

Documento N° 576

ARCHIVOS DE ECONOMÍA

Hacia una economía baja en carbono en Colombia: Elementos de reflexión de política económica

Gustavo Hernández

ghernandez@dnpp.gov.co

Santiago Barbosa Naranjo

sbarbosa@dnpp.gov.co

Luis Felipe Quintero

luiquintero@dnpp.gov.co

Con la dirección y coordinación de:

Luis Jorge Garay Salamanca

lugara@dnpp.gov.co

Gabriel Armando Piraquive

gpiraquive@dnpp.gov.co

Febrero de 2025

Hacia una economía baja en carbono en Colombia: Elementos de reflexión de política económica

Gustavo Hernández*
ghernandez@dnpp.gov.co

Santiago Barbosa Naranjo
sbarbosa@dnpp.gov.co

Luis Felipe Quintero
luiquintero@dnpp.gov.co

Con la dirección y coordinación de:

Luis Jorge Garay Salamanca
lugara@dnpp.gov.co

Gabriel Armando Piraquive Galeano
gpiraquive@dnpp.gov.co

♣ Los autores son, respectivamente: Subdirector de Estudios Macroeconómicos, Sectoriales y Regulación, y Asesor profesional, y Asesor de la Dirección General y Director de la Dirección de Estudios Económicos, del Departamento Nacional de Planeación. Agradecemos el trabajo de Nicolás Ramírez y Erick Céspedes, por su colaboración en el análisis de múltiples escenarios, utilizando modelos desarrollados por la Dirección. Las opiniones y los errores y omisiones son responsabilidad de los autores y no comprometen a la institución en la que trabajan.

Tabla de Contenido

Introducción

Colombia y la crisis climática: La necesidad de una justicia ambiental globalizada

La huella de carbono sectorial en la estructura económica de Colombia

La huella hídrica en Colombia

Perspectivas sobre la transición energética: Navegando hacia un futuro sostenible y equitativo

El hidrógeno verde como recurso estratégico potencial en la transición energética de Colombia

Efectos económicos de la transición baja en carbono

En torno a las oportunidades para la economía nacional de las cadenas de valor de las energías renovables

El turismo sostenible como motor de desarrollo económico y social

Consideraciones finales

Introducción

El Acuerdo de París, adoptado en 2015, tiene como objetivo limitar el calentamiento global a un incremento por debajo de los dos grados centígrados (preferiblemente 1,5), en comparación con los niveles preindustriales (UNFCCC, 2015). Los países firmantes del acuerdo han adoptado, en mayor o menor grado, distintas políticas de adaptación y mitigación para promover una transición baja en carbono, con el objetivo de llevar sus economías a una neutralidad en carbono hacia 2050.

A nivel global varios países y regiones están adoptando políticas activas hacia una descarbonización de la economía. Los gobiernos de la Unión Europea, Estados Unidos, China, Japón y Corea del Sur, que en conjunto representan cerca del 70% del PIB mundial y más del 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, se han comprometido con la descarbonización para 2050 o 2060. Al analizar la inversión global realizada en capacidad de energía renovable en el periodo 2010 – 2019, resulta claro que China (US\$758 mil millones), Estados Unidos (US\$356 mil millones), Japón (US\$202 mil millones), Alemania (US\$179 mil millones) y el Reino Unido (US\$ 122 mil millones) están liderando la transformación hacia la búsqueda de fuentes renovables de energía.

De otra parte, Colombia es uno de los países latinoamericanos con mayor compromiso con los objetivos suscritos en el Acuerdo de París, a pesar de que su contribución con las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a nivel global son bastantes bajas. Para 2018, los GEI emitidos por Colombia representaron el 0,21% de las emisiones globales y el 4,7% de las latinoamericanas. A su vez, en términos per cápita, las emisiones de Colombia alcanzan 1,6 tCO₂ eq, por debajo del promedio de América Latina y el Caribe, de 2,6 tCO₂ eq.

En la búsqueda por alcanzar un sistema de justicia climática global como sistema complejo bajo principios de equidad, reciprocidad y corresponsabilidad en una perspectiva intergeneracional, resulta evidente la necesidad de establecer un esquema de gobernanza global incluyente y democrático en el que la cooperación internacional Norte global – Sur global debiera desempeñar un papel crucial. En este contexto de referencia, se muestran campos de acción determinantes en la cooperación y el financiamiento Norte-Sur para promover la transición energética y ecológica en el marco de la lucha contra la crisis climática global y por el desarrollo sustentable y resiliente socio-ecológicamente.

Además, es importante tener en cuenta que aquí se hace referencia a un esquema de gobernanza global y de cooperación internacional para la lucha contra el cambio climático y apenas se mencionan a manera de ilustración alternativas de financiamiento de una política de transición hacia una economía baja en carbono, las cuales deben ser analizadas exhaustivamente para poder definir una eficaz estrategia de financiamiento para la transición. Sin una adecuada estrategia de financiamiento, en la que deben converger tanto el sector público como el sector privado, además de los organismos multilaterales y la cooperación internacional, llevar a cabo la descarbonización de la economía colombiana es una tarea prácticamente irrealizable.

Ante la multiplicidad de impactos de la transición energética en los ámbitos económico, político, social y cultural, y la variedad de tipos y trayectorias de transición ecológica, resulta fundamental la adopción de una política de Estado sobre la transición ecológica con miras a maximizar el beneficio social, económico y ecológico en una perspectiva perdurable en clave de resiliencia y sustentabilidad socio-ecológica. Esta política de Estado ha de servir como marco de referencia para guiar la iniciativa privada, pública y comunal. Por supuesto tal política estructural no debe regirse exclusivamente por la búsqueda de maximización de ganancias de corporaciones privadas nacionales y transnacionales, sino también, y de manera determinante, por el bienestar social de las comunidades afectadas directa e indirectamente. Es decir, se trataría no solamente de una mera estrategia corporativista, sino fundamentalmente de una estrategia socio-ecológica sistémica de carácter público, privado y comunal.

De otra parte, hay que mencionar que el calentamiento global trae como consecuencia diferentes clases de riesgos físicos, entre ellos inundaciones, huracanes, sequías, etcétera. Como lo señala

DNP (2021), “de acuerdo con cifras de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), el 87% de los desastres en Colombia se asocian con la variabilidad climática, y el 13 % de la población está en riesgo ante desastres hidrometeorológicos. No adaptarse a los fenómenos asociados al clima, puede generar pérdidas económicas anuales de por lo menos el 0,5 % del PIB nacional, según el “Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático del DNP”. Por lo cual es necesario limitar los riesgos derivados de la variabilidad climática y reducir estas vulnerabilidades, mediante diferentes políticas de adaptación. A pesar de la importancia de esta clase de políticas, este no es el foco central de la presente serie de documentos, sino que solamente se concentra en políticas de mitigación.

La transición hacia una economía baja en carbono podría afectar sustancialmente a los países exportadores netos de combustibles fósiles, por su elevada vulnerabilidad cambiaria (de ingresos de divisas), financiera, productiva y/o fiscal con respecto a las actividades extractivas de combustibles fósiles, como es el caso de la economía colombiana. En su informe anual “Perspectivas de la Energía en el Mundial”, publicado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) para 2023¹, menciona que la demanda mundial de combustibles fósiles alcanzará su punto máximo en 2030, para luego ir descendiendo a medida que, entre otros factores, aumenten las ventas de automóviles eléctricos y la economía china observe menores tasas de crecimiento y se oriente hacia energías más limpias. Sin embargo, también menciona que la demanda de combustibles fósiles seguirá siendo demasiado alta por unas décadas para mantener al alcance el objetivo del Acuerdo de París.

Paralelamente, la descarbonización de las economías impulsa la demanda de materiales críticos para la energía renovable y la sostenibilidad de bajas emisiones hacia el futuro. Por ejemplo, en 2023 la demanda de litio aumentó en un 30 % y de otros minerales como cobalto, níquel, grafito entre 8 % y 15 %, con el agravante que por lo menos con la tecnología disponible en la actualidad las tasas de reutilización de estos minerales son muy baja: menos de un 1% en el caso del litio, un 30 % para el cobalto y un 68 % para el níquel (Granados, 2024). Situación que de no superarse drásticamente con la innovación tecnológica se constituiría en el germen de una etapa ulterior de la crisis climática en el futuro.

Además, de no tomarse las decisiones de política pública requeridas se correría el riesgo de que los países del Sur global con cuantiosas reservas de estos minerales incurran en los inconvenientes ambientales, productivos y económicos reproducidos con el neoextractivismo de tipo enclave implementado desde finales de los ochenta del siglo pasado.

Por lo mencionado anteriormente, se hace necesario analizar cuáles pueden ser los efectos de la implementación de políticas orientadas hacia una transición baja en carbono, en aras de conocer cómo puede verse afectada la economía colombiana, y así poder afinar el ritmo y plazo de duración más apropiado y realista del proceso de descarbonización. En esta serie de documentos se presentan distintos tipos de análisis tanto a nivel sectorial como macroeconómico y desde una perspectiva tanto nacional como regional, los cuales se basan en distintas clases de herramientas de análisis económico. Es claro que las consecuencias de esta clase de políticas no sólo se producen a nivel ambiental y económico, sino que también suelen ser importantes a nivel social, por lo cual deben analizarse los efectos a nivel socioeconómico (por ejemplo, empleo, generación de ingresos y pobreza).

En el marco de la política hacia una transición baja en carbono, se plantea que los sectores con mayores emisiones debieran reducir su participación en la economía o debieran transformar su forma de producción para reducir sus emisiones, dando prioridad a los sectores con menores emisiones. Por lo cual, en una primera instancia aquí se analiza cuáles son los sectores actualmente “más contaminantes” y su relación con la estructura económica. Esto es, si estos sectores tienen alguna relación con los sectores más dinámicos de la economía, para comprender a cabalidad tanto la importancia de los canales de transmisión como los principales retos y desafíos que puede enfrentar la economía colombiana, y así ir identificando elementos de juicio para el diseño de política económica: las áreas en las que la política pública podría y/o debería intervenir y a través de cuáles

¹ Para más detalles, véase IEA (2023).

tipos de acciones de adaptación, así como dilucidar cuáles pueden ser las acciones de política de mitigación más adecuadas.

Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que la producción de algunos de los principales sectores contaminantes GEI, también utilizan una gran cantidad de agua en su proceso productivo, como es el caso de los sectores de agricultura, ganadería, electricidad y de actividades ilegales como la deforestación, la minería ilegal, el cultivo y procesamiento de hoja de coca, entre otros. Por lo cual, se hace imprescindible conocer el uso de los recursos hídricos a nivel sectorial (es decir, el uso directo del agua), así como las relaciones intersectoriales de consumo del agua (es decir, el uso indirecto del agua). Ello como sustento decisivo para la toma de decisiones sobre una gestión integral de los recursos hídricos y del ambiente en clave de desarrollo sustentable y resiliente socio-ecológicamente.

Hay consenso en que una de las acciones de la política de descarbonización, es el cambio en la matriz energética, esto es, transitar de una matriz de energía basada en combustibles fósiles hacia una matriz en la que primen energías renovables. Aquí se realiza un análisis de escenarios en el que, dadas las restricciones tecnológicas del sector energético y los costos asociados a las tecnologías renovables, se especifican cuál(es) podría(n) ser la(s) matriz(ces) energética(s) “ideal(es)” para Colombia. A partir de la matriz actual, se consideran diferentes alternativas de transición como: i) priorización entre fuentes de energía renovables y ii) imposición de metas diferenciales sobre emisiones de GEI. Esto permite identificar matrices alternativas para alcanzar metas de reducción de GEI, con sus respectivas composiciones de fuentes de energía y costos de adopción de nuevas tecnologías.

En la exploración de opciones para llevar a cabo la implementación de energías más limpias, el hidrógeno verde surge como una atractiva alternativa hacia futuro. Razón por la cual se avanza con el planteamiento de algunos de los principales desafíos para que este tipo de energía renovable se pueda convertir en una oportunidad viable y sostenible en el proceso de transición de la matriz energética de Colombia. Por supuesto, es claro que la transición energética y el cambio de la matriz energética sólo podrán lograrse en la medida en que se produzca un cambio en el metabolismo social predominante en la actualidad –con transformaciones en los hábitos de consumo, estilos de vida y de relacionamiento con la Naturaleza, etcétera–, en clave de la resiliencia y sustentabilidad socio-ecológica.

En el contexto económico de la transición energética, se analiza cuáles pueden ser los efectos sobre la producción y socioeconómicos ante una reducción de determinados sectores, particularmente los sectores de petróleo y carbón como combustibles fósiles. Dado que la reducción en la producción y exportación de petróleo y carbón es un proceso complejo con un impacto significativo sobre la economía colombiana –primordialmente a nivel macro sobre la balanza de pagos por la caída en los ingresos de exportación e inversión extranjera y las finanzas públicas por la pérdida de impuestos y regalías asociadas al petróleo y carbón, así como especialmente a nivel de algunas regiones y localidades–, se analizan diferentes clases de políticas para mitigar los efectos no deseados de la descarbonización de la economía. Es importante considerar que los impactos en el PIB y el empleo a nivel macro de una política como es la de reducción de emisiones de GEI, suelen ser relativamente “moderados”, pero con efectos mucho mayores proporcionalmente a nivel local, por lo cual el análisis, además de identificar sus consecuencias a nivel nacional, debe estimar con debido rigor los impactos a nivel regional.

A partir de los resultados encontrados, se consideran, a manera de ejemplo, las consecuencias de la adopción de dos alternativas de política pública para la mitigación de los impactos de la transición. En primer lugar, una política focalizada en el aparato productivo de las regiones más afectadas, a partir del incremento en la producción de los sectores agrícola, agroindustrial y de turismo bajo el criterio de sustentabilidad ecológica. En segundo lugar, ante la evidencia de que el mercado laboral puede verse de afectado de forma negativa, lo que lleva a que los indicadores de pobreza e ingresos se deterioren, se toma como otra alternativa de política para mitigar estos efectos, la de realizar temporalmente una transferencia no condicionada para quienes pierdan su empleo por la transición, mientras logren engancharse al mercado laboral. De cualquier manera, es claro que la política de transformación productiva hacia determinados sectores y actividades con potencialidad en el marco

de la transición energética y ecológica resulta deseable económica y socio-ecológicamente en el mediano y largo plazo.

De otra parte, el cambio de la matriz energética presenta nuevas alternativas para la creación de empleo y, por ende, la generación de ingresos. Para lo cual se analiza la cadena de valor de las energías renovables, y a partir de allí, las oportunidades que podrían surgir, tanto en términos de nuevas alternativas de producción como de generación de empleo, lo que contribuiría, al menos en parte, a dejar atrás la alta dependencia de los sectores minero-energéticos que tiene el país.

Referencias

Departamento Nacional de Planeación – DNP (2021). Política pública para reducir las condiciones de riesgo de desastres y adaptarse a los fenómenos de variabilidad climática. Departamento Nacional de Planeación, Conpes No 4058.

Granados, O. (2024). “El reto de reciclar los minerales críticos”. El País (23 de junio).

International Energy Agency – IEA. (2023). World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.

UNFCCC (2015). Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations.

Colombia y la crisis climática:
La necesidad de una justicia ambiental globalizada

Introducción

El Acuerdo de París, adoptado en 2015, tiene como objetivo limitar el calentamiento global a un incremento por debajo de los dos grados centígrados (preferiblemente 1,5), en comparación con los niveles preindustriales (UNFCCC, 2015). Los países firmantes del acuerdo han adoptado, en mayor o menor grado, distintas políticas de adaptación y mitigación para promover una transición baja en carbono, con el objetivo de llevar sus economías a una neutralidad en carbono hacia 2050.

Según los datos oficiales de la ONU, en 2021 China fue el principal emisor de gases de efecto invernadero, con el 30% del total mundial. Le siguen a gran distancia Estados Unidos (11%), India (7%), la Unión Europea (7%) y Rusia (5%). Pero si se atiende a las responsabilidades históricas, esto es, si se toma como referencia las emisiones acumuladas entre 1850 y 2021, Estados Unidos es el primero, con el 17%, seguido por China (12%), la Unión Europea (10%), Rusia (6%) e India (5%).

En su informe anual “Perspectivas de la Energía en el Mundial”, publicado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) para 2023, menciona cómo la demanda mundial de combustibles fósiles alcanzará su punto máximo en 2030, para luego ir descendiendo a medida que aumenten las ventas de automóviles eléctricos y la economía china crezca más lentamente y se oriente hacia energías más limpias. Sin embargo, también muestra que la demanda de combustibles fósiles seguirá siendo demasiado alta por unas décadas para mantener al alcance el objetivo del Acuerdo de París.

Ahora bien, a nivel global varios países y regiones están adoptando políticas activas hacia una descarbonización de la economía. Los gobiernos de Estados Unidos, China, Unión Europea, Japón y Corea del Sur, que en conjunto representan cerca del 70% del PIB mundial y más del 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, se han comprometido con la descarbonización para 2050 o 2060. Al analizar la inversión global realizada en capacidad de energía renovable en el periodo 2010 – 2019, resulta claro que China (US\$758 mil millones), Estados Unidos (US\$356 mil millones), Japón (US\$202 mil millones), Alemania (US\$179 mil millones) y el Reino Unido (US\$ 122 mil millones) están liderando la transformación hacia la búsqueda de fuentes renovables de energía.

Esta transición hacia una economía baja en carbono podría afectar sustancialmente a los países exportadores netos de combustibles fósiles, por su elevada vulnerabilidad cambiaria (de ingresos de divisas), financiera, productiva y/o fiscal con respecto a las actividades extractivas de combustibles fósiles, como, en cierta medida, es el caso de la economía colombiana. Kompas, van Ha y Che (2018) estiman que las regiones más afectadas por el cambio climático serían África subsahariana, Asia Sureste e India, siendo esta última la única de las cuatro principales naciones emisoras que se encuentra dentro de los setenta países más afectados.

Como se puede observar, la problemática climática reside en la disparidad de responsabilidades entre países en cuanto a la contaminación y emisiones de CO₂ ya causadas en el planeta. Y todavía más, ante la circunstancia de que los países potencialmente más afectados son precisamente los que disponen de menos recursos tecnológicos y financieros para hacerle frente a la prevención y la mitigación de los impactos del cambio climático y el deterioro medioambiental: los países del Sur, por decirlo así. Por lo cual, la problemática del cambio climático y la preservación del medioambiente constituye un caso emblemático de la necesidad estructural de ir desarrollando las bases de un sistema de justicia transnacional vinculante, especialmente, por esquematizarlo así, entre países desarrollados (Norte global) y países en desarrollo (Sur global).

La globalización y la necesidad de un sistema de justicia transnacional²

La creciente interdependencia entre sociedades y Estados en el marco de la globalización no debidamente regulada a nivel transnacional bajo criterios de corresponsabilidad y reciprocidad intertemporal entre países tiende a llevar a la exacerbación de asimetrías y acciones unilaterales (en muchos casos oportunistas), por lo que se requiere desarrollar “un nuevo derecho a la autodeterminación transnacional” (Innerarity, 2013a).

Sin duda alguna, el cambio climático se ha erigido como una de las fuentes potenciales de conflictos y contradicciones sociales más agudas en el mundo. La disponibilidad y el acceso al agua es uno de los casos más sobresalientes, ya que cerca de tres cuartas partes del agua dulce del planeta se localiza en solo cinco países, por lo que puede convertirse en una causante de graves conflictos internacionales en un futuro previsible.

Esto hace que la justicia climática y medioambiental/ socioecológica se erija como un caso típico de “justicia compleja”, precisamente por la complejidad de los criterios de justicia que se deben invocar transnacionalmente.

Quizás un primer criterio de justicia transnacional ha de relacionarse con la distribución intertemporal de causas detonantes del deterioro climático, así como de agentes responsables (por ejemplo, países y empresas) del medioambiente y su correlativa participación en la asunción de costos de prevención, mitigación y compensación internacional a países afectados. Particularmente importante es la compensación de los impactos históricos ya causados, es decir, la cancelación de la deuda ambiental y social por parte de los países causantes/responsables del cambio climático en favor de los países afectados. Autores como Giddens (2010) lo han vinculado con el “imperativo del desarrollo” de los países más pobres que no han contribuido hasta ahora sino marginalmente al calentamiento global y al deterioro del medioambiente.

Un segundo criterio se refiere a cómo han de distribuirse las responsabilidades/ compensaciones sobre emisiones y deterioro del medioambiente hacia el futuro. Uno de los criterios más renombrados es el de la imparcialidad en el sentido de la minimización/no causación de daño.

Para garantizar una aplicación de este criterio bajo principios redistributivos habrían de adoptarse medidas integrales que faciliten a los países pobres y en desarrollo a asumir su responsabilidad en la conservación ambiental, consistentes en múltiples variantes de transferencias por parte de los países desarrollados, no mutuamente excluyentes entre sí, a través de, por ejemplo: la transferencia tecnológica, o la imposición de gravámenes en los países consumidores del Norte sobre productos provenientes de países del Sur como en el caso típico de los minero-energéticos, y la transferencia de sus recaudos a los países productores en calidad de compensación, o, entre otros, la transferencia de recursos de los países del Norte a los del Sur para compensar la pérdida de ingresos debida a la menor o incluso la no explotación de recursos no renovables a partir de una cierta cuantía que sea considerada depredadora por excelencia, por ejemplo, y/o para la mitigación de sus impactos medioambientales.

Este último tipo de transferencia correspondería a una típica “*lump sum transfer*” compensatoria y temporal a una desactivación relativa y una transición hacia tecnologías socio-medioambientalmente sustentables de una creativa y responsable explotación minero-energética, generador de valor agregado doméstico y de desarrollo productivo local, que ayuda a la mitigación de sus impactos globales/glocales.

Claramente existe una variedad de criterios adicionales susceptibles de ser adoptados para el desarrollo de una justicia transnacional del medioambiente o socio-ecológica a condición de que sean circunscritos bajo una perspectiva integral transgeneracional.

Por supuesto, los criterios rectores de la justicia climática transnacional han de rebasar los meros principios convencionales de mercado ante su contundente incapacidad, si no proclividad perversa, para impedir por sí solos la reproducción de dinámicas causantes del deterioro medioambiental y el

² Esta y la siguiente sección se sustentan estrictamente en Garay (2013).

cambio climático y la consecuente inequitativa distribución transgeneracional y transnacional de sus impactos depredadores.

Pero la razón de fondo reside en la misma naturaleza del clima y del medioambiente: un bien público global/glocal cuyo usufructo/afectación no es excluyente entre agentes, por lo que su suministro/restricción no puede ser regulado a través de la mera modulación de señales de mercado. Indudablemente, la gestión del clima y el medioambiente requiere de una gobernanza global cada vez más compleja e integradora y no dejarla a cargo del mero mercado como básicamente ha ocurrido hasta ahora.

La gobernanza de la lucha contra el cambio climático y la preservación del medioambiente

De lo expuesto, resulta evidente cómo el cambio climático y el deterioro del medioambiente es un fenómeno característico de glocalización en el sentido de que las emisiones y las acciones deterioradoras son materializadas a nivel local pero sus impactos son de naturaleza global y transgeneracional. Por ello se requiere la institución de un ente transnacional que pueda gestionar la problemática desde una perspectiva global, con la suficiente legitimación social para avanzar en la implantación de principios y normas de justicia transnacional bajo una perspectiva transgeneracional e intertemporal y en consulta de los diversos grados de desarrollo/capital acumulado/pobreza relativa de los países, según su responsabilidad como contaminador neto o como afectado neto.

Ahora bien, el esquema de gobernanza ha de ser corresponsable y cooperativo para la realización de compensaciones y transferencias de países contaminantes netos a afectados netos, por ejemplo, redistributivo (según nivel de desarrollo o PIB per cápita de los países), transtemporal/transgeneracional. Solamente con una institucionalidad de este tipo podrán irse generando las condiciones para la gobernanza de la preservación del medioambiente.

Sin embargo, mientras se va construyendo efectivamente una institucionalidad de esa naturaleza surge la pregunta de cómo deben ir actualizándose los regímenes regulatorios para la gestión del clima y el medioambiente en los países individuales, especialmente en los del Sur sujetos a la dicotomía: “imperativo del desarrollo” con especial sustento en la rápida explotación y procesamiento de sus recursos naturales no renovables bajo una perspectiva de corto y mediano plazo, y “responsabilidad de la preservación medioambiental a nivel glocal/global” en su carácter de miembro de la comunidad global en una perspectiva transgeneracional perdurable.

Quizás uno de los enfoques más equilibrados y menos radicales en términos transtemporales/transgeneracionales y de responsabilidad glocal restringida, consistiría en la adopción de un régimen de “minimización del daño glocal” (Joshi, 2009, citado por Innerarity, 2013) que, bajo un realismo político y social compensado, combine sopesadamente el racionamiento de la explotación de recursos naturales no renovables con base en elementos de juicio sustentables en términos científicos, económicos, sociales y ecológicos sobre su beneficio económico/social y su impacto medioambiental/social, y el aprovechamiento de recursos potencialmente favorables al desarrollo y la reducción de la pobreza/exclusión social.

En este contexto, de cualquier manera se hace necesario implantar de manera estricta el régimen regulatorio escogido bajo la responsabilidad inalienable del Estado con miras a garantizar una adecuada captación de la renta de la explotación de recursos no renovables de la Nación, por ejemplo, en cabeza del Estado, y una redistribución intertemporal entre inversiones para el desarrollo, la transición de la matriz energética, la transición ecológica y la transformación productiva, la mitigación/preservación del medioambiente, la redistribución entre grupos y comunidades y el mejoramiento de la calidad de vida de la población.

La gobernanza global y la corresponsabilidad del Norte al Sur en la transición estructural

Debe enfatizarse en la necesidad de avanzar hacia un modelo de gobernanza global en la lucha contra el cambio climático y el desarrollo sustentable y resiliente socio-ecológicamente consecuente con procesos de transición energética y ecológica y de transformación productiva en el marco de un sistema justicia compleja a nivel transnacional. Procesos que implican, en determinado grado, cambios en patrones de consumo y en modos de desarrollo económico prevalecientes en el capitalismo actual.

Este sistema de justicia debe partir del reconocimiento de la diferenciación entre grupos de países de responsabilidades en los daños causados por la génesis y evolución de la crisis climática global y de ventajas y daños derivados de la misma, como un criterio rector para la especificación de medidas de compensación y de corresponsabilidad interjurisdiccional que garanticen transiciones socio-ecológicas justas y equitativas a través del tiempo entre grupos de países.

De acuerdo con la experiencia histórica, los denominados países del Norte global han sido y continúan siendo los mayores contaminadores y depredadores medioambientales, con el agravante del surgimiento en las últimas décadas de otros países altamente contaminadores como China e India, entre otros, por lo que les compete decisiva responsabilidad y compromiso en la lucha global contra el cambio climático. Para ello, el Norte global ha de cooperar estratégicamente a nivel institucional, financiero y tecnológico con los países del Sur global.

Cambio hacia un desarrollo incluyente y socio-ecológicamente resiliente y sustentable

La agudización de graves fracturas sociales –con niveles crecientes de desigualdad y de concentración de la riqueza, y una relativa parálisis, sino retroceso, de la movilidad social ascendente– y la eclosión de la crisis socio-ecológica y el cambio climático a nivel mundial han develado fehacientemente la no sustentabilidad del modelo de desarrollo y de consumo potencializado por el sistema imperante. Razón por la cual se hace cada vez más inevitable la realización de cambios sustantivos en los patrones y niveles de consumo en el contexto internacional, entre los que resalta el caso de los combustibles fósiles y de otros recursos naturales escasos y/o no renovables.

Un ejemplo de ello es la conveniencia del desmonte paulatino de la producción de carbón y del consumo de petróleo e hidrocarburos, entre otros, en el tránsito hacia el uso de tecnologías “limpias” renovables. En este contexto, se hace indispensable transformar los hábitos y las modalidades de transporte público y privado, realizar la transición energética hacia fuentes renovables –no fósiles–, avanzar en la transición ecológica y la transformación productiva en clave de resiliencia social y ambiental.

Uno de los ejes paradigmáticos de cambio estructural es, como lo señala Garay (2021), “con carácter estructural socio-ecológico bajo un enfoque territorial/espacial y en una perspectiva perdurable de mediano y largo plazo, la búsqueda de un adecuado y comprometido balance entre aprovechamiento, preservación, potencialización y desarrollo de la riqueza natural en países con importantes biodiversidades y apreciados ecosistemas y fuentes de agua en el mundo –una riqueza invaluable a la luz de la aguda degradación del medioambiente y el cambio climático, de la ocurrencia de desastres ecosistémicos y del acelerado deterioro de fuentes de agua a nivel mundial–”.

Sin duda, este eje estratégico global ha de privilegiarse en la cooperación Norte global-Sur global en la lucha contra la crisis climática especialmente en el caso de países como Colombia.

Algunos campos estratégicos para el (re-)planteamiento de la cooperación internacional Norte-Sur³

En el contexto de las transformaciones estructurales que habrían de adelantarse en países del Sur global, con referencia especial a países como Colombia, resulta indispensable contar con un

³ Apartes de esta sección se basan, en buena medida, en: Garay (2021).

renovado ordenamiento internacional y un esquema de cooperación mundial promotor y facilitador de la requerida transición societal hacia un desarrollo sustentable y resiliente socio-ecológicamente.

Este (re-)ordenamiento internacional debe responder a un sistema de gobernanza de la lucha contra el cambio climático que promueva la debida y justa asunción de la debida corresponsabilidad por parte de los países del Norte global en la transición energética, ecológica y productiva de los países del Sur. Ello, en la medida en que la Naturaleza y el clima en plena crisis ambiental planetaria asumen el papel de una especie de bien público global, que les compete a todos los países sin excepción.

Ahora bien, el renovado ordenamiento debiera abarcar incluso algunas reformas del sistema internacional del Bretton Woods para facilitar la disponibilidad de recursos multilaterales y bilaterales para la financiación directa concesional e indirecta mediante la reducción de la deuda de países del Sur. Además, por supuesto, con el otorgamiento de recursos, garantías, seguros e incentivos de diversa índole para la inversión, tanto pública como privada, por parte de los gobiernos del Norte para la transición en países del Sur.

La cooperación internacional, con énfasis especial a la del Norte global con el Sur global, habría de abarcar las esferas de: (i) la inversión y la financiación de índole pública y privada, bi y multilateral, (ii) el tratamiento de la deuda externa, pública y privada, con agencias bilaterales de países del Norte, con organismos multilaterales y con entidades privadas internacionales, y (iii) las relaciones comerciales bilaterales o regionales –bajo acuerdos de libre comercio u otras modalidades preferenciales– y multilaterales (Garay, 2021).

Inversión

Ante el hecho de que la Naturaleza es una riqueza escasa y agotable y que su valor social intertemporal no es debidamente captado por los precios de mercado, en la medida en que su valor contable se diferencia de su precio de mercado, resulta necesario que las entidades financieras regulatorias de los países, especialmente del Norte global, promuevan la introducción de los costos/beneficios sociales y de los riesgos del uso de la Naturaleza para la valoración de la rentabilidad social y económica de las inversiones y de la financiación –pública y privada– en *pro de la Naturaleza*, como un requisito fundamental para promover recursos internacionales en actividades que contribuyan a la conservación, rehabilitación y desarrollo de la Naturaleza bajo el propósito de avanzar hacia la resiliencia socio-ecológica.

Además, los gobiernos de países desarrollados podrían contribuir a la canalización de recursos financieros a países del Sur para fines *pro-Naturaleza* mediante acciones como incorporar incentivos para la inversión con esos fines, proveer garantías públicas para reducir el riesgo de la inversión, brindar recursos de financiación preferencial para ese propósito y, entre otros, aplicar subsidios u otras medidas para favorecer este tipo de inversiones o la provisión de financiación para promoverlas.

Como lo han señalado Deuz *et al.* (2020) y la Oede (2020), las inversiones financieras en capital natural (léase Naturaleza) son todavía muy pequeñas, apenas del orden de 0.1% del PIB global, y todavía más modestas con relación a lo requerido para evitar la disminución del stock de la riqueza natural. Además, en el mundo, el monto de los flujos financieros públicos y privados en actividades que perjudican la Naturaleza supera con creces el destinado para su preservación. A manera de ejemplo, Coady *et al.* (2019) estiman que una vez contabilizadas las externalidades de los subsidios otorgados a las energías fósiles en el mundo, el costo neto de tales subsidios alcanzaría hasta cerca US\$5.2 trillones al año.

Complementariamente, los gobiernos de países desarrollados también podrían emitir bonos con el propósito de recaudar recursos para financiar la inversión en activos naturales o Naturaleza que sean considerados como “amigables con el ambiente” y “responsables con el clima” (Dasgupta, 2021). Estimativos muestran que, en 2019, 12 gobiernos emitieron 23 bonos denominados verdes por un total de US\$47.5 billones.

Resulta claro, de acuerdo con Garay (2021), “el amplio y auspicioso espacio que existiría para que países del Norte pudieran desarrollar acciones y políticas que proveyeran inversiones y financiación para la realización de actividades *pro-Naturaleza* en los países del Sur global, con especial relevancia de países estratégicos por su incomparable biodiversidad, riqueza ecosistémica, forestal y de fuentes de agua como el caso de Brasil y Colombia en América Latina por no citar sino dos ejemplos. Con la propiedad adicional de que este tipo de actividades tienden a ser intensivas en empleo, incluyentes al proveerles una ocupación valorable social e inter-generacionalmente, con ingresos laborales dignos, a grupos poblacionales vulnerables en el campo y zonas rurales, frecuentemente atrasadas y alejadas y con bajos estándares de calidad de vida”.

Argumentación similar a la de la transición ecológica recién referida aplica estrictamente para el caso de la transición energética hacia energías renovables que sustituyen a los combustibles fósiles, por lo que no vale la pena repetirla nuevamente. Solamente es de mencionar que, a diferencia de la transición ecológica, sobresale la necesidad de cuantiosos recursos de inversión directa proveniente de países del Norte global, especialmente de índole privada, para la realización de actividades indispensables para avanzar la transición energética y la transformación productiva, como se ilustró en el tercer y sexto documentos de la serie. Razón por la cual se han de reforzar medidas gubernamentales –regulatorias, normativas, financieras e impositivas– en países del Norte para promover e incluso incentivar la inversión privada para las transiciones estructurales en países del Sur.

Financiación y reducción de deuda

Uno de los retos para asegurar los recursos financieros para la transición energética y ecológica y la transformación productiva es utilizar en los deseable mecanismos idóneos de financiación sin recurrir a una nociva mercantilización de la Naturaleza como ocurre con la emisión de bonos carbono en los casos en que se legitima la emisión de GEI por parte de poderosas corporaciones de países del Norte a cargo de la compra de bonos carbono en comunidades rurales, generalmente vulnerables y sin alternativas de sostenimiento digno, de países del Sur, en unas condiciones provechosas para las corporaciones gracias a su poder negociador y al desbalance a su favor en cuanto a disponibilidad de información sobre condiciones internacionales de mercado, y sin adecuada regulación pública, entre otros factores. En la medida en que se reconoce que, en medio de una crisis climática planetaria como la actual, el clima y la Naturaleza adquieren una especie de carácter público global, no se compadece ni resulta aceptable, en términos de ética pública y de eficiencia de política pública, recurrir a este tipo de mercantilización de servicios ecosistémicos.

Así, entonces, se torna indispensable el diseño de mecanismos alternativos para la financiación de actividades *pro Naturaleza* ejercidas primordialmente por comunidades campesinas y colectivos étnicos, que no cuentan con recursos ni posibilidades financieras, a excepción en algunos casos que logran contratar bonos carbono en condiciones injustificadas.

Entre las alternativas disponibles para la financiación directa e indirecta por parte de los países acreedores del Norte para promover actividades *pro Naturaleza* en países deudores del Sur, son de mencionar los *swaps de deuda-por-Naturaleza* con la reducción del stock de deuda externa o de su servicio –valor de los intereses y amortizaciones de la deuda vigente– con el compromiso por parte de los gobiernos de los países deudores de invertir los ahorros del stock de deuda o del servicio de la deuda en actividades para la conservación y la restauración de la biodiversidad y la Naturaleza, y para las transiciones ecológica y energética. Esta opción es deseable siempre y cuando se alcance una significativa reducción de la deuda o de su servicio en favor del país deudor y de manera sostenida en el mediano plazo, y no como pareciera haber ocurrido en buen número de casos que parte importante de la reducción es usufrutuada por agentes intermediarios de la operación financiera y que la reducción efectiva en favor del país deudor resulte contrarrestada rápidamente por el aumento de su prima de riesgo y el encarecimiento de su futuro endeudamiento. En cualquier caso, hasta 2019, según Sommer *et al.* (2019), se había alcanzado la cancelación de un monto de deuda por apenas US\$1 billón, generándose cerca de US\$500 millones para actividades de conservación.

Dados los muy elevados niveles de endeudamiento público externo de países del Sur global con fuentes multilaterales y bilaterales, además de bonos en los mercados de capitales internacionales, existe un amplio espacio para que la banca multilateral como el Banco Mundial y el BID, las agencias bilaterales de países del Norte y la banca regional como la CAF en América Latina avancen de manera decisiva en la reducción de la deuda o del servicio de la deuda con propósitos *pro-Naturaleza* y a favor de las transiciones energética y ecológica en una región con reconocida riqueza de la Naturaleza, la biodiversidad y la variedad ecosistémica de carácter estratégico.

Por supuesto, para facilitar y potenciar el mecanismo de reducción de deuda o de su servicio a través de swaps u otras modalidades de fuentes multilaterales o bilaterales y la utilización de fondos como los de los DEG (Derechos Especiales de Giro), por ejemplo, se requiere realizar ciertas reformas importantes al sistema financiero de Bretton Woods como componente nuclear de un esquema de gobernanza global justo y democrático para la lucha contra el cambio climático y la transición energética y ecológica.

Además, la banca multilateral y bilateral han de adecuar su portafolio de financiación a países del Sur con énfasis especial hacia actividades *pro-Naturaleza* y a favor de las transiciones energética y ecológica.

Por último, “la reducción de la deuda o del servicio de la deuda con fines *pro-Naturaleza* (y transiciones energética y ecológica) en favor de los países deudores podría contribuir como mecanismo preventivo a la eventual detonación de una crisis de deuda externa en al menos algunos países del Sur” (Garay, 2021).

Convenios comerciales internacionales con orientación *pro-Naturaleza*

El campo de las relaciones comerciales internacionales, en particular entre los países del Norte global y del Sur global, constituye un ámbito de política pública internacional que puede contribuir a promover la transición ecológica y energética *pro-Naturaleza*, buscando favorecer preferencialmente el comercio de bienes de actividades de conservación y desarrollo resiliente de la Naturaleza y desestimular el de bienes resultantes de actividades depredadoras de la misma.

Una opción es la de la imposición de aranceles a la importación de bienes considerados *anti Naturaleza* como el caso de combustibles fósiles, entre otros, por parte de los países del Norte global con la condición de que una proporción de los impuestos tarifarios sean transferidos a países del Sur en calidad de corresponsabilidad y reciprocidad para la financiación de actividades prioritarias *pro Naturaleza* y de transición energética y ecológica en países del Sur.

Otra opción complementaria, no sustituta, entre otras, podría consistir en “el acceso preferencial a mercados internacionales de todo bien sea graduado relativamente de acuerdo con el impacto neto sobre la Naturaleza de las actividades productivas que intervienen en su elaboración: mayor acceso preferencial a mercados internacionales, *ceteris paribus*, en cuanto su proceso de producción sea más “amigable medioambiental y climáticamente” y favorable a la resiliencia y sustentabilidad socioecológica, es decir, *pro-Naturaleza*” (Garay, 2021).

La primera opción tiene la ventaja adicional a la segunda que generaría recursos nuevos para la financiación por parte de países del Norte a las transiciones *pro Naturaleza* en países del Sur. Este tipo de opciones en el ámbito del comercio internacional “estimularía a los países del Sur global hacia una mayor especialización en actividades *pro-Naturaleza* ante la progresiva valoración social preferente en los mercados internacionales y por parte de las sociedades en su conjunto” (Garay, 2021).

Antes de concluir, es de mencionar que en un documento posterior se analizarán en detalle instrumentos de financiación novedosos en el mercado internacional de capitales, dados los ingentes requerimientos de financiación externa para la transición energética y ecológica y la transformación productiva *pro Naturaleza* en un país del Sur como Colombia.

El análisis de diferentes instrumentos disponibles de financiación e inversión es fundamental para el diseño de una estrategia integral de financiamiento de la transición en la que deben converger tanto el sector público como el sector privado, además de los organismos multilaterales y la cooperación internacional, prácticamente irrealizable. Una estrategia eficaz de financiación resulta indispensable para hacer realizable la transición estructural de la economía.

Conclusiones

El protocolo de Kyoto⁴ marcó un punto de quiebre en las acciones para detener el incremento de la temperatura global, ya que comprometió a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de GEI de conformidad con las metas individuales acordadas, pero sin un objetivo claro de largo plazo. Luego, en el Acuerdo de París, en 2005, se tomó como meta limitar el calentamiento global a un incremento por debajo de los 2 grados centígrados (preferiblemente 1,5), en comparación con los niveles preindustriales.

El cambio climático es un fenómeno global que tiene impactos transgeneracionales y transnacionales, en el cual los países desarrollados (Norte global) tienen una mayor responsabilidad histórica, mientras que los países en desarrollo (Sur global) son los más vulnerables a sus efectos. Por lo cual, se exige que los países desarrollados compensen a los países en desarrollo por los daños causados por el cambio climático, en el marco de un sistema de gobernanza corresponsable y cooperativo. La construcción de una gobernanza global eficaz para abordar el cambio climático y el deterioro medioambiental es un desafío complejo, pero es necesario para garantizar un futuro sostenible para todos.

Ahora bien, mientras que esta justicia ambiental pueda llegar a darse, Colombia ha adoptado una postura en la que busca honrar los compromisos adquiridos en los diversos acuerdos internacionales que ha firmado para reducir las emisiones de GEI en el país. De ahí que resulta importante conocer sobre cuáles sectores deberían priorizarse las políticas que tienen como objetivo llegar a la carbono neutralidad hacia 2050-2060.

Uno de los elementos de juicio que permite contribuir a la especificación de cuáles pueden ser las políticas más efectivas es estimar la huella de carbono de los sectores, identificar la fuente de las emisiones y relacionarla con los sectores más dinámicos de la economía. Se puede mostrar que las políticas dirigidas hacia la transición energética y de transformación productiva en un país como Colombia –esto es, cambiar la generación de energía de fuentes fósiles a energías renovables y avanzar hacia producciones bajas en carbono– contribuyen de manera importante a la reducción de GEI, ya que los sectores asociados a esta política generan cerca de una tercera parte de las emisiones de GEI.

⁴ El Protocolo de Kyoto aprobado el 11 de diciembre de 1997, pero debido a un complejo proceso de ratificación, entró en vigor el 16 de febrero de 2005. Actualmente, hay 192 Partes formalizadas en el Protocolo de Kyoto.

Referencias

Climate Bonds Initiative (2019). 2019 Green Bonds Market Summary.

Coady, D., I. Parry, N. P. Le, y B. Shang (2019). "Global Fossil Fuel Subsidies Remain Large. An Update Based on Country-Level Estimates". *IMF Working Paper* 19/89.

Deutz, A., G. M. Heal, R. Niu, E. Swanson, T. Townsend, L. Zhu, A. Delmar, A. Meghji, S. A. Sethi, and J. Tobin-de la Puente (2020). *Financing Nature: Closing the Global Biodiversity Financing Gap*.

Garay, L. J. (2013). "Globalización/glocalización, soberanía y gobernanza. A propósito del cambio climático y el extractivismo minero". En: *Minería en Colombia. Derechos, políticas públicas y gobernanza*. Luis Jorge Garay (Dirección). Vol. 1. Contraloría General de la República de Colombia.

Garay, L. J. (2021). "Elementos hacia la construcción de un orden internacional incluyente y socioecológicamente resiliente. *Ideas Verdes*. Análisis Político. Número 30. Fundación Böll. Agosto.

Giddens, A. (2010). *La política del cambio climático*. Alianza.

Harding, G. (1968). "The Tragedy of the Common". *Science*, Vol. 162 (3859), pp. 1243 – 1248.

Innerarity, D. (2013). *Un mundo de todos y de nadie. Piratas, riesgos y redes en el nuevo desorden global*. Espasa Libros.

OECD (2020a). *A Comprehensive Overview of Global Biodiversity Finance*.

Sommer, J. M., M. Restivo, and J. M. Shandra (2019). "The United States, Bilateral Debt-for-Nature Swaps, and Forest Loss: A Cross-National Analysis". *The Journal of Development Studies*. 56(4), 748–764.

Introducción

La adopción de medidas de una transición hacia una economía baja en carbono puede generar restricciones de financiación y socioeconómicas a los países con una baja capacidad para adaptar su estructura productiva ante nuevas tecnologías. De hecho, el paso de industrias con uso intensivo de carbono a industrias verdes (Mealy y Teytelboym, 2020) y los cambios tecnológicos de las industrias requieren grandes inversiones que pueden llegar a ser muy difíciles de financiar y llevar a cabo en estas economías (Ameli et al., 2021).

En el marco de las políticas que pueden ser adoptadas para una transición baja en carbono, se plantea que los sectores con mayores emisiones debieran reducir su participación en la economía o debieran transformar su forma de producción para reducir sus emisiones, dando prioridad relativa a sectores con menores emisiones. Estas políticas crean incentivos para las industrias con bajas emisiones de carbono, conocidos como sectores “en expansión”, y, al mismo tiempo, penalizan a los sectores con altas emisiones, o en sectores “en declive” (Semieniuk et al. 2020).

Se hace necesario conocer cuáles pueden ser los sectores actualmente “en declive”, por medio de su huella de carbono, y su relación con la estructura económica. Esto es, si los sectores con mayores emisiones de gases efecto invernadero (GEI) tienen alguna relación con los sectores más dinámicos de la economía, para comprender a cabalidad tanto la importancia de los canales de transmisión, así como de los retos y desafíos que puede enfrentar la economía colombiana, y así ir identificando los primeros elementos de juicio para el diseño de posibles acciones de política pública: las áreas en las que la política pública podría y/o debería intervenir.

El término “huella de carbono” se utiliza para describir la cantidad de gases de efecto invernadero generados por un producto (en su uso o utilización) o actividad productiva. Se expresa en equivalente de dióxido de carbono (cantidad de dióxido de carbono que tendría el mismo impacto sobre el cambio climático) y ha sido ampliamente utilizado en los últimos años para la evaluación ambiental.

Para poder estimar la huella de carbono se hace una extensión del análisis insumo – producto al “ampliarlo ambientalmente”, esto es además de los datos de la estructura productiva se integra información de la contabilidad física, en este caso de emisiones de GEI al modelo. Ahora bien, este modelo se relaciona en unidades monetarias y la extensión ambiental en unidades físicas (por ejemplo, en julios de energía, toneladas de material o toneladas de emisiones de GEI), por lo que tal integración no es trivial, y se tienen que realizar diferentes clases de supuestos.

Entre ellos: i) la fuente de generación de emisiones de GEI es la misma a nivel sectorial, por ejemplo, en el caso del sector ganadería, la contaminación generada por el ganado bovino se supone es igual a la de la cría de ganado caprino, lo cual puede generar algunos problemas en el momento de focalizar las políticas; ii) los productos de un sector son pagados al mismo precio unitario, por ejemplo en el caso de la energía, se considera el pago de industria primarias es igual al pago realizado por empresas de servicios, cuando la primera podría pagar un precio unitario un poco menor, iii) la estructura no incluye flujos de no mercado pero que afectan la producción, por ejemplo, la utilización de residuos para la producción de fertilizantes orgánicos o la biomasa, que puede ser utilizada en la producción de cultivos.

Ahora bien, esto no implica que no sea una herramienta muy útil para comprender la forma mediante la cual las emisiones pueden ser sujetas de medición y evaluación para poder analizar o evaluar diferentes alternativas de política. Por lo que se debe de considerar como uno de los instrumentos que deben estar disponibles para la toma de decisiones de política pública.

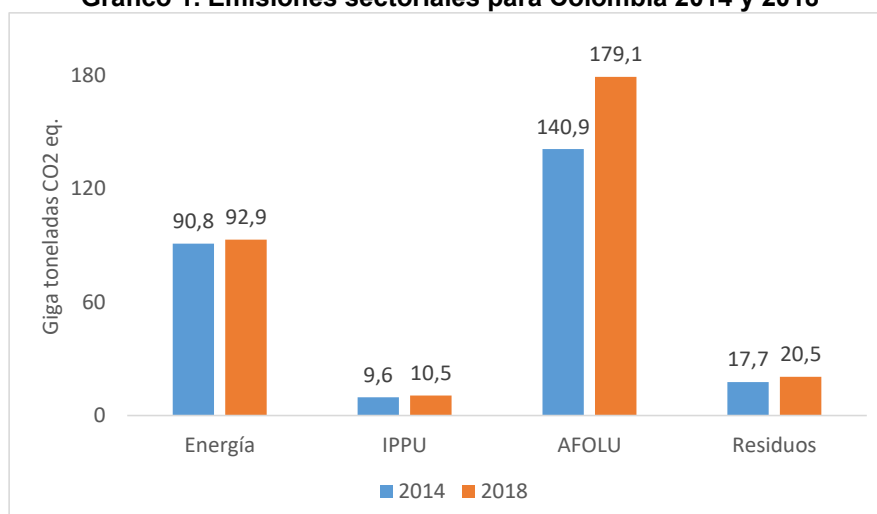
Estructura económica y huella de carbono en Colombia

Para identificar los sectores “más contaminantes” de la economía, se estima la huella carbono de los sectores productivos de la economía, la cual refleja la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI), expresada como CO₂ equivalente (CO₂ eq.), que es emitida directa o indirectamente como consecuencia de su actividad. Esto es, las emisiones generadas en todas las etapas del proceso de producción del sector. Este diagnóstico es un elemento de juicio para determinar cómo implementar una estrategia de reducción de emisiones de GEI basada en eficiencia energética, ahorro de materias primas, economía circular, mejoras en el proceso, etcétera.

Para llevar a cabo las estimaciones de la huella de carbono se utiliza el Inventario de Gases Efecto Invernadero construido por el IDEAM *et al.* (2021)⁵, el cual es presentado en la tercera comunicación del Inventario de GEI para 2018, que se basa en la metodología del panel intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

Como se puede observar en el Gráfico 1, las emisiones totales de GEI alcanzaron los 259.025 Gg de CO₂ eq en 2014 y los 302.974 Gg de CO₂ eq en 2018, con un crecimiento del 17%. De acuerdo con el IDEAM *et al.* (2018), el macrosector AFOLU relacionado con la multiplicidad de usos del suelo es el que más ha aportado a las emisiones de GEI en el país: 65% en promedio para el periodo 1990–2014. Hay que mencionar que dicho aporte ha venido disminuyendo progresivamente, al haber sido de 73% en 1990 y pasado a 67% en 2000, 60% en 2010, 55% en 2014 y 59% en 2018. En contraste, el macro sector de energía, que tiene una participación promedio del 28%, ha tendido a aumentar gradualmente, pasando del 22% en 1990 al 35% en 2014, para luego disminuir a 31% en 2018. En menor medida, la participación de las emisiones de los macro sectores IPPU y residuos también se ha incrementado: en 1990 su participación fue de 2% y de 3%, respectivamente, pasando a ser de 4% para IPPU y de 7% para residuos en 2018.

Gráfico 1. Emisiones sectoriales para Colombia 2014 y 2018



Energía: Contiene el sector de electricidad y transporte; AFOLU: Agricultura, ganadería, silvicultura y otros usos de la tierra; IPPU: Procesos industriales y uso de productos.

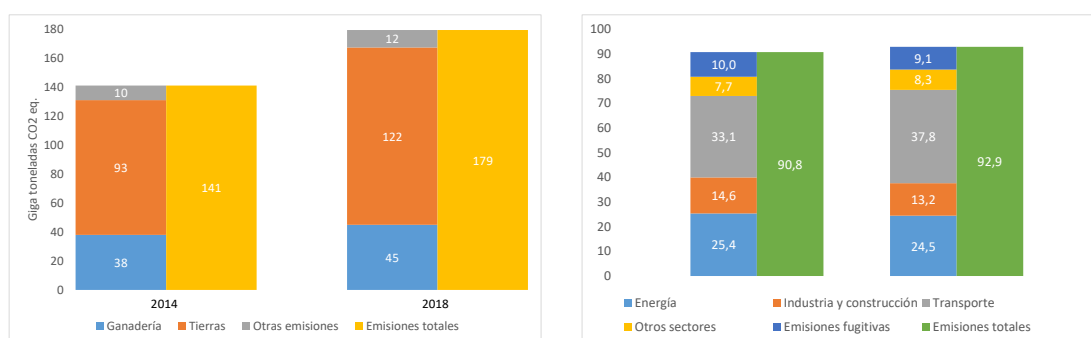
Cálculos con base en las emisiones del BUR3 publicadas por el IDEAM.

⁵ Para mayores detalles se puede consultar <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023910/023910.pdf>.

El macro sector de AFOLU aporta más de la mitad de las emisiones de GEI en Colombia. El sector uso y cambio de uso de la tierra presenta un aporte promedio del 67%, seguido del de ganadería con el 26% (Gráfico 2a). Para el macro sector de la energía (Gráfico 2b), el sector de transporte es la que más contribuye a las emisiones del módulo, con el 38,2% de aporte promedio para el período 2014 – 2018, seguido por el de industrias de la energía con un 27,2%. Estos dos sectores contribuyen con el 62,8% de las emisiones totales del módulo y con el 40,3% de las emisiones totales en el país en el periodo 2014-2018.

Antes de proseguir hay que mencionar cómo las emisiones del sector forestal del IPCC son utilizadas para estimar las emisiones del sector de silvicultura de cuentas nacionales, que solamente incluye actividades legales. La deforestación es una de las principales fuentes de emisiones de GEI en Colombia⁶, proveniente de múltiples causas: la tala ilegal de los bosques, la minería ilegal, los cultivos ilícitos⁷, la ampliación de la frontera agrícola, la conversión a pastizales, entre otras. Otras de las fuentes principales es el cultivo de la hoja de coca y su procesamiento para la producción de cocaína⁸ y la minería ilegal.

Gráfico 2. Emisiones para el sector de AFOU y energía 2014 y 2018
AFOLU¹ (a) Energía (b)



¹ Ganadería: Fermentación entérica y gestión de estiércol. Tierra: Tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales, humedales, asentamientos y otras tierras. Absorciones: Tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales y productos de la madera recolectada. Otras emisiones: Emisiones por quema de biomasa, encalado, aplicaciones de urea, emisiones directas e indirectas de NO₂ de suelos gestionados, emisiones indirectas de NO₂ de gestión de estiércol, cultivo de arroz y productos de la madera recolectada.

Cálculos con base en las emisiones del BUR3 publicadas por el IDEAM.

No obstante, por limitaciones de información en esta metodología, sólo se considera la economía legal, esto es, no se tiene en cuenta la deforestación por parte de actividades de la economía ilegal, lo cual ya limita el monto considerado para las emisiones de GEI. De otra parte, se puede obtener un *proxy* de cuánto de la deforestación puede ser imputada a la ganadería y a la agricultura en cuentas nacionales y cuánto se puede asociar al sector de silvicultura. Además, en el cálculo de la

⁶ La deforestación generaría al menos una tercera parte de las emisiones totales del país (Ideam, 2022).

⁷ Como lo afirma UNDOC (2022), “el cultivo ilícito para la producción de drogas puede influir directa e indirectamente en la deforestación. Según los datos procedentes de dos regiones de Colombia, el cultivo ilícito de arbusto de coca podría ser la causa directa de entre el 43 % y el 58 % de la deforestación total en esas regiones, o estar indirectamente vinculado a ella”.

⁸ Según UNODC (2022), “la huella de carbono por kilogramo de cocaína fabricado es notablemente mayor que la de otros cultivos agrícolas lícitos, como el café, los granos de cacao y la caña de azúcar (p. ej., es 30 veces mayor que la de los granos de cacao y 2.600 veces mayor que la de la caña de azúcar), y viene determinada fundamentalmente por el cultivo de arbusto de coca (60 %), la extracción del alcaloide (24 %) y la eliminación de desechos (14 %).”

huella de carbono se considera la emisión neta esto es, las emisiones deducidas por las absorciones⁹. Por todas estas razones, es que el sector de silvicultura, mediante la metodología propuesta, no aparece como uno de los sectores más contaminantes de la economía.

Los sectores con mayores emisiones de GEI son, en su orden: ganadería, transporte terrestre, refinación de petróleo, agricultura, electricidad, petróleo, carbón, comercio y molinería (Cuadro 1). Estos sectores tienen una participación en el PIB del 26,4% y son responsables del 83,7% de las emisiones de GEI. En contraste, se aprecia que los restantes sectores son responsables de cerca de tres cuartas partes del PIB y emiten apenas el 16,3% del total de GEI.

Entre las políticas para una transición hacia una economía baja en carbono, se encuentra que la reducción de emisiones. Los principales sectores económicos que pueden relacionarse con esta política son: el de transporte terrestre, refinación de petróleo, electricidad, petróleo y carbón, que, como se observa en el Cuadro 1, generan, en su conjunto, el 30,8% de las emisiones totales GEI en Colombia.

Aquí es importante mencionar que el sector de la electricidad se clasifica como un sector con grandes emisiones de GEI, a pesar de que la generación de energía se realiza, en buena medida a partir de energía hidroeléctrica, pero el resto de esta se encuentra basada en fuentes como gasolina, biodiesel, centrales termoeléctricas, alimentadas por carbón, etcétera, que son bastantes contaminantes.

Cuadro 1. Sectores con mayores emisiones que el promedio en Colombia

Sector	% en la producción	% en el valor agregado	% en las emisiones
Ganadería	1,7%	1,6%	47,8%
Transporte terrestre	3,8%	3,8%	15,4%
Refinación de petróleo	3,3%	1,3%	7,4%
Agricultura	3,0%	4,2%	4,1%
Electricidad	2,5%	2,0%	3,8%
Petróleo	2,8%	2,1%	2,6%
Carbón	1,1%	1,6%	1,6%
Comercio	7,8%	9,0%	0,6%
Molinería	1,8%	0,9%	0,3%
Total	27,9%	26,4%	83,7%

Cálculos con base en las emisiones del BUR3 publicadas por el IDEAM y de Oferta – Utilización del DANE

Fuente: Hernández (2023).

Huella de carbono y cadena de valor de la producción

La definición de “huella de carbono” es difícil de establecer ya que depende de la escala en que se mide, esto es, si se analiza a pequeña escala como a nivel individual, productos de consumo cotidiano. o hasta a gran escala. como a nivel agregado de países (Ilustración 1).

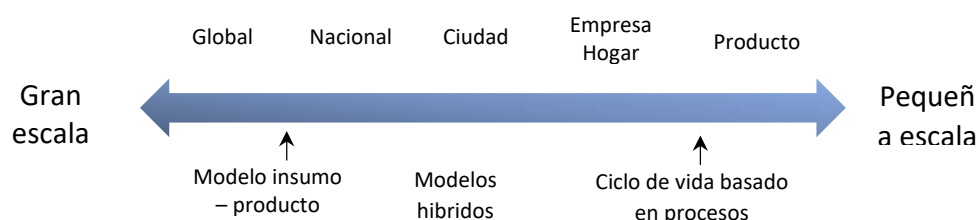
En general, de acuerdo con Peters (2010), “una huella de carbono debe considerar todas las emisiones de un producto tanto hacia atrás en el tiempo desde el punto de consumo hasta las fuentes

⁹ La absorción de CO₂ se da por la restauración de bosques en tierras que anteriormente no estaban cubiertas por bosques.

de emisión, como hacia adelante en el tiempo para incluir la fase de uso y eliminación de los productos”.

En este caso, se considera que la huella de carbono comprende todas las actividades económicas, en la medida que utilizan insumos, que generan emisiones de GEI a lo largo de su proceso de producción, determinándose su responsabilidad por una determinada cantidad total de emisiones GEI a la atmósfera. La suma total de emisiones en una actividad productiva es lo que se denomina huella de carbono. Cabe destacar que la huella de carbono de un sector puede ser o bien el punto de llegada (con el consumo final de sus productos) o bien el punto de partida de otra actividad económica a la que le provee productos como insumos productivos.

Ilustración 1. Metodologías para calcular la huella de carbono



Adaptado de Peters (2010)

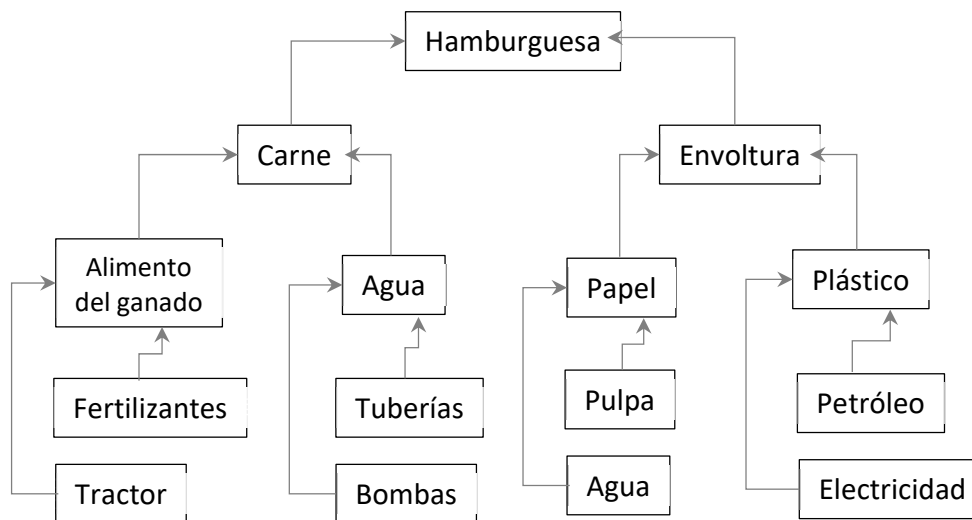
Por ejemplo, en el sector de la molinería, si se toma la cadena de producción trigo – harina – pan, el trigo pasa a ser la materia prima del proceso de producción de harinas y, por tanto, hace parte de su huella de carbono, al igual que la del resto de materias primas utilizadas en ese proceso, y pasa a formar parte de la huella de carbono para la harina. De este modo la huella de carbono dependerá de la huella de carbono inicial del trigo. Del mismo modo, la harina pasa a ser la materia prima en la producción del pan, por lo que a su huella de carbono hay que añadirle las emisiones la huella de carbono procedentes, entre otros, de los consumos intermedios en el proceso de panificación para llegar a obtener la huella de carbono total de un alimento básico como el pan, etapa final de la cadena de producción.

Consideraré la cadena de valor para la elaboración de una hamburguesa presentada en la Ilustración 2. En principio, sumando las emisiones de carbono asociadas con cada insumo de la cadena, se pueden calcular las emisiones totales de carbono asociadas con la hamburguesa. Se puede conocer cuántas son las emisiones de GEI directas de la producción de la hamburguesa, por ejemplo, cuánta es la electricidad necesaria y sus emisiones para mantener la cadena de frío de la carne, así como las emisiones asociadas a las tuberías utilizadas para transportar el agua, etcétera. Sin embargo, es importante conocer también cuántas son las emisiones de GEI indirectas que pueden ser asociadas a la producción de la hamburguesa, por ejemplo, las emisiones de los fertilizantes usados para el forraje que alimenta el ganado del cual se obtiene la carne para la hamburguesa.

En la práctica, hay múltiples limitaciones para este tipo de estimación, por ejemplo: i) si el análisis se realiza sobre el primer o segundo nivel¹⁰, la estimación de las emisiones totales sufrirá un sesgo por subvaluación, ii) si para alguna etapa de la cadena no se cuenta con información completa acerca de la forma de producción, se incurrirá en errores de estimación con sesgos no conocidos *a priori*, iii) si surgen problemas de doble contabilización porque, por ejemplo, parte del agua utilizada en la producción del papel puede reciclarse y utilizarse posteriormente para regar los cultivos, entonces ¿cómo deberían asignarse las emisiones de carbono asociadas al transporte y bombeo de esta agua entre el papel y los cultivos? ¿qué sucede si parte de la pulpa está hecha de papel reciclado?

¹⁰ En el caso de la Ilustración 2, el primer nivel corresponde a los insumos necesarios para producir la hamburguesa, el segundo nivel corresponde a los insumos para producir la carne y la envoltura.

Ilustración 2. Cadena de valor hipotética de una hamburguesa



Adaptado de Kitzes (2013).

Para tratar de subsanar estos problemas se utiliza una metodología en la que la matriz insumo – producto que es ampliada para involucrar las emisiones de GEI en el análisis. Con la matriz insumo – producto se puede estimar cuáles son los insumos utilizados de manera directa e indirecta, en todas las etapas de la cadena de valor, para la producción de un bien. De esta manera, se puede evitar problemas de estimación, ya que considera toda la información de la estructura económica. El conocer la estructura productiva de un país también contribuye a que los bucles o ciclos de los productos puedan ser contabilizados de manera correcta y no existan problemas de doble contabilidad.

La huella de carbono sectorial

Para empezar a dilucidar cuáles acciones de política económica pueden llegar a ser más efectivas para reducir las emisiones de GEI, es importante conocer cómo las emisiones de GEI se relacionan con la estructura económica. Para ello se estima la huella de carbono sectorial a nivel nacional bajo una metodología insumo – producto¹¹, descomponiendo las emisiones en dos tipos: i) emisiones directas: emisiones de GEI generadas directamente por el sector productivo en su forma de producción, por ejemplo, máquinas que funcionen con combustibles fósiles o emisiones provenientes del proceso productivo del sector, y ii) emisiones indirectas: emisiones generadas por los insumos utilizados, por ejemplo, los fertilizantes usados en el sector agropecuario.

Hay dos fuentes de información para llevar a cabo el cálculo de las emisiones de GEI a nivel sectorial: i) las cuentas ambientales de energía y emisiones del DANE¹², y ii) el Inventario de Gases Efecto Invernadero construido por el IDEAM¹³. El cálculo de las emisiones en cada caso sigue metodologías

¹¹ Para los detalles de la metodología, véase: Hernández (2021).

¹² Para mayores detalles, se puede consultar la Cuenta Ambiental y Económica de Energía y Emisiones al Aire, en unidades físicas en: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-satelite/cuenta-satelite-ambiental-csa>.

¹³ Para mayores detalles, se puede consultar: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023910/023910.pdf>.

completamente diferentes. El DANE cuantifica las emisiones resultantes a partir de los flujos en el sector energético, mientras que el IDEAM se basa en la metodología del panel intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés), que tiene en cuenta datos de actividad y factores de emisión. Para este trabajo se toman los datos de la tercera comunicación del Inventario de GEI para 2018, ya que, además de estimar las emisiones de energía, calculan las emisiones realizadas por las actividades de: residuos, procesos industriales y uso de productos, y agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, con lo que los resultados no están sesgados hacia las emisiones resultantes de la energía.

Antes de proseguir, hay que mencionar que se consideran las intensidades de emisiones de cada sector, que son diferentes de las emisiones totales. Esto es, los datos muestran cuáles sectores emiten la mayor cantidad de gases de efecto invernadero por unidad de valor económico de producción, lo cual proporciona una métrica única para evaluar todos los sectores económicos.

Ahora bien, es importante considerar que el denominador, la producción sectorial, puede cambiar año tras año dependiendo, entre otros factores, de si cambian los precios de las materias primas o los márgenes de ganancia. En este caso específico, un cambio en la intensidad de las emisiones expresada de esta manera (esto es, por unidad de valor económico de producción) puede no necesariamente reflejar el comportamiento de los gases de efecto invernadero emitidos por unidad física de producción. Sin duda, las unidades físicas para estimar la intensidad de las emisiones siempre son una mejor medida para comprender el progreso de un sector hacia la descarbonización, pero estos datos son difíciles de obtener. Así, se tiene que recurrir a la intensidad por unidad de valor económico de producción.

La intensidad de la emisión sectorial en emisiones de CO₂ eq. por unidad de producción monetaria es estimada (por \$ producido) al dividir las emisiones de CO₂ del sector sobre el valor (en \$) de la producción total por sector, obteniendo la intensidad de la emisión de un sector:

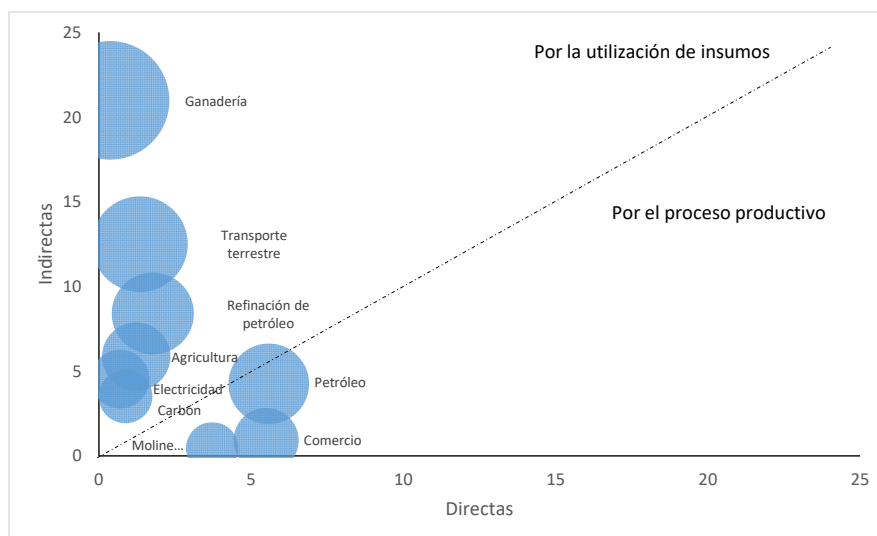
$$\text{Intensidad de la emisión por sector} = \frac{\text{emisión de GEI por sector}}{\text{Valor de producción del sector}}$$

Como se mencionó anteriormente, se utiliza una metodología insumo – producto para calcular la huella de carbono en cada uno de los sectores de la economía colombiana, de acuerdo con las cuentas nacionales del DANE, estimándose la razón entre la huella de carbono y la producción a nivel sectorial, para poder hacer una comparación sectorial de las emisiones de GEI. Para definir si un sector es “más contaminante que otro”, se toma en cuenta tanto las emisiones emitidas por su proceso productivo, así como las emisiones generadas por su utilización por otros sectores. De esta manera, se encuentra que los sectores más contaminantes son, en su orden: ganadería, transporte terrestre, refinación de petróleo, agricultura, electricidad, petróleo, carbón, comercio y molinería

Una de las ventajas de metodología propuesta es que se puede descomponer la fuente de las emisiones de un sector, esto es, qué tanto se debe a la utilización de los insumos o qué tanto se debe al proceso productivo del sector. Con base en esta identificación se puede orientar las políticas de adaptación de acuerdo con la fuente de las emisiones para que sean más efectivas.

Como se muestra en el Gráfico 3, para la mayoría de los sectores, la fuente de sus emisiones corresponde a los insumos utilizados en su proceso productivo más que a la forma de producción del sector. Los sectores más contaminantes por utilización de insumos son, en su orden: ganadería, transporte terrestre, refinación de petróleo, agricultura y electricidad. En tanto que los sectores más contaminantes por proceso productivo son petróleo, comercio y molinería.

Gráfico 3. Fuente de las emisiones en Colombia
(1000 gigagramos de CO₂ eq / mil millones de pesos)



La línea punteada representa la línea de 45°.

El tamaño de la burbuja corresponde a las emisiones totales del sector

Cálculos con base en la MIP 2017 publicada por el DANE y las emisiones del BUR3.

Adaptado de Hernández (2023).

En este sentido, las políticas de transformación productiva pueden estar encaminadas, por ejemplo, a que los fertilizantes usados en el sector agrícola sean menos contaminantes, y de esta manera, disminuir, tanto la contaminación en la producción de fertilizantes como en la producción del sector agrícola. De otra parte, en el caso de que sea la forma de producción su fuente de contaminación como la explotación extensiva de tierras frágiles, medioambiental y eco-sistémicamente, para fines comerciales, se debería transformar la forma de producción directa del sector hacia formas más amigables con el medio ambiente.

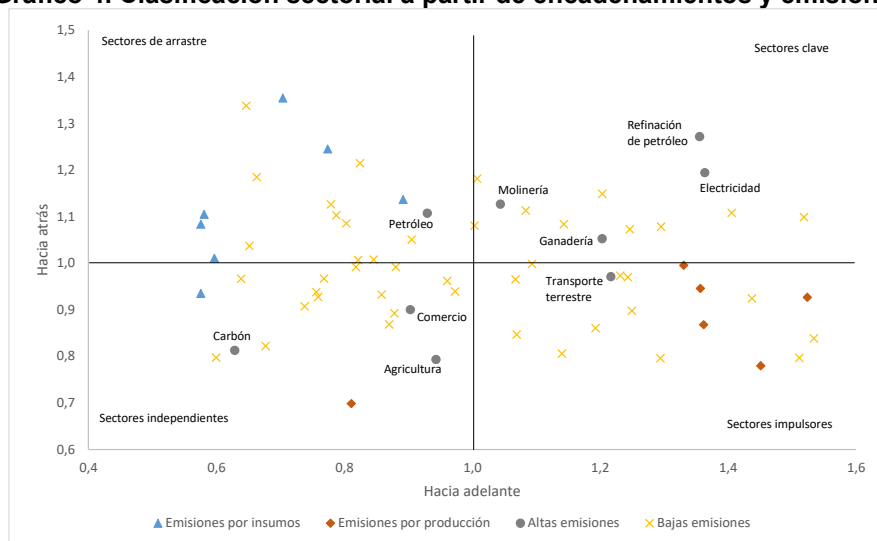
De otra parte, también es importante conocer si los sectores con mayores emisiones de GEI pueden estar relacionados con los sectores más dinámicos de la economía. El proceso de identificación de estos sectores dinámicos se hace mediante la intensidad de los encadenamientos para cada uno de los sectores productivos. El encadenamiento sectorial se relaciona con el impacto de dicho sector sobre el resto de la economía: i) hacia atrás: capacidad de un sector de utilizar insumos de otros sectores que los proveen como insumos intermedios para su proceso de producción, y ii) hacia adelante: capacidad de un sector de impulsar otros sectores proporcionándoles su producción como insumo intermedio a los demás sectores de la economía.

A partir de los encadenamientos, se clasifican los sectores de la economía en: (i) sectores clave, porque sus interrelaciones con los demás son más intensas (por cada \$ producido), en términos tanto de la demanda de insumos como de la oferta insumos, al ser utilizados por los demás sectores, más que el promedio de la economía, ii) sectores de arrastre, que porque demandan más con mayor intensidad (por cada \$ producido) insumos producidos por otros sectores que el promedio de la economía, pero la intensidad de la demanda de otros sectores por sus bienes producidos como insumos es muy baja, iii) sectores impulsores, porque sus productos son demandados como insumos con alta intensidad por diversos sectores de la economía, pero demanda con baja intensidad pocos insumos provenientes de otros sectores, con respecto al promedio de la economía, y iv) sectores independientes, porque sus productos son demandados como insumo con baja intensidad por otros sectores y además demandan insumos con baja intensidad en su proceso productivo.

Como se observa en el Gráfico 4, los sectores de refinación de petróleo y electricidad se encuentran dentro de los sectores más dinámicos (cuadrante de sectores clave). Los cuales son altamente utilizados como insumos (fuertes encadenamientos hacia adelante), esto es, son demandados alrededor de 1,4 veces más que el promedio de la economía de toda la economía. De otra parte, el sector de refinación de petróleo demanda un poco menos de insumos que el sector eléctrico, pero por encima del promedio de la economía. En el caso de la refinación de petróleo es más de 1,2 veces que el promedio mientras que para el sector eléctrico es de 1,3 más que el promedio.

De otra parte, el transporte terrestre es un sector que es utilizado por muchos sectores de la economía (cuadrante de sectores impulsores), ya que este es demandado por los demás sectores de la economía un poco más de 1,2 veces más que el promedio. En cuanto al petróleo es un sector cuya demanda de insumos es alta (cuadrante de sectores arrastre), más de 1,1 veces que el promedio de la economía. Finalmente, el carbón es un sector independiente, esto es, en promedio su utilización como insumo es baja y demanda con baja intensidad insumos intermedios en su proceso productivo, ya que una gran parte de este es exportada. Finalmente, es importante mencionar cómo la ganadería y molinería son sectores clave y, a la vez, con altas emisiones.

Gráfico 4. Clasificación sectorial a partir de encadenamientos y emisiones



Clasificación sectorial construida a partir de los encadenamientos de Rasmussen. Cálculos con base en la MIP 2017 publicada por el DANE y las emisiones del BUR3. **Fuente:** Hernández (2023).

La aplicación de políticas activas para la reducción de emisiones sobre estos sectores, que son sectores dinámicos y con una emisión de GEI por encima del promedio, genera impactos significativos que se distribuyen por toda la economía en su conjunto. Por ejemplo, en el caso del sector de electricidad, hay consenso de que su transformación debería estar enfocada hacia una mayor eficiencia del sector y a un cambio de la matriz energética hacia la generación de energía “más limpia” (por ejemplo, hidrógeno, eólica y/o fotovoltaica), para de esta manera desacoplar el crecimiento económico de la generación de emisiones de GEI por parte del sector energético.

En cuanto a la refinación del petróleo, se ha ido reconociendo que la producción del sector tenga un menor componente de emisiones de GEI, al ir aumentando la cantidad de producción de biocombustibles, y de manera indirecta, con la promoción del cambio del parque automotor hacia los sistemas híbridos y eléctrico. En el caso de la ganadería, el sector enfrenta un gran reto para su transformación, ya que la reducción de GEI (particularmente, metano) se puede avanzar mediante el aumento de la productividad, el mejoramiento genético y la reformulación de la dieta, y el cambio de ganadería extensiva a una alternativa de menor escala como silvopastoril, aunque adoptarlo generaría un aumento considerable en los costos de producción, con sus consecuentes restricciones prácticas.

Conclusiones

A pesar de las limitaciones que pueda tener el cálculo de la huella de carbono, es un indicador indispensable para la gestión ambiental, ya que permite identificar las principales fuentes de

emisiones de GEI, y en conjunto con otras metodologías, en este caso el análisis insumo–producto, contribuye a especificar diferentes relaciones sectoriales determinantes para la toma de decisiones en torno a la reducción de las emisiones y la mitigación del cambio climático.

El poder identificar la fuente de las emisiones de GEI –esto es, si son causadas por la forma de producción del sector o si tienen como origen los insumos de utilizados para la producción del sector–, brinda elementos de juicio sobre la direccionalidad de las políticas de transición. Por ejemplo, los cambios en el sector energético van a desempeñar un papel decisivo para alcanzar una economía más “amigable” con el medio ambiente, ya que, dada su importancia en la economía –al ser sector que utiliza como insumos bienes producidos por otros sectores y, a la vez, ser proveedor de insumos a una gran diversidad de sectores de la economía–, cambios estructurales “pro menor contaminación” en el sector tienen un importante efecto amplificador en la economía en su conjunto, tanto a nivel económico como en términos de la reducción de las emisiones de GEI.

Referencias

- Ameli, N., Dessens, O., Winning, M., Cronin, J., Chenet, H., Drummond, P., Calzadilla, A., Anandarajah, G., and Grubb, M. (2021). "Higher cost of finance exacerbates a climate investment trap in developing economies". *Nature Communications*, (12), pp. 1 – 12.
- Banco Mundial (2023). Colombia - Informe Sobre el Clima y el Desarrollo del País. CCDR Serie, Banco Mundial.
- Hernández, G. (2021). "Emisiones de gases de efecto invernadero y sectores clave en Colombia". *El Trimestre Económico*, Vol. 88 (350), pp. 523–550.
- Hernández, G. (2023). "Vulnerabilidades macroeconómicas ante la transición baja en carbono". *Archivos de Economía* No 557. Departamento Nacional de Planeación.
- Hirschman, A. (1961). *La estrategia del desarrollo económico*. Fondo de Cultura Económica. Ciudad de México.
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2021). Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM.
- International Energy Agency – IEA (2023). World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
- Joshi, V. y Urttil, P. (2009). "India and climate change mitigation". En: *The economics and politics of climate change*. Edts: Dieter Helm and Cameron Hepburn. Oxford University Press.
- Kltzes, J. (2013). "An Introduction to environmentally extended input - output analysis". *Resources*, (2), pp. 489 – 503.
- Kompas, T., van Ha, P., and Che, T. N. (2018). "The effects of climate change on GDP by country and the global economic gains from complying with the Paris climate accord". *Earth's Future*, Vol, 6 (8), pp. 1153–1173.
- Mealy, P. and Teytelboym, A. (2020). "Economic complexity and the green economy". *Research Policy*, Vol. 58 (1), pp. 1 – 24.
- Peters, G. (2010). "Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. Current Opinion". *Environmental Sustainability*, Vol. 2 (4), pp. 245 – 250.
- Semieniuk, G., Campiglio, E., Mercure, J., Volz, U. and Edwards, N. (2020). "Low – carbon transition risks for finance". *WIREs Climate Change*, Vol. 12 (1), pp. 1 – 24.
- Silos, J. Suárez, R. de la Colina, J. J. y Fernández, T. (2021). La era del stewardship: incrementando la presión en la custodia ESG. Forética.
- Stern, N. (2007). *The economics of climate change*. Cambridge University Press.

Introducción

Sólo el 2.5 % de toda el agua del planeta está disponible para el consumo humano, y su distribución está concentrada en diez países que tienen más de la mitad de las reservas de agua dulce del mundo. Entre ellos están: Brasil (12%) con 43.000 metros cúbicos per cápita, Rusia (7%) con 29.000 metros cúbicos p.c., Canadá (5%), Estados Unidos (4%) con 8.800 metros cúbicos p.c., China (4%) con 2.300 metros cúbicos p.c. y Colombia (3%) con 46.000 metros cúbicos p.c.. Por lo cual Colombia es el sexto país con mayor riqueza hídrica del mundo.

Sin embargo, el país enfrenta grandes retos para el manejo de este recurso, dado el estrés hídrico¹⁴ causado por una combinación de factores, como el cambio climático, la sobreexplotación de fuentes hídricas, la mala gestión y la grave contaminación del recurso. Estos factores, exacerbados por el cambio climático, están reduciendo la disponibilidad de agua en muchas regiones del país. Situaciones similares se observan en otros países de América Latina, como México y Chile, donde se han declarado emergencias hídricas¹⁵.

La manera de comprender y tomar acciones de política para mitigar y adaptarse al cambio climático empieza por conocer el impacto sobre el medio ambiente. Hay al menos dos formas complementarias de hacerlo mediante la estimación de la huella de carbono¹⁶ y la huella hídrica. Estos dos indicadores miden elementos diferentes, pero, en general, muestran leves diferencias y pueden conducir a tomar decisiones muy parecidas. Al fin y al cabo, ciertos usos que producen contaminación están relacionados tanto con el consumo del agua como con la emisión de GEI. Se pueden, por tanto, tener en cuenta tanto por separado como de manera conjunta. Sus indicadores son generales o particulares, se adaptan a un país, una localidad o región.

Por ello es importante contar con indicadores del uso y contaminación de agua para evaluar y guiar la gestión del manejo del recurso hídrico. Para derivar indicadores útiles con ese propósito se utiliza la huella hídrica. Este es un indicador ambiental que calcula el volumen total de agua dulce que se requiere para producir bienes o servicios en una empresa, o que es consumida por un individuo o comunidad.

El investigador John Anthony Allan, acuñó en 1993 el concepto de “agua virtual”, tras estudiar la escasez de agua en Oriente Medio, definiéndola como el volumen de agua necesaria para la elaboración de un producto o para facilitar un servicio particular. En 2002, los investigadores Arjen Hoekstra y P. Hung, a partir de dicho concepto, crearon el concepto de “huella hídrica”. La huella hídrica de un producto se define a partir del volumen total de agua consumido tanto de forma directa como de forma indirecta para su producción y distribución, teniendo en cuenta tanto las fuentes acuáticas subterráneas como superficiales. Este es un concepto cuyo objetivo es concientizar sobre el uso racional del agua, sobre todo porque con el cambio climático y el aumento de la población, el agua es cada vez más escasa.

El continuo aumento de la demanda de agua impone presión sobre los recursos hídricos. Por esta razón, es imperativo del uso y gestión sostenible del agua, lo cual ha creado la necesidad de información para definir e implementar políticas de ahorro de agua de manera integrada e informada. Los cálculos de la huella hídrica permiten analizar el uso directo de los recursos hídricos a nivel

¹⁴ Hace referencia a situaciones en las que la demanda de agua supera a la cantidad disponible durante un período determinado, o cuando su uso se ve afectado por restricciones.

¹⁵ Como lo menciona la CEPAL en [“Quedándonos secos: Abordando el estrés hídrico en América Latina y el Caribe”](#) de junio de 2024.

¹⁶ Anteriormente mencionado.

sector económico (es decir, el uso directo del agua), así como las relaciones intersectoriales de consumo del agua (es decir, el uso indirecto del agua).

Como lo menciona el Banco Mundial en el informe “Colombia, un cambio de rumbo”¹⁷, hay desajuste entre la disponibilidad de agua dulce y la demanda concentrada, por lo que Colombia resulta ser muy vulnerable a los riesgos de escasez de agua en el futuro. Razón por lo cual es indispensable conocer cómo se utiliza el agua en los procesos productivos a nivel sector, con miras a apoyar los programas y políticas para aumentar la seguridad y sostenibilidad hídrica en el país.

Cálculo de la huella hídrica

El concepto de la huella hídrica se encuentra muy relacionado al de agua virtual. La huella hídrica se refiere al agua utilizada en la elaboración de un producto, por lo cual se puede referir al “contenido de agua virtual” de un producto, en lugar de su huella hídrica. No obstante, la huella hídrica tiene una aplicación todavía más amplia, ya que también se refiere al agua que se ensucia y contamina durante el proceso de producción¹⁸.

La huella hídrica se puede calcular para una persona, una empresa, un proceso o una cadena de valor completa de un producto, una cuenca hidrográfica o una nación. En este documento se presenta la huella hídrica a nivel de los sectores productivos del país, lo que proporciona información para comprender el papel del agua en la economía, así como su grado de dependencia. Lo más importante es que ayuda a impulsar acciones estratégicas hacia un uso del agua sostenible, eficiente y equitativo.

Para el cálculo de la huella hídrica se debe contabilizar el volumen (litros o metros cúbicos) de agua consumida, además de la que ha sido contaminada y la que se ha evaporado en el proceso de producción. Así, la huella hídrica es el resultado de tres indicadores, divididos en colores, en función de la procedencia del agua: huella hídrica verde, huella hídrica azul y huella hídrica gris.

- *Huella hídrica verde*: es el agua de precipitaciones (lluvia y nieve) que queda almacenada en la tierra, en la zona de las raíces, y se evapora, transpira o incorpora a las plantas. Es particularmente relevante para productos agrícolas, hortícolas y forestales.
- *Huella hídrica azul*: es el agua que proviene de recursos hídricos subterráneos o en superficie y que o se evapora durante la producción de un bien, o se incorpora a él o es vertida en el mar. Equivale al consumo directo de agua dulce en los procesos de fabricación de bienes e incluye el agua de riego.
- *Huella hídrica gris*: hace referencia a la calidad, y se trata de la cantidad de agua contaminada en los procesos, y que posteriormente requiere un tratamiento para cumplir con la normativa sectorial del cauce u organismo receptor de los vertidos finales del proceso.

De forma general, existen dos metodologías para la medición de la huella hídrica: i) La metodología desarrollada por *Water Footprint Network*¹⁹, que se basa en el cálculo del agua usada, directa o indirectamente, por un productor o por un consumidor de productos o servicios, incluyendo la cantidad de agua necesaria para diluir los vertidos hasta los niveles objetivos de calidad del medio receptor, y ii) La metodología de la UNE-EN-ISO 14046, que consiste básicamente en particularizar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la norma ISO 14044, orientando el análisis de inventario y los impactos ambientales al agua.

¹⁷ Para más detalles puede consultarse en <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/148581599058364514-0090022020/render/TurningtheTideBriefENAugust3020.pdf>.

¹⁸ Para los detalles de esta metodología, se puede consultar: Velásquez (2006) y Boudhar, Boudhar e Ibourek (2017).

¹⁹ Para más detalles, véase Hoekstra *et al.* (2011).

Para hacer los estimativos de la huella hídrica por sector económico, se sigue los lineamientos del *Water Footprint Network*, para lo cual se utiliza la matriz insumo – producto, que permite conocer los requerimientos de insumos a lo largo de la cadena de producción de un sector, involucrando el agua como un insumo en la cadena de producción, además de los datos de utilización de la cuenta satélite de los flujos del agua²⁰.

Con estos datos, se analizan la transacción de agua entre sectores económicos para determinar las relaciones intersectoriales del agua. Para esto se consideran las extracciones de agua por parte de las unidades económicas (sectores económicos y hogares). Un análisis de esos flujos proporciona información sobre las relaciones directas entre los recursos hídricos y las unidades económicas. Además, los flujos de agua en la economía consisten en transacciones de agua en cada sector económico a nivel nacional y con el resto del mundo, así como entre unidades económicas y sectores nacionales.

En el caso de Colombia, se tomó como fuente sobre el uso sectorial de agua las estadísticas reportadas por el DANE, que contabiliza el uso legal de agua tanto superficial como subterránea, sin tomar en consideración el uso no legal de fuentes tanto por actividades y actores de índole abiertamente ilegal como la deforestación, el cultivo y procesamiento de hoja de coca, etcétera, así como por actividades y ciudadanos legales que evaden el pago del uso del recurso mediante diversos procedimientos de evasión. Tampoco se estima el volumen de agua contaminado por desechos de químicos, de sustancias tóxicas, entre otros.

El problema de calidad del agua es muy complejo, ya que los criterios comunes para determinar el nivel de contaminación (los desechos de aguas residuales de origen doméstico y de las actividades agrícolas y pecuarias) resultan insuficientes por sí solos para explicarla. Existen algunos casos que son igual o más graves, pero quizás no tan divulgados, entre ellos se pueden mencionar: i) la deforestación, dado que los árboles cumplen una función reguladora del agua, al punto que si los bosques cercanos a los ríos desaparecen, estas fuentes hídricas también se ven afectadas y poco a poco tienden a secarse –según la WWF Colombia (2022), en Colombia se pierde cada año alrededor de 172.000 hectáreas de bosque–, ii) la extracción no sostenible de recursos pesqueros, como es el caso de la cuenca del Magdalena, donde el recurso pesquero disminuyó 70% entre 1975 y 2016, según la Autoridad Nacional Pesquera (Aunap), y la captura de especies de importancia comercial como el bagre rayado, cuya disponibilidad disminuyó en más de un 90% desde 1970, y iii) la contaminación por mercurio, en la medida en que Colombia es el país que más mercurio per cápita libera al ambiente en el mundo, 1,6 kg liberados por habitante –por ejemplo, en Chocó, el segundo departamento productor de oro en el país, el 90% de esta actividad se realiza de manera ilegal, según datos recopilados por el informe “El convenio de Minamata”–.

Indicadores del uso de agua a nivel sectorial

Sobresalen dos fuentes estadísticas para obtener los datos del uso del agua necesarios para el cálculo de la huella hídrica: i) la cuenta satélite del DANE, denominada Cuenta Ambiental y Económica de Flujos de Agua (CAE-FA), que es la utilizada en este documento, y ii) el Estudio Nacional del Agua (ENA), realizado por el IDEAM.

En la metodología de la CAE-FA²¹, el uso de agua se “refiere a la extracción o captación de agua del medio ambiente por las unidades económicas en el territorio de referencia, con destino a actividades de producción y consumo”. Las fuentes primarias son: Encuesta Ambiental Industrial (EAI), área sembrada y cosechada por cultivo, generación de energía por las hidroeléctricas, principales acueductos del país, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, información sobre

²⁰ Los datos de esta última fuente pueden ser consultados en: <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/CAE-FA/anex-CAEFA-COU-2021p.xlsx>

²¹ La cual se puede consultar en <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/ambientales/DSO-CAE-FA-MET-001-V2.pdf> para más detalles.

producción de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), y la Agencia Nacional Minera (ANM). De las cuales se obtienen coeficientes de consumos de agua.

Mientras que, según la metodología de la ENA, el uso del agua “incluye el volumen total de agua que es extraído del medio natural, donde una parte del agua entra en un proceso productivo o para el abastecimiento doméstico, transformándose en insumo o materia prima en las cadenas de producción, y otra parte del agua extraída puede ser devuelta a la misma cuenca de donde se obtuvo”²². En este caso las fuentes primarias de información están basadas en información satelital de variables meteorológicas, además de información del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) del Registro Único de Usuarios del Agua (RUA), información de encuestas, censos, estadísticas oficiales del DANE, Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios e información generada por los diferentes sectores usuarios del recurso y por las entidades del Sistema Nacional Ambiental (SINA). Además, hay que considerar que los sectores, en esta metodología, no corresponden a los de las cuentas nacionales del DANE.

De acuerdo con el IDEAM (2023), la presión sobre el uso del agua en el territorio nacional es generada especialmente por los sectores agrícola, de energía y pecuario. De acuerdo con cálculos realizados, 13,9 mil millones de metros cúbicos, de 33 mil millones de metros cúbicos de agua que se consume al año en el país, son atribuibles al sector agrícola. En porcentajes por uso del agua, la agricultura alcanzaría cerca de un 42%, seguido de hidroenergía y pecuario con 25% y 12%, respectivamente.

De otra parte, siguiendo en adelante los datos del DANE, en el Cuadro 1 se muestra que los cuatro sectores que más utilizan agua son: agricultura, ganadería y silvicultura, con una participación cercana al 48.6% del consumo total de agua en el país; electricidad y gas, con participación similar de un 48.5%; acueducto y alcantarillado, con una participación de 1.7% y alimentos procesados, con una de 0.3%. En el caso del sector de agricultura, ganadería y silvicultura, el sector agrícola concentra el mayor uso del agua, con un 71.9%; según el CIAT (2018), a partir de los datos del ENA para 2014, los cultivos que demandaban mayor cantidad de agua en 2014 eran: pasto de corte (3,2 mil millones de m³ al año), palma de aceite (1,8 mil millones de m³ al año), arroz de riego (1,8 mil millones de m³ al año), plátano (1,7 mil millones de m³ al año), caña de azúcar (1,5 mil millones de m³ al año), pastos de forraje (0,8 mil millones m³ al año).

Hay una alta concentración en el consumo directo del agua, ya que el 97% se concentra en dos macro sectores de la economía (agricultura, ganadería y silvicultura, y electricidad, este último sector incluye otras formas adicionales a la hidroenergía y gas), a pesar de que sólo representan el 8,9% del PIB de la economía. Ahora bien, hay que considerar que estos sectores representan sectores clave para la economía colombiana –esto es, tiene grandes conexiones con el resto de los sectores de la economía²³–, por lo que el consumo del agua de los demás sectores se realiza de manera indirecta al utilizar a estos sectores en su proceso de producción.

Cuadro 1. Uso directo del agua y coeficiente de agua

	Consumo de agua (10 ⁶ m ³)	Participación en el consumo total agua	Consumo de agua por valor de producción (m ³ / miles de pesos)	Participación en el valor agregado
Agricultura, ganadería y silvicultura	180.503	48,6%	2,031	5,7%
Electricidad y gas	180.499	48,5%	3,648	3,2%

²² Para mayores detalles, se puede consultar: IDEAM (2023) pp. 248–257.

²³ Para más detalles, se puede consultar: Hernández y Quintero (2023).

Acueducto y alcantarillado	6.135	1,7%	0,393	1,0%
Alimentos procesados	1.065	0,3%	0,009	6,7%
Minas y canteras	656	0,2%	0,007	5,7%
Madera	230	0,1%	0,010	1,2%
Refinación de petróleo	229	0,1%	0,002	6,3%
Administración pública	196	0,1%	0,002	6,1%
Metalurgia básica	177	0,0%	0,004	2,0%
Comercio	108	0,0%	0,001	9,0%
Actividades financieras	80	0,0%	0,001	4,6%
Textiles, vestidos y productos de cuero	62	0,0%	0,002	1,4%
Restaurantes y hoteles	60	0,0%	0,001	3,9%
Educación	55	0,0%	0,001	3,9%
Actividades profesionales	40	0,0%	0,000	6,8%
Actividades de entretenimiento	32	0,0%	0,001	2,5%
Información y comunicaciones	24	0,0%	0,001	2,3%
Salud	15	0,0%	0,000	4,5%
Transporte y almacenamiento	10	0,0%	0,000	5,6%
Actividades inmobiliarias	8	0,0%	0,000	6,9%
Infraestructura	6	0,0%	0,000	2,7%
Otras industrias	5	0,0%	0,000	0,7%
Edificaciones	1	0,0%	0,000	4,3%

Cálculo con base en la matriz insumo-producto y los cuadros de utilización del agua 2017 del DANE.

De otra parte, estos resultados muestran una alta dependencia de la matriz energética en las hidroeléctricas para la producción de electricidad²⁴: 3,648 m³ por cada mil pesos de producción de electricidad, lo que, a su vez, muestra su gran vulnerabilidad ante fenómenos climáticos extremos, particularmente El Niño, ya que de acuerdo con el último reporte del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), eventos climáticos como El Niño y La Niña se podrían volver más frecuentes e intensos²⁵. Lo mismo sucede con los sectores de agricultura y ganadería, ya que, ante su alta dependencia del agua: 2,031 m³ por cada mil pesos de producción, la escasez de agua reduce la productividad de los cultivos, lo cual puede generar problemas de seguridad alimentaria y afectar la economía del país. Por supuesto, no todos los cultivos son igualmente intensivos en el consumo total de agua, sobresale, por ejemplo, la elevada intensidad de la explotación de monocultivos de *commodities* en ecosistema frágiles y de flores, ni de todo tipo de ganadería por la diferenciación entre la ganadería extensiva en tierras frágiles y la ecológica o la silvopastoril.

Como lo menciona Borja-Vega *et al.* (2020), se espera que, como consecuencia del cambio climático, las temperaturas promedio en Colombia aumenten hasta 2,14 grados centígrados hacia final del siglo. El resultado probable será mayor número de sequías e inundaciones, aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos El Niño y La Niña, y pérdida rápida y constante de glaciares, que ya han retrocedido un 60% en los últimos 50 años.

²⁴ De acuerdo con datos de la Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica, para 2023 el 68% de la energía eléctrica en Colombia se genera con hidroeléctricas, es decir, se utiliza agua en embalses para mover turbinas y generar energía eléctrica.

²⁵ Para más detalles, se puede consultar: <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/index.php?idp=303>.

Por lo cual, es fundamental implementar medidas de adaptación al cambio climático para reducir la vulnerabilidad, especialmente de la matriz energética y de los sectores primarios. Entre algunas de las medidas que se pueden considerar son: i) diversificar la matriz energética: reducir la dependencia de las hidroeléctricas mediante la inversión en fuentes de energía renovable como la solar, la eólica y la geotérmica, y ii) implementar políticas de uso eficiente del agua, al fomentar el uso eficiente del agua en el sector agrícola mediante la tecnificación del riego, la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, por ejemplo con la sustitución de fertilizantes químicos, la no explotación extensiva de *commodities* en ecosistemas frágiles susceptibles de un rápido agotamiento de sus aguas subterráneas, el cambio en la forma extensiva de ganadería y en la dieta del ganado, entre otras.

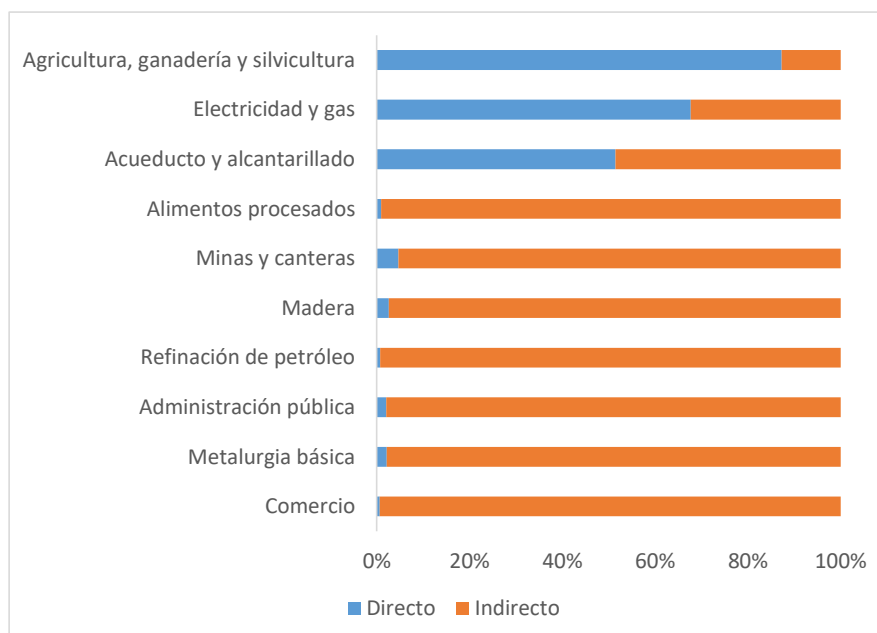
De otra parte, en el Gráfico 1 se puede observar cómo el sector de electricidad y gas es menos eficiente en el uso del agua que el sector agricultura, ganadería y silvicultura, ya que para generar una unidad monetaria (en miles de \$) de producción en el primer sector se requiere un mayor volumen de agua (3,648 vs 2,031 en el segundo sector).

El análisis del consumo de agua en la economía no puede limitarse solamente al consumo directo. El consumo indirecto de agua para producir los bienes y servicios que se consumen puede ser considerable y representar un riesgo importante para la sostenibilidad de los recursos hídricos. Su indebida consideración podría llevar a la implementación de políticas públicas erróneas. La gran mayoría, sino la totalidad, de los sectores económicos utilizan el agua de forma indirecta (Gráfico 1). Esto significa que, si bien su consumo directo puede ser bajo, la cantidad de agua necesaria para producir los insumos que utilizan puede ser considerable. Por ejemplo, en el caso de la industria de procesamiento de alimentos, la carne usada implica un alto consumo de agua para el riego de los pastos, la cría del ganado y el procesamiento de la carne. Incluso en los servicios de salud, como la atención médica, se consume agua de forma indirecta, a través de la energía utilizada en los hospitales, el agua utilizada para la limpieza y la producción de los insumos médicos.

En este contexto, el cuarto principio de la declaración de Dublín establece que “el agua tiene un valor económico en todos sus usos competitivos y debe ser reconocida como un bien económico” (Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente 1992)²⁶. Por lo cual es necesario evaluar los retornos económicos sectoriales del uso del agua como indicador guía para garantizar la eficiencia de las políticas de asignación del agua entre diferentes sectores.

Gráfico 1. Uso directo e indirecto del agua por sector
(los diez sectores con mayor consumo de agua)

²⁶ No existe una actualización oficial de los Principios de Dublín. Sin embargo, se han realizado diversos esfuerzos para actualizar y fortalecer estas directrices: i) En 2002, se adoptó la Declaración de Johannesburgo sobre el Agua Dulce, que reafirma los Principios de Dublín y hace un llamado a la acción para lograr la gestión sostenible del agua, ii) En 2015, se adoptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que incluyen un objetivo específico para la gestión sostenible del agua (ODS 6), y iii) En 2023, se celebró la Conferencia del Agua de la ONU 2023, que se centró en la aceleración de la acción para lograr el ODS 6.



Cálculo con base en la matriz insumo-producto y los cuadros de utilización del agua 2017 del DANE

Para esto se construyen dos indicadores. El primero, denominado en la literatura ganancias directas del uso del agua, medidos como el valor agregado por metro cúbico de agua usado directamente en cada sector económico. Como se mencionó anteriormente, el consumo directo de agua no es suficiente para evaluar su valor real, ya que los sectores utilizan agua de forma indirecta a través de los insumos utilizados. Por ello, se construye un segundo indicador para medir las llamadas ganancias totales del uso del agua, que considera el consumo indirecto, para lo cual se toma el valor agregado y se divide por la cantidad total de agua utilizada en la cadena de producción, esto es el consumo directo más el consumo indirecto de agua.

El sector agrícola muestra un bajo valor agregado por unidad de volumen de agua utilizada en el consumo directo. Sin embargo, si se considera el consumo indirecto, el valor agregado por unidad de volumen de consumo total de agua del agua es también relativamente bajo debido a la elevada cantidad de agua utilizada para producir sus insumos como el caso de fertilizantes y pesticidas. De otra parte, el procesamiento de alimentos puede consumir directamente poca agua, pero al utilizar insumos agrícolas como insumo, el valor agregado indirecto es bastante alto.

Como se puede observar en el Cuadro 2, los sectores de agricultura, ganadería y silvicultura, y electricidad y gas, consumen directamente una gran cantidad de agua, sus ganancias directas son muy bajas: \$0,116 y \$0,312 por m³, respectivamente (columna 1). Otros sectores con ganancias directas por debajo de \$100 por m³ son: acueducto y alcantarillado (\$1,4), madera (\$31,7), alimentos procesados (\$29,9), minas y canteras (\$73,0), metalurgia básica (\$69,6). El sector de edificaciones presenta la mayor ganancia por metro cúbico de agua utilizado directamente, con un valor de \$24.460.

Cuadro 2. Uso directo del agua y coeficiente de agua (peso / m³)

	Ganancias directas del uso del agua (1)	Ganancias totales del uso del agua (2)	Multiplicador (2 / 1)
Electricidad y gas	0,116	849,7	7.397,6
Agricultura, ganadería y silvicultura	0,312	410,9	1.315,3
Acueducto y alcantarillado	1,422	955,6	671,9

Madera	31,7	910,7	28,8
Alimentos procesados	29,9	673,7	22,6
Minas y canteras	73,0	1.301,7	17,8
Metalurgia básica	69,6	866,0	12,4
Textiles, vestidos y productos de cuero	163,1	1.357,5	8,3
Refinación de petróleo	166,6	984,7	5,9
Administración pública	271,1	1.121,2	4,1
Actividades financieras	484,2	1.510,3	3,1
Restaurantes y hoteles	519,6	1.575,9	3,0
Comercio	765,9	2.179,3	2,8
Actividades de entretenimiento	668,8	1.638,8	2,5
Información y comunicaciones	782,9	1.868,2	2,4
Educación	765,0	1.485,3	1,9
Salud	2.444,4	3.908,2	1,6
Actividades profesionales	1.733,6	2.638,1	1,5
Otras industrias	1.304,4	1.928,0	1,5
Transporte y almacenamiento	4.855,2	6.218,2	1,3
Infraestructura	3.025,4	3.799,7	1,3
Actividades inmobiliarias	11.104,1	11.405,2	1,0
Edificaciones	24.460,8	24.985,1	1,0

Cálculo con base en la matriz insumo-producto y los cuadros de utilización del agua 2017 del DANE. A partir de la columna 2 y 3 del Cuadro 2, se muestra que las denominadas ganancias totales del uso del agua y su multiplicador –esto es, involucrando el agua usada de manera indirecta– en los sectores de agricultura, ganadería y silvicultura, y electricidad y gas son los que muestran el más elevado multiplicador de consumo total de agua, siendo de 7.398 y 1.315, respectivamente. Esto es explicado porque estos sectores proveen insumos y transmiten de forma indirecta su consumo de agua a la producción de los sectores que los utilizan. De otra parte, los restantes sectores generan un multiplicador de consumo total de agua por debajo de 30, con excepción de acueducto y alcantarillado, que es de 672.

Como se mencionó anteriormente, esta clase de análisis ayuda a orientar la planificación y gestión de los recursos hídricos. En este contexto, aquí se presenta, a manera de ilustración, el impacto en el uso de agua con un incremento de 20% en la demanda final de los sectores que más consumen agua (agricultura, ganadería y silvicultura y electricidad y gas), ya que, desde una perspectiva de desarrollo sostenible, no basta realizar la evaluación de los efectos económicos de las políticas, sino que es necesario observar los resultados y las consecuencias ambientales de los escenarios de política económica.

Como se aprecia en el Cuadro 3, un incremento del 20% en la demanda final para los sectores de agricultura, ganadería y silvicultura significaría un incremento en el valor agregado del sector del 0.5%, que contabiliza los efectos indirectos sobre los demás sectores, llevaría a un incremento en el valor agregado total de 0.7% en la economía. Complementariamente, se observaría un incremento del 4.7% en el consumo total de agua en el país, al requerirse 8.416 hectómetros cúbicos de agua para poder satisfacer esta demanda adicional en la economía, que es 1,3 veces más de lo que utiliza actualmente el sector de acueducto y alcantarillado.

Cuadro 3. Efectos de un incremento del 20% en la demanda final para los sectores agropecuario y eléctrico

	Consumo de agua	Valor agregado
Agricultