdes en 2050 en el sector aviación.

20 https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-467/NT_Combustiveis_renovaveis_em_%20motores_ciclo_Diesel.pdf

Tabla 7

► Principales premisas de transición energética por escenario, transporte aéreo, marítimo y fluvial, ferroviario

	BAU	NZ 2050 y NZ 2060
Aéreo	Se proyecta el crecimiento con el PIB y una elasticidad de 0,95. Se mantiene el <i>fuel share</i> actual.	Se proyecta el crecimiento con el PIB y una elasticidad de 0,90. Se incorpora un 40 % de combustible de aviación sostenible.
Marítimo y fluvial	Se proyecta el crecimiento con el PIB y una elasticidad de 1,0. Se mantiene el <i>fuel share</i> actual.	Se proyecta el crecimiento con el PIB y una elasticidad de 0,95. Penetración del 20 % de combustible sintético en reemplazo de los combustibles fósiles.
Ferrovionario	Se proyecta el crecimiento con el PIB y una elasticidad de 1,0. Se incorpora una demanda sustituida de pasajeros. Se mantiene el <i>fuel share</i> actual.	Se proyecta el crecimiento con el PIB y una elasticidad de 0,95. Se incorpora una demanda sustituida de camiones y pasajeros. Electrificación total del consumo.

Fuente: Elaboración propia.



Sector agropecuario, pesca, minería y construcción

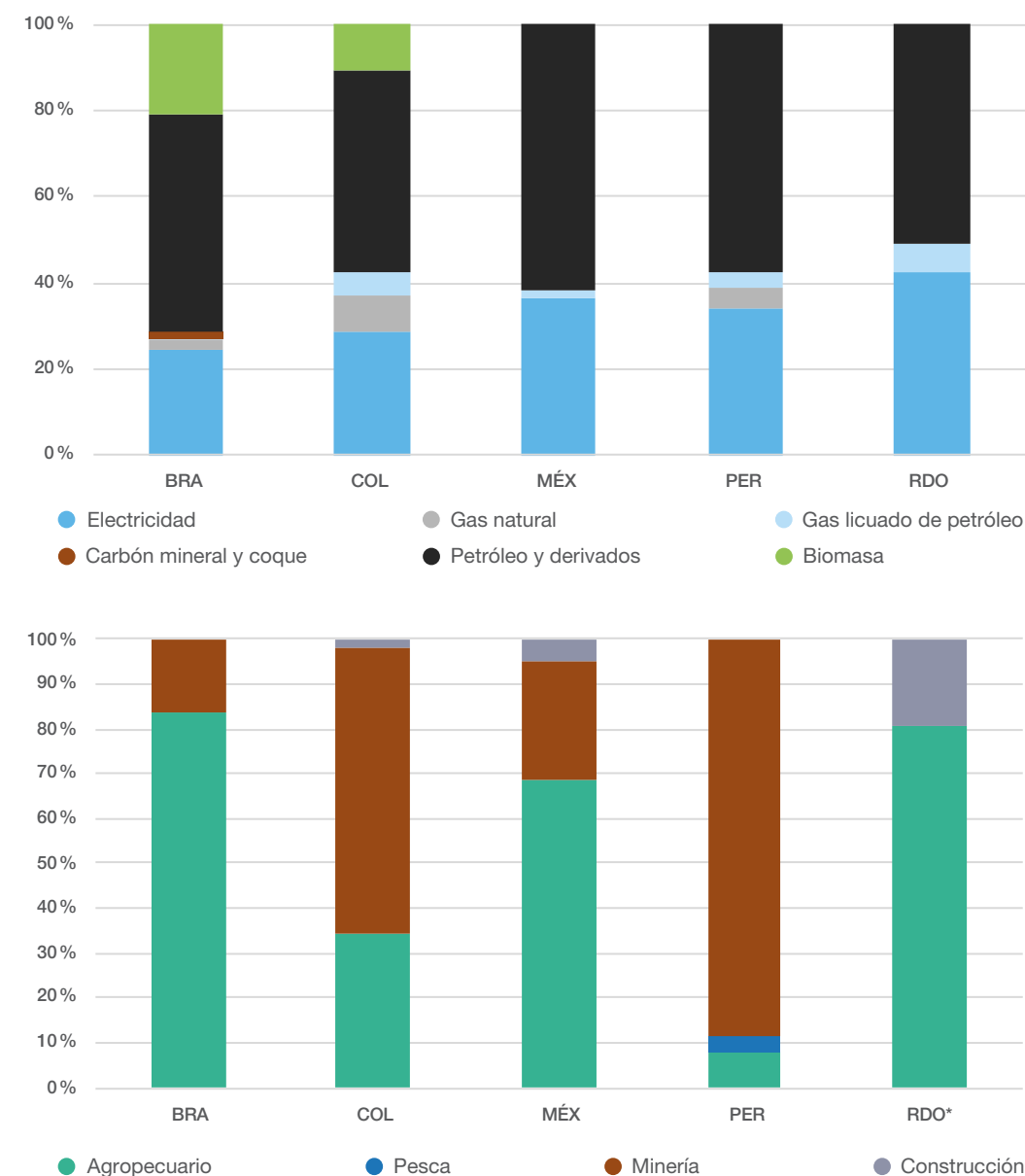
Punto de partida

Los sectores agropecuario, pesca, minería y construcción representan, junto con el sector comercial, servicios y público, los sectores de menor consumo de energía en los países analizados. La electrificación del sector suele ser baja, salvo en Perú, donde supera el 72 % en energía final. Dentro de este sector, se encuentran las embarcaciones pesqueras, que representan un segmento muy difícil de descarbonizar. Al mirar la demanda por subsector, se puede observar la importancia del sector agropecuario, especialmente en Brasil, México y República Dominicana, mientras Colombia y Perú se destacan por tener un alto consumo relacionado con la minería.

El sector transporte es el máximo consumidor de energía y emisor de gases de efecto invernadero en los cinco países en estudio. Para estimar el nivel de consumo energético del sector transporte carretero de pasajeros y carga se estimó la evolución del parque automotor, la distancia promedio recorrida y el consumo energético por vehículo. El análisis considera acciones de transición en términos de sustitución de combustibles, mejoras de rendimiento y reducción de los recorridos.

Gráfico 13

► Consumo por combustible y por subsector en el sector agropecuario, pesca, minería y construcción, año 2019, %



Fuente: Fuente: Elaboración propia con base en datos del sieLAC, OLADE.

*Para República Dominicana, no hay diferenciación entre los sectores agropecuario, pesca y minería. Para Brasil, Colombia y México, no hay información sobre el consumo del sector pesca. En Brasil y Perú, la demanda del sector construcción está incluida en el sector industrial.

Premisas

El consumo energético para este sector fue **proyectado a partir del crecimiento del PIB y la intensidad energética** obtenida para el año 2019, sin diferenciar por uso final. Las medidas de transición consideradas fueron mejoras en términos de eficiencia energética y sustitución entre combustibles, según el país en estudio y la situación de partida de este.

Para el escenario BAU, en todos los países, se consideró una mejora en la eficiencia del 1 % anual, alcanzando el 34 % acumulado en el período.

Para los escenarios NZ 2060 y NZ 2050, se alcanza una mayor penetración eléctrica al final del período. Además, se consideró una mejora en la eficiencia del 1,6 % y 2,2 % anual respectivamente que alcanza, en ambos escenarios, una reducción total del consumo de energía debido a medidas de eficiencia energética de 50 % al final del período.

Tabla 8

► Principales supuestos de transición energética por escenario, sector agropecuario, pesca, minería y construcción

	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Eficiencia energética	Mejora de la intensidad energética sobre la energía útil.		
	-1 % anual -34 % acumulado	-2,2 % anual -50 % acumulado a 2050	-1,6 % anual -50 % acumulado a 2060
Sustituciones por país (aumento de la tasa de electrificación)	Mayor electrificación en línea con tendencias históricas	COL y PER: ≥90 % electrificación (alto peso del sector minería). BRA, MÉX y RDO: electrificación entre 60 % y 75 %. Algunos subsectores son más difíciles de electrificar.	

Fuente: Elaboración propia.



Sector eléctrico

Punto de partida

Según datos de 2019, la generación eléctrica en Brasil, Colombia y Perú proviene predominantemente de fuentes hidroeléctricas, mientras que en México y Perú existe un gran porcentaje de generación a gas. República Dominicana, entre tanto, observa una combinación de generación proveniente de carbón, gas y combustibles líquidos.

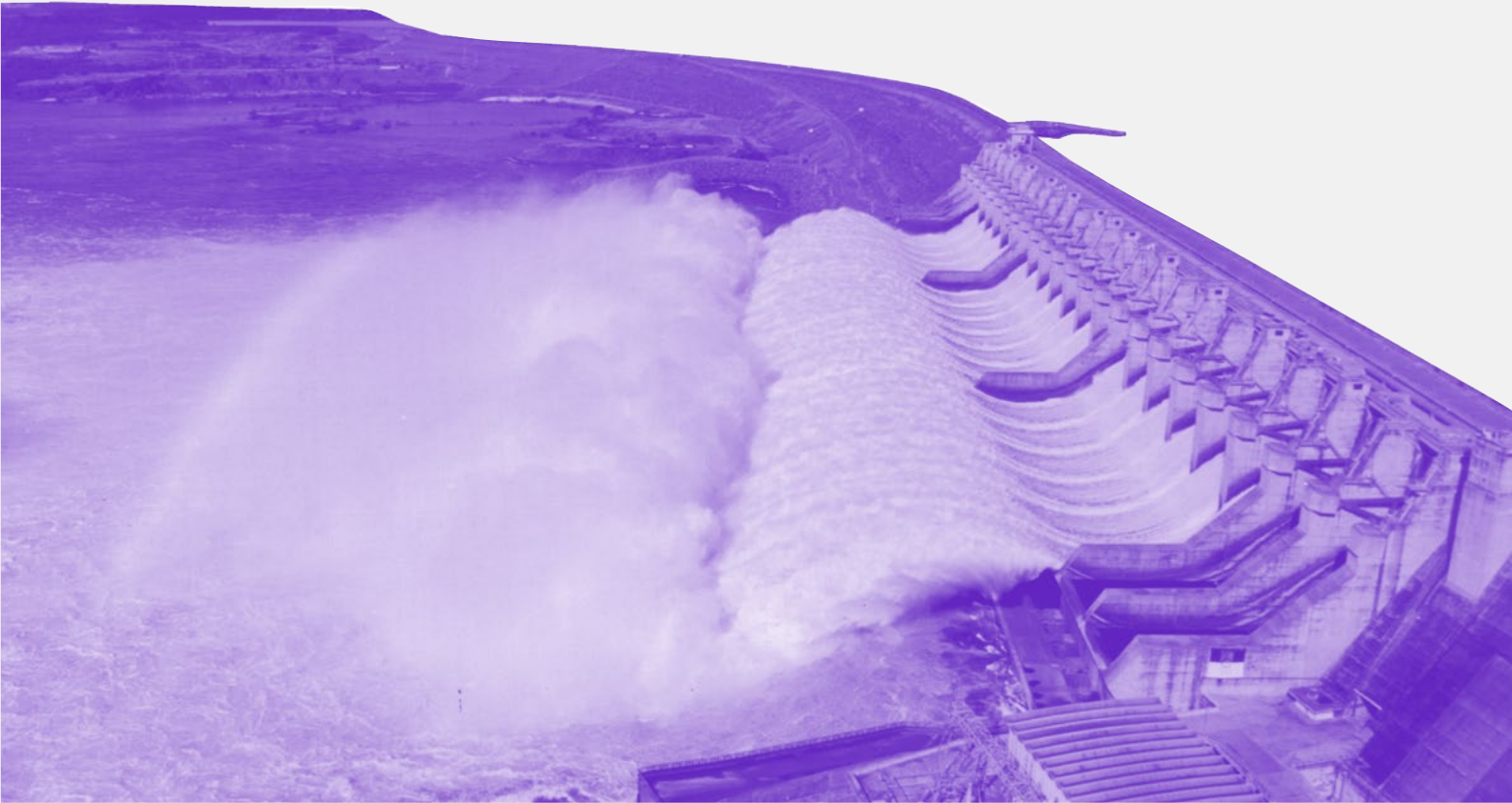
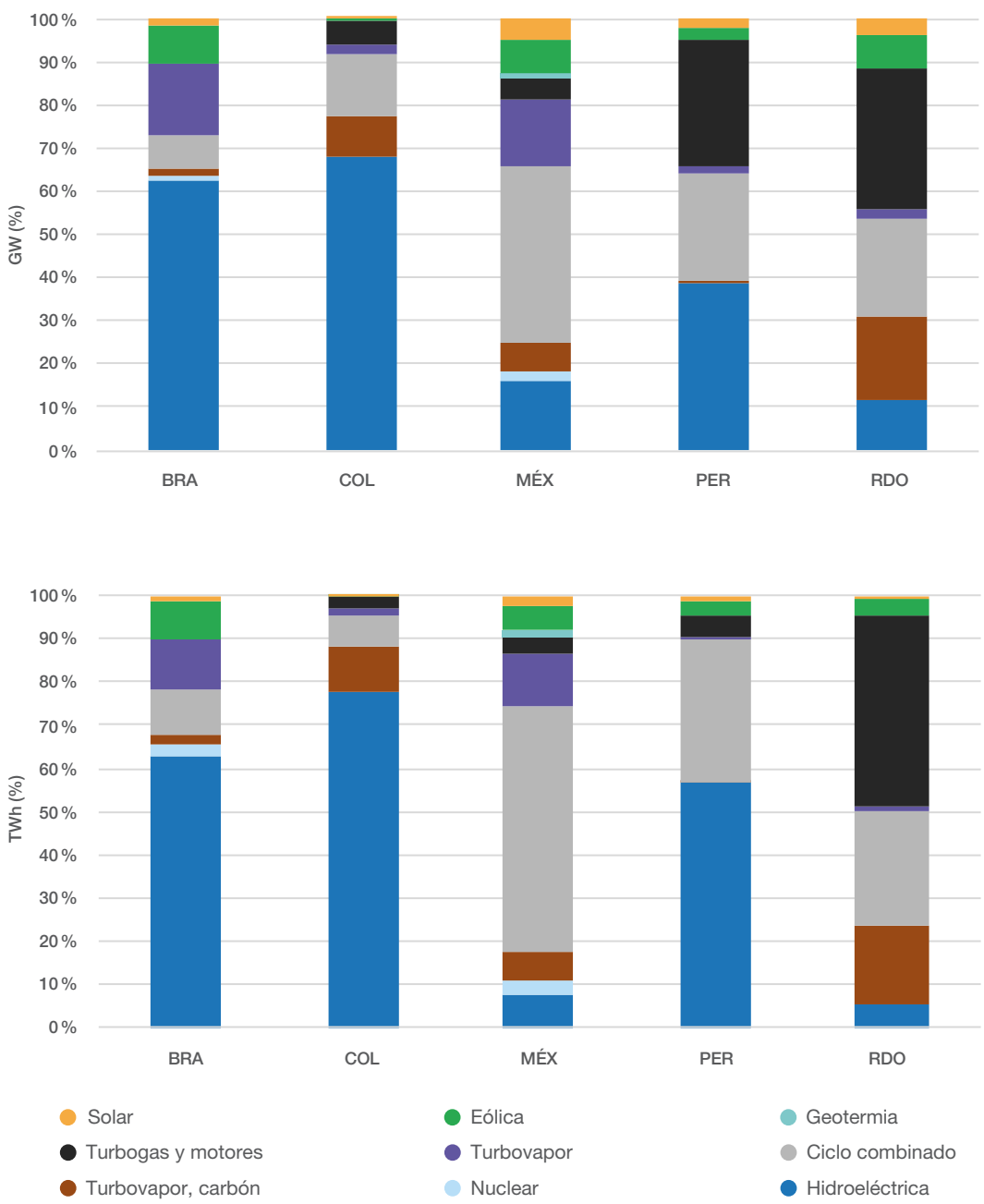


Gráfico 14

► Capacidad instalada y generación eléctrica, año 2019, %

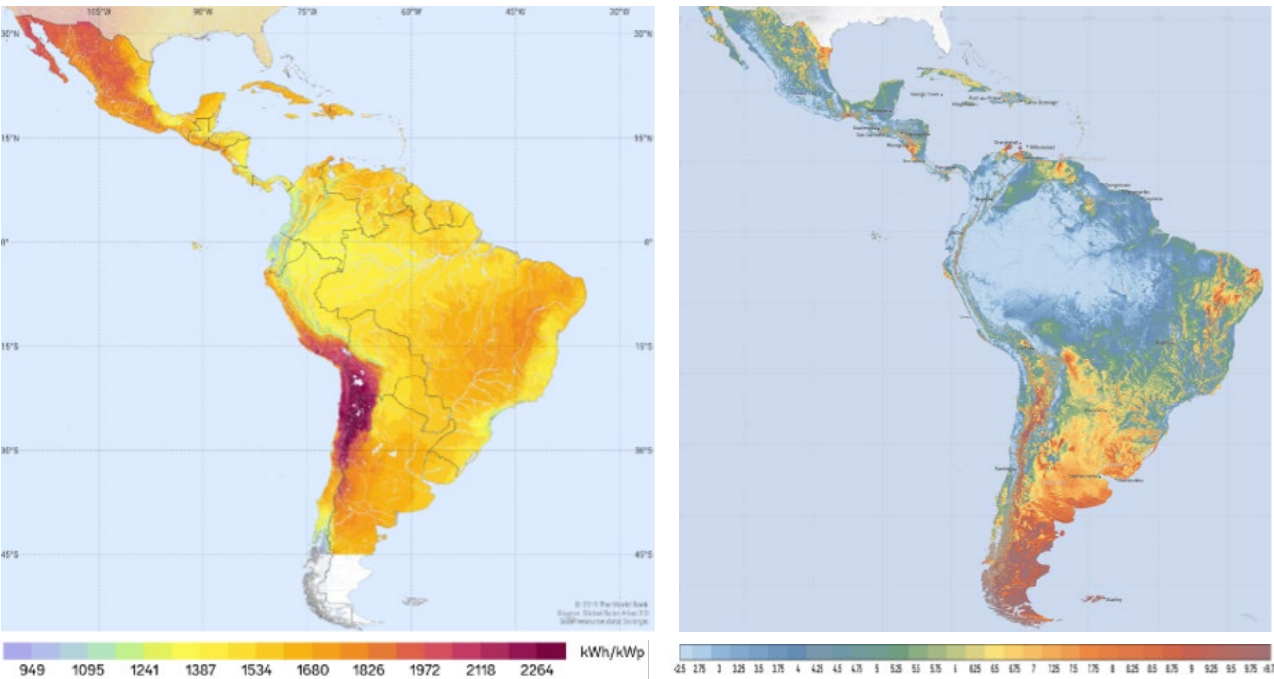


Fuente: Elaboración propia con base en datos del sieLAC, OLADE.

En lo que respecta a energías renovables, Brasil, Colombia y Perú se destacan por su gran potencial hidroeléctrico, México posee un gran potencial solar y República Dominicana dispone de un potencial eólico y solar limitado por su disponibilidad de tierra (el eólico *offshore* puede ser una opción interesante). El gráfico 15 ilustra los recursos solares y de viento en la región.

Gráfico 15

► Recurso solar potencial (kWh/kWp) y velocidad media del viento a 100 m (m/s)



Fuente: Global Solar Atlas (Banco Mundial)²¹ y Atlas eólico mundial (Banco Mundial)²².

²¹ Global Solar Atlas, Grupo del Banco Mundial, <https://globalsolaratlas.info/download/latin-america-and-caribbean>

²² [ws_LAC.pdf](#)

Premisas

Se partió de la composición actual de la capacidad instalada y la generación. En el corto y mediano plazo, el desarrollo del sector eléctrico considera los proyectos en construcción o ganadores de subastas que ya tienen un muy alto grado de certeza y avance. En el futuro, la expansión del parque de generación dependerá de:

- la competitividad relativa de las opciones de expansión (se considera que los proyectos renovables, en particular solar y eólico, se vuelven cada vez más competitivos por la reducción proyectada de sus costos de construcción y desarrollo);
- el potencial máximo de desarrollo de proyectos por tecnologías, tal como se publica a nivel nacional y el cual se considera como un límite máximo;
- las decisiones de políticas energéticas indicadas en el plan de expansión de la generación;
- el contexto local de desarrollo de proyectos por tipo.

La expansión del parque de generación considera aspectos tales como:

- el factor de producción medio, por tecnología y por país, para los proyectos renovables;
- la capacidad o energía firme que puede aportar cada tecnología;
- el factor de producción mínimo a partir del cual se desarrollan nuevos proyectos térmicos;
- la estimación de la demanda eléctrica²³, incluyendo pérdidas y consumo propio.

²³ Los análisis se realizan a paso anual. En este contexto, no se realizó un dimensionamiento preciso de las capacidades de baterías necesarias. Por otro lado, las proyecciones presentadas en este informe no incluyen la demanda eléctrica asociada al proceso de electrolisis para producción de hidrógeno verde para consumo local y/o exportación, ni la capacidad eléctrica correspondiente.

El análisis se realiza por etapa anual (es decir, no se trata de un ejercicio de simulación horaria fino, sino de una estimación de “alto nivel”, como primera estimación en el contexto de un análisis de transición energética a largo plazo).

Si bien en la mayoría de los países serán necesarios medios de flexibilidad (almacenamiento, gestión de la demanda) para acompañar el fuerte desarrollo de energía renovable no convencional (ERNC), no se realizó un dimensionamiento preciso de las capacidades necesarias, pero sí se realizó una estimación de alto nivel en el capítulo de financiamiento²⁴.

²⁴ Las tecnologías actuales no son competitivas y se esperan mejoras en su productividad que no hacen posible establecer con certeza el grado de penetración que podrían alcanzar.

“Las premisas de inversión podrían ser sensibles ante señales dinámicas relacionadas con soluciones regulatorias, de mercado y de acceso a financiamiento que pudiesen acontecer en los horizontes de transición energética.”

4. Inversiones

Las premisas utilizadas para estimar las inversiones totales correspondientes a cada escenario de transición energética justa se presentan en este apartado 4.

Estas inversiones corresponden a las premisas de transición energética planteadas con anterioridad. En particular, las inversiones están relacionadas con:

1. la generación eléctrica (y las necesidades de redes eléctricas adicionales, así como también, medidas de flexibilidad);
2. la electrificación del sector transporte carretero (inversiones en vehículos eléctricos y estaciones de carga);
3. las medidas de eficiencia energética y electrificación de ramas y usos finales para los demás sectores;
4. el uso de tecnologías del tipo captura y almacenamiento de carbono.

Las inversiones se calculan por año y se aplica el monto de la inversión total al primer año en el cual se reducen las emisiones de CO₂. Esta es una simplificación del modelo, dado que las grandes inversiones deben ocurrir de forma anticipada, de uno a cinco años antes, según el tiempo de construcción o puesta en marcha de la inversión en consideración (las centrales hidroeléctricas, por ejemplo, se caracterizan por un período de construcción de varios años).



Sector eléctrico

Las inversiones del sector eléctrico contabilizan:

- las inversiones en nuevas centrales de generación eléctrica, en línea con la expansión de generación estimadas;
- las inversiones en infraestructura y flexibilidad, claves para facilitar la integración de la generación eléctrica intermitente en el despacho eléctrico, y que incluyen los conceptos de redes eléctricas inteligentes, baterías y modernización de centrales hidroeléctricas antiguas;
- las inversiones en redes de transmisión y distribución, que acompañan el crecimiento muy significativo de la demanda eléctrica como consecuencia del crecimiento económico proyectado y de la electrificación de los usos finales;
- la inversión necesaria estimada para la salida de funcionamiento de centrales carboneras antes del final de su vida útil (activos hundidos [*stranded assets*]).

Generación eléctrica: proyectos futuros

Las estimaciones de financiamiento para la generación eléctrica se realizaron utilizando precios de CAPEX proyectados por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés) para la puesta en funcionamiento de nuevas instalaciones según la tabla 9:

Tabla 9

► Evolución CAPEX por tecnología, NREL, USD/kW

CAPEX (USD/kW)	2020	2030	2040	2050	2060
Eólico <i>onshore</i>	1.300	1.150	1.025	900	900
Eólico <i>offshore</i>	3.573	2.865	2.596	2.434	2.434
Solar a gran escala	1.290	1.038	763	632	632
Hidroeléctrica	2.750	2.750	2.750	2.695	2.695
CCGT	1.200	1.180	1.100	1.015	1.015
TG	1.120	1.050	960	872	872
Geotermia	6.750	5.930	5.420	5.150	5.150
Nuclear	9.450	7.730	7.200	6.670	6.670

Fuente: Elaboración propia con base en datos del *Annual Technology Baseline 2023*, NREL²⁵.

Estos CAPEX se multiplicaron por los MW adicionales a instalar en cada escenario.

En cuanto a la generación solar y eólica, se incluyeron además reinversiones estimadas cada 20 y 25 años, respectivamente, para reflejar la vida útil de estas tecnologías.

25 <https://atb.nrel.gov/electricity/2023/technologies>

Inversiones en infraestructura y flexibilidad

Se contabilizaron costos de infraestructura y flexibilidad, que incluyen conceptos de redes eléctricas inteligentes, baterías y modernización de centrales hidroeléctricas antiguas y se estiman en un 15 % adicional²⁶ a las inversiones de generación eléctrica consideradas por escenario.

Redes de transmisión y distribución

El financiamiento esperado en las redes de transmisión y distribución se estimó utilizando una proporción del 16 % y 44 %, respectivamente, sobre las inversiones calculadas en proyectos futuros de generación eléctrica; estimaciones basadas en la experiencia de varias décadas de trabajo del GRUPO GME y sus expertos en el sector eléctrico. Como resultado, en conjunto, se obtuvo un requerimiento necesario de inversiones en redes de transmisión y distribución equivalente al 60 % de las inversiones totales en generación eléctrica.

Estas necesidades de inversión elevadas ocurren en un contexto de crecimiento muy significativo de la demanda eléctrica, consecuencia del fuerte desarrollo económico y de la electrificación de los usos finales, así como también de la creciente participación de generación eléctrica renovable variable en el mix de generación; todos factores que justifican las necesidades de grandes inversiones en redes.

Cabe destacar que los valores aquí estimados son netos de *overhauling* y degradación.

²⁶ Este monto genérico está en línea con los montos de inversiones globales estimados por la IRENA en su reporte *Perspectiva global de las transiciones energéticas 2023: Camino hacia 1,5 °C*.

Generación eléctrica: desmantelamiento de centrales carboneras

La inversión necesaria estimada para la salida de funcionamiento de centrales carboneras antes del final de su vida útil (*stranded assets*) se estimó utilizando el 50 % del CAPEX correspondiente a una nueva central térmica a carbón publicado por el NREL según la tabla 10:

Tabla 10 ► Evolución CAPEX, generación carboneras, NREL, USD/kW

CAPEX (USD/kW)	2020	2030	2040	2050	2060
Carbón	3.550	3.320	3.035	2.750	2.750

Fuente: Elaboración propia con base en datos del *Annual Technology Baseline 2023*, NREL.

Si bien el costo de desmantelamiento de las centrales a carbón que llegan al final de su vida útil es mucho menor, este valor es un *proxy* del sobrecosto correspondiente a la salida anticipada del activo de generación como consecuencia de medidas de transición energética.



Usos finales

Desde el punto de vista de las inversiones relacionadas con los usos finales de la energía, es posible mencionar las siguientes inversiones:

- sector transporte carretero, en el cual se estima la inversión total²⁷ en vehículos eléctricos (VE) e híbridos (VH), así como las estaciones de cargas;
- medidas de eficiencia energética, electrificación, uso de combustibles alternativos (hidrógeno y sus derivados, entre otros) y cambios de conductas que impactan en los sectores de usos finales, a excepción del transporte carretero y de la tecnología de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés);
- captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés) que se plantea como opción para los sectores industriales muy contaminantes y de difícil transformación.

Transporte carretero

En primer lugar, se estimó el esfuerzo financiero necesario para la inversión completa en una **flota de vehículos carreteros eléctricos e híbridos**²⁸.

Esta inversión se estimó utilizando los precios actuales de vehículos eléctricos (VE) e híbridos (VH) según datos de mercado como punto de partida. Para estimar los costos de los VE y VH de todo tamaño (livianos, de carga, pesados, motos) a

²⁷ Estas inversiones no contabilizan el reemplazo necesario de los VE al final de sus vidas útiles o el reemplazo anticipado de baterías.

²⁸ La inversión en vehículos a GNC y GNL no se contabilizó en las inversiones totales dado el impacto muy menor en términos de reducciones de emisiones de estas tecnologías, las cuales participan en una reducción de costos de utilización de los vehículos (O&M), pero no tanto en la transición energética en sí.

futuro, se utilizaron las tasas de reducción de costos estimadas por la IRENA para vehículos livianos²⁹, en el entendimiento de que todos estos vehículos tendrán costos menores a futuro por la reducción esperada del costo de las baterías.

Tabla 11 ► Evolución del costo total de propiedad para vehículos eléctricos e híbridos, USD

Costo total de propiedad	2023	2030	2040	2050	2060
Vehículos livianos, eléctricos e híbridos ³⁰	32.000	26.200	18.900	11.600	11.600
Vehículos de carga (camiones y tractocamiones) ³¹	344.000	281.500	203.300	125.100	125.100
Vehículos pesados (ómnibus, furgonetas y microómnibus) ³²	472.000	386.200	278.900	1.171.600	171.600
Motos	3.000	2.500	1.800	1.100	1.100

Fuente: Elaboración propia con base en datos de mercado.

Una vez calculada la inversión total, se estimó el **sobrecosto** para cubrir la inversión en VE y VH hasta que los costos de vehículos eléctricos y fósiles se igualen. Este cálculo permite identificar, de forma simplificada, el peso del acceso a un nuevo vehículo (efecto “motorización”) y el peso de la “electrificación” en esta inversión total en VE y VH. Los precios de vehículos fósiles provienen de datos de mercado y se asume que permanecen constantes en el tiempo. Los costos considerados para vehículos fósiles son los que se detallan en la tabla 12.

²⁹ No se dispone de proyecciones de precio a futuro para los demás tipos de VE (camiones, motos, etc.).

³⁰ IRENA: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Innovation_Outlook_EV_smart_charging_2019_ES.pdf?rev=d92189d0969246d79a9f030b8b15a0b4

³¹ <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/02/purchase-cost-ze-trucks-feb22-1.pdf>

³² <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/bogota-es-pionera-en-adquirir-buses-electricos-por-licitacion/>

Tabla 12

► Costo total de propiedad para vehículos fósiles, USD

Costo total de propiedad	Entre 2023 y 2060
Vehículos livianos fósiles	32.000
Vehículos de carga (camiones y tractocamiones)	146.000
Vehículos pesados (ómnibus, furgonetas y microómnibus)	114.000
Motos	1.600

Fuente: Elaboración propia con base en datos de mercado.

Por otro lado, se calculó el costo correspondiente a la inversión necesaria en **nueva infraestructura**, en particular, la construcción de estaciones de carga de vehículos eléctricos (VE). Según un estudio de Deloitte³³, se estiman 10 VE por estación de carga no residencial (estación de carga nivel 2). Se considera un costo de 1.550 USD para calcular la inversión necesaria en estaciones de carga.³⁴

³³ <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/energy-resources/deloitte-ch-en-eurelectric-connecting-the-dots-study.pdf> Dichas estaciones de carga no residencial están categorizadas como estación de carga nivel 2, requieren una corriente de 240 voltios, proporcionan una autonomía de hasta 25 millas por hora y pueden cargar el vehículo en su totalidad en 8 horas. La mayoría de las estaciones de carga pública son nivel 2.

³⁴ Estimación propia basada en informes de NREL y PWC.

Eficiencia energética, electrificación y uso de combustibles alternativos

Estas inversiones engloban todas las acciones de eficiencia energética, electrificación, usos de combustibles alternativos (hidrógeno y sus derivados, entre otros) y cambios de conductas que impactan en los sectores de usos finales, a excepción del transporte carretero y de la CCUS. En particular, los sectores de consumo final considerados son: residencial; industrial; comercial, servicios y público; agropecuario, pesca, minería y construcción, y aéreo, marítimo y ferroviario.

En primer lugar, se estimó el ahorro de emisiones resultante de las medidas de transición energética para cada sector. Para eso, se estimaron las emisiones de GEI correspondientes a un escenario “tendencial”, el cual considera el crecimiento de la demanda energética en función de las variables históricas y variables socioeconómicas proyectadas. Este escenario tiene mayores emisiones que el escenario BAU, ya que no asume ningún tipo de medidas de eficiencia ni políticas de electrificación, mientras que el escenario BAU considera acciones de mitigación de las emisiones de GEI. *A posteriori*, tiene también mayores emisiones que los escenarios NZ. El diferencial de emisiones entre cada escenario y el escenario “tendencial” refleja el impacto ambiental de las medidas de eficiencia y electrificación planteadas en cada uno de los escenarios.

Dada la gran variabilidad de acciones y costos correspondientes a cada una de las premisas de transición energética, así como la interdependencia de estas acciones en términos de impactos sobre las emisiones, se estimó un *proxy* por sector, equivalente a un CAPEX a invertir para la reducción de las emisiones por año. Este CAPEX equivalente por sector se estimó con base en un estudio realizado por el Comité de Cambio Climático (CCC)³⁵.

³⁵ <https://www.theccc.org.uk/publication/sixth-carbon-budget/#supporting-information-charts-and-data>

Tabla 13 ▶ CAPEX equivalente por sector, USD/t CO₂e absorbida/año

CAPEX equivalente	USD/tonelada evitada
Industria	2.500
Residencial	4.100
Comercial	4.100
Agricultura	1.500
Aviación, marítimo y ferroviario	3.500

Fuente: Estimación propia con base en el estudio *Sixth Carbon Budget*, CCC.

Las inversiones necesarias para cubrir las reducciones de las emisiones de GEI se calculan utilizando las diferencias anuales incrementales (año N menos año N-1) de emisiones por sector entre el escenario tendencial y los otros tres escenarios (BAU, NZ 2050 y NZ 2060) multiplicado por el CAPEX equivalente por sector.

Captura, uso y almacenamiento de carbono

En caso de corresponder según el país, las estimaciones de financiamiento en CCUS se calcularon utilizando el diferencial interanual (año N menos año N-1) de las emisiones absorbidas por la industria, multiplicado por el CAPEX unitario de un proyecto de CCUS capaz de almacenar 1 MtCO₂ por año. Este costo unitario se estimó en USD 1.000 por tonelada de CO₂ absorbida³⁶.

³⁶ <https://sustainability.crugroup.com/article/carbon-capture-economics-why-usd-200-per-tco2-is-the-crucial-figure>

Las inversiones en el sector eléctrico abarcan la construcción de nuevas plantas de generación, infraestructura y flexibilidad, redes de transmisión y distribución, así como el desmantelamiento de centrales. En cuanto a los usos finales, incluyen medidas de eficiencia energética, electrificación, empleo de combustibles alternativos, cambios de comportamiento y CCS.

Trabajos citados

CEBRI, E. C. (2023). *Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil.*

Engrinter, Mercados Energéticos Consultores, Datum. (2016). *Balance Nacional de Energía Útil.*

EPE. (2019). *Atlas of Energy Efficiency Atlas.*



EUROSTAT. (2021).
Obtenido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households

Fundación Bariloche. (2020). *BALANCE NACIONAL DE ENERGÍA ÚTIL.*

IEA. (2021). *Net Zero by 2050.*

IEA. (2021). *Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector.*

IEA. (2022). *Energy Efficiency 2022.*



Foro Internacional de Transporte, BID. (2022).
Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/english/viewer/Decarbonising-Transport-in-Latin-American-Cities-Assessing-Scenarios.pdf>

Law, H. &. (2015). *The motorcycle to passenger car ownership ratio and economic growth: A cross-country analysis.*

Ministerio de Minas y Energía. (2005). *Balanço de Energia Útil.*

OLADE, BID. (2017). *Manual Estadística Energética.*

SENER. (2022). *Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: Un análisis desde la perspectiva de usos finales.*

UPME. (2019). *Balance de Energía Útil.*

UPME, IREES, TEP, Corpoema. (2019). *Primer Balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Pérdidas Energéticas Relacionadas y la Brecha de Eficiencia Energética.*

ANEXO.

Aspectos metodológicos detallados



Proyección del PIB

De acuerdo con la definición del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), se considera que un país cuenta con un muy alto desarrollo humano cuando su IDH es igual o mayor que 0,8³⁷. A su vez, se considera que un país logra satisfacer todas sus necesidades energéticas cuando muestra valores de consumo eléctrico mayores que 5.000 kWh per cápita/año³⁸.

Con el fin de establecer un margen de niveles de PIB mínimos que deben alcanzar los países a largo plazo, se utiliza el PIB promedio del quintil inferior de países con IDH muy alto, y el PIB promedio del quintil inferior de los países con consumos eléctricos superiores a 5.000 kWh per cápita/año. Se concluye que el PIB per cápita objetivo de los países para cubrir sus necesidades energéticas insatisfechas y para poder considerarse desarrollados se encuentra comprendido en el margen entre USD 21.000 y USD 33.000, medido en dólares estadounidenses PPP con base en 2017.

³⁷ <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicies/HDI>

³⁸ GROVER, R. B. *An examination of the narratives about the electricity sector*. Current Science, 2020, vol. 119, n.º 12, p. 1910l

Con este objetivo de largo plazo definido y con el fin de realizar las proyecciones de PIB, se utilizaron distintas herramientas y metodologías de estimación. Estas herramientas y metodologías se detallan a continuación-

A Tendencia histórica: regresión lineal

Se realizaron las proyecciones del PIB a través de una regresión lineal de los datos utilizando la tendencia histórica de los datos disponibles del período entre 1990 y 2021 pertenecientes al Banco Mundial³⁹. En la tabla 14, se presentan las fórmulas utilizadas en las regresiones lineales de los países.

Tabla 14 ▶ Fórmulas de regresión lineal por país

País	Regresión lineal
Colombia	$Y=223,7x+7.484,9$
Brasil	$Y=180,46x+9.926,5$
México	$Y=141,56x+15.498$
Perú	$Y=280,46x+3.954$
República Dominicana	$Y=392,86x+4.856,1$

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Banco Mundial. x: año; Y: PIB.

³⁹ <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.KD?locations=BR-CO-MX-PE-DO>

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que las regresiones lineales autorregresivas tienen grandes problemas de heterocedasticidad en la estimación de más de 10 años de proyección.

De esta forma, el resultado no logra reflejar las mejoras en el ambiente de negocios ni en los niveles educativos de los últimos 20 años que deberían ser la base para un mayor crecimiento y desarrollo de los países.

B Tendencia histórica: modelo *logit*

Se realizaron las proyecciones del PIB a través del modelo *logit* utilizando la tendencia histórica de los datos disponibles del período entre 1990 y 2021 pertenecientes al Banco Mundial⁴⁰.

Dicha forma de estimación combina dos esquemas de proyección y permite simular un emparejamiento del PIB de los países hacia el mundo desarrollado. En este caso, el PIB per cápita de Estados Unidos estimado a 2100, en el cual se asume una tasa de crecimiento constante y fija de 0,9 % interanual, se utiliza como punto de saturación. Dicha tasa de crecimiento es la tasa efectiva anual (TEA) mínima de Estados Unidos en el período entre 1990 y 2021, correspondiente al año 2007. El PIB per cápita de saturación utilizado para el modelo *logit* es USD 132.805.

Dada la poca cantidad de datos disponibles (31 años) y la brecha existente entre los países en desarrollo y el mundo desarrollado, las proyecciones de los países no logran alcanzar el nivel de saturación.

C Extrapolación de la tasa efectiva histórica

Para la extrapolación de las tasas efectivas históricas, se utilizan las tasas de crecimiento de los últimos 31 años del período entre 1990 y 2021. En la tabla 15, se presentan las tasas efectivas históricas utilizadas por país.

40 <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.KD?locations=BR-CO-MX-PE-DO>

Tabla 15 ▶ Tasa efectiva anual entre 1990 y 2021 por país

País	TEA
Colombia	1,80 %
Brasil	1,10 %
México	0,70 %
Perú	2,85 %
República Dominicana	3,61 %

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Banco Mundial.

Cabe destacar que dicho parámetro no logra reflejar los cambios de entorno de los últimos años, ni logra predecir mejoras en la productividad total de los factores de los distintos países.

D Modelo ARIMA

A partir de la base de datos del PIB per cápita en el período entre 1990 y 2021, se corren múltiples modelos ARIMA de proyección al año 2060 a través de un sistema de procesamiento de datos de forma automática. Se pide al sistema que seleccione el modelo ARIMA que realice el mejor ajuste de acuerdo con el criterio de información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés).

Es necesario tener en cuenta que, ante la acotada base de datos disponibles (31 datos), los modelos ARIMA pueden presentar problemas en sus estimaciones y no puedan observar autocorrelaciones de más de un período.

De esta forma, es de esperar que las proyecciones de estos modelos tiendan a parecerse a las proyecciones realizadas con la extrapolación de las tasas efectivas.

E Esquema *ad hoc*: modelo *logit* ajustado

El esquema *ad hoc*, o modelo *logit* ajustado (*catch up*), es una propuesta del consultor que introduce una mayor tasa de crecimiento en las proyecciones asumiendo un aumento en los niveles de productividad de los países.

Si bien esta metodología carece de un respaldo metodológico estricto como las metodologías previamente mencionadas, el modelo se basa en la necesidad de aumentar la productividad de las economías en desarrollo para lograr llegar a los niveles objetivo.

Además, contribuye para observar un escenario diferente e introducir la necesidad de repensar los resultados obtenidos por los demás escenarios.

F Comentarios finales

Para todas las metodologías previamente expuestas, las estimaciones del PIB total se realizaron ajustando los crecimientos del PIB per cápita previsto por las tasas de crecimiento poblacional esperada en los países.

Para ello, se utilizaron las estimaciones y proyecciones de población publicadas por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)⁴¹.

Los PIB totales proyectados se expresan en millones de USD medidos en PPP con base en el año 2017.

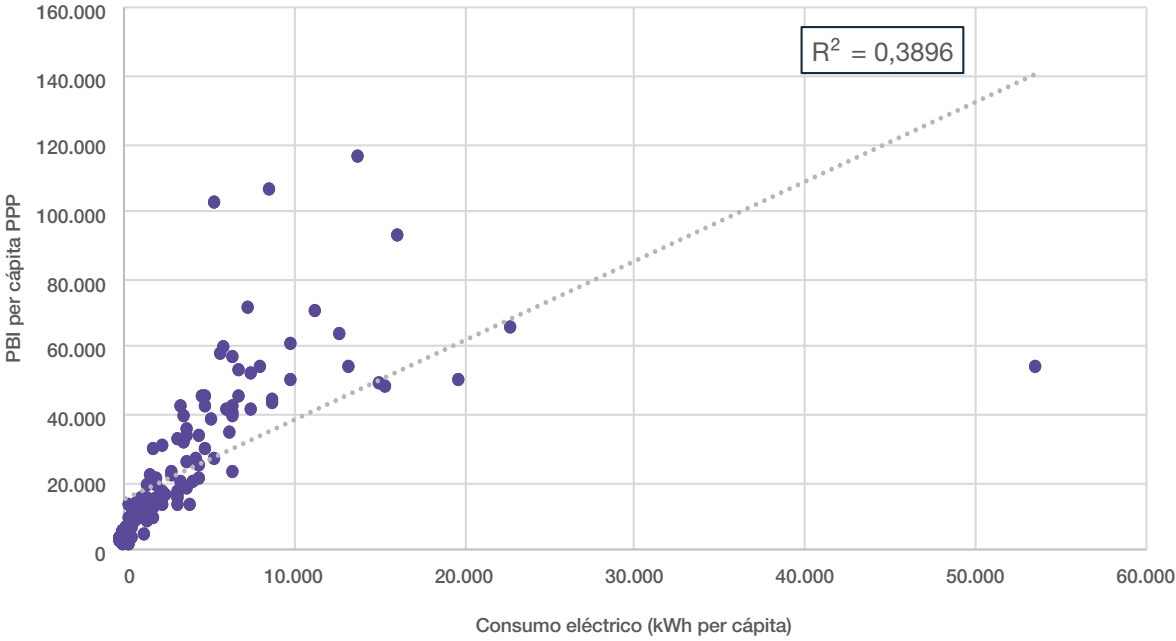
⁴¹ <https://www.cepal.org/es/subtemas/proyecciones-demograficas/america-latina-caribe-estimaciones-proyecciones-poblacion>



Identificación de países desarrollados

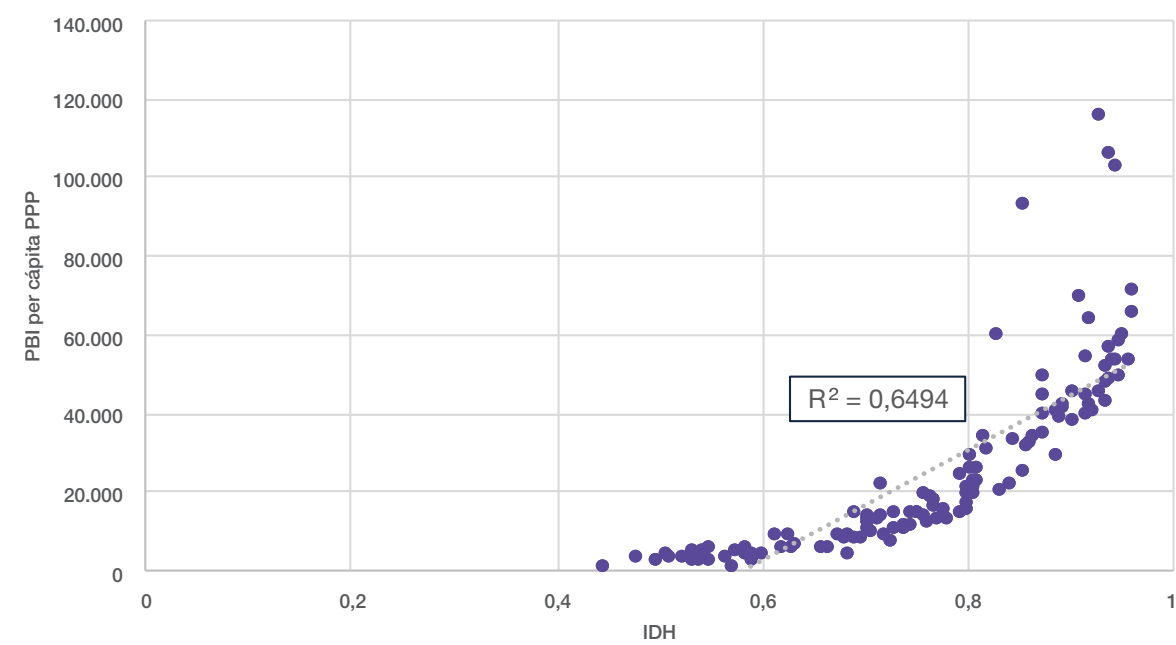
Se identificaron los países desarrollados a fin de utilizar el promedio de flotas vehiculares como punto de saturación en las proyecciones. Para ello, se realizaron correlaciones entre el PIB per cápita, el IDH y el consumo eléctrico per cápita para validar si los últimos dos son fieles indicadores del nivel de desarrollo de los países. Los resultados se muestran en los gráficos 16, 17 y 18.

Gráfico 16 ▶ Comparativo PIB per cápita, consumo eléctrico



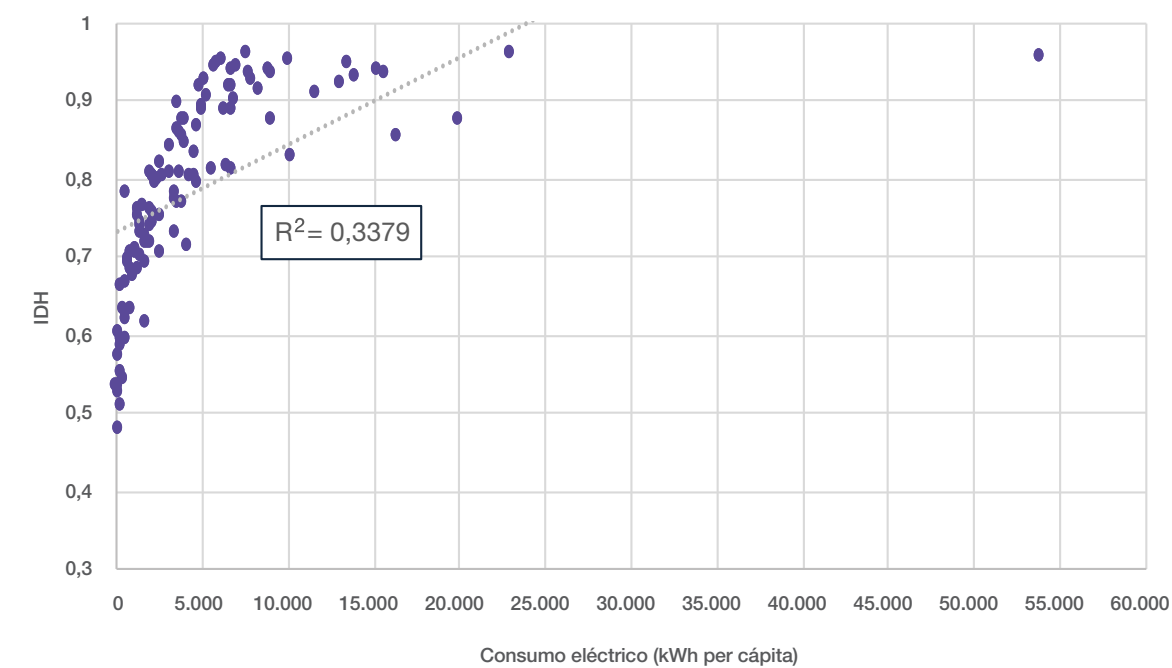
Fuente: Elaboración propia con base en datos del Banco Mundial.

Gráfico 17 ▶ Comparativo PIB per cápita, IDH



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Banco Mundial y del PNUD.

Gráfico 18 ▶ Comparativo PIB per cápita, consumo eléctrico



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Banco Mundial y del PNUD.

De esta forma, dados los tres últimos gráficos y las relaciones encontradas, se concluye con certeza que tanto los índices de desarrollo humano como los niveles de consumo eléctrico per cápita son fieles indicadores de los niveles de desarrollo de los países medidos en PIB per cápita.

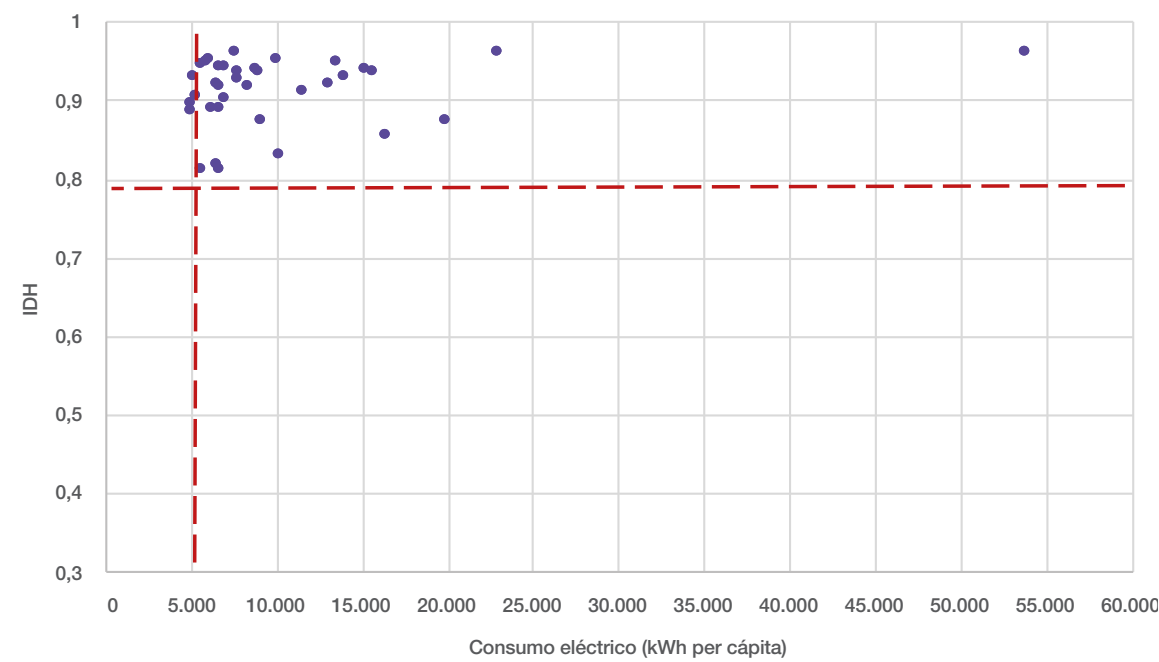
Siguiendo la definición del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, se considera que un país cuenta con un muy alto desarrollo humano cuando su IDH es igual o mayor que 0,8⁴². A su vez, se considera que un país logra satisfacer todas sus necesidades energéticas cuando muestra valores de consumo eléctrico mayores que 5.000 kWh/año⁴³.

42 <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicies/HDI>

43 GROVER, R. B. *An examination of the narratives about the electricity sector*. Current Science, 2020, vol. 119, no 12, p. 1910

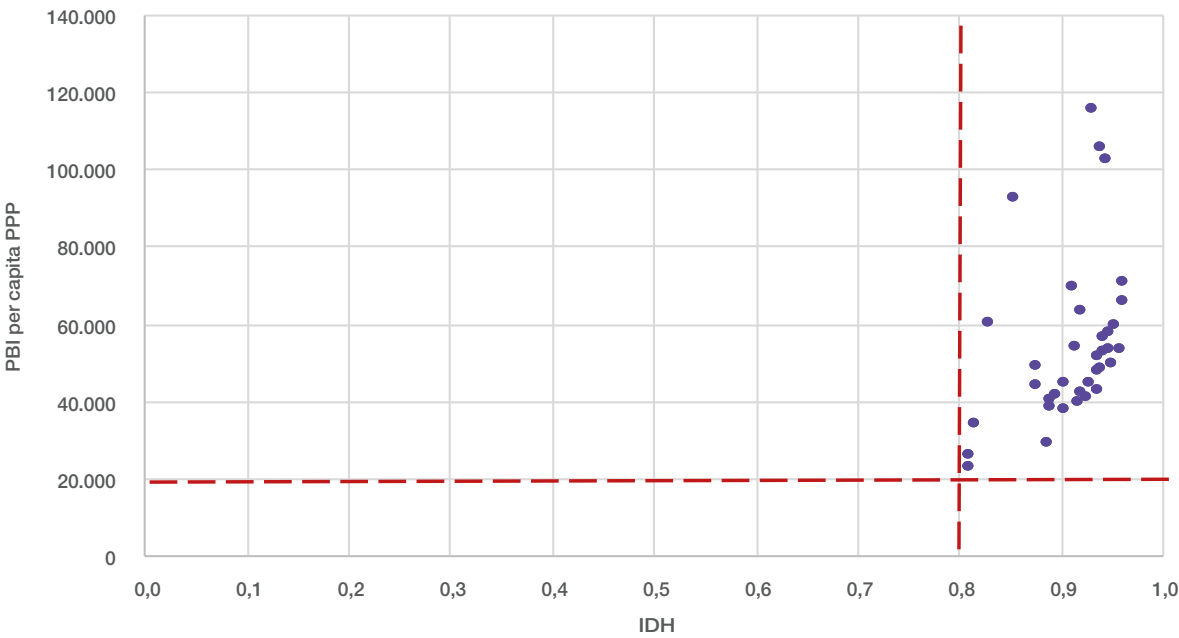
Finalmente, los gráficos 19 y 20 muestran los datos después de filtrar previamente por consumos eléctricos mayores que 5.000 kWh. Se observa que todos aquellos países con niveles de consumo mayores que el especificado cuentan con un muy alto nivel de desarrollo humano, es decir, un IDH mayor o igual que 0,8.

Gráfico 19 ▶ Comparativo IDH, consumo eléctrico mayor que 5.000 kWh



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Banco Mundial y del PNUD.

Gráfico 20 ▶ Comparativo PIB, IDH (consumo eléctrico mayor que 5.000 kWh)



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Banco Mundial y del PNUD.

Se concluye así que todos aquellos países con niveles de consumo mayores que el especificado cuentan con PIB per cápita mayores que USD 20.000 medidos en PPP con base en 2017. A su vez, dadas las conclusiones obtenidas del gráfico 20 anterior, dichos países se consideran de muy altos niveles de desarrollo humano.



caf.com



scioteca.caf.com



[CAF.America.Latina](https://www.facebook.com/CAF.America.Latina)



[CAF](https://www.linkedin.com/company/CAF)



[AgendaCAF](https://www.instagram.com/AgendaCAF)



[AgendaCAF](https://twitter.com/AgendaCAF)



[CAFenVideo](https://www.youtube.com/CAFenVideo)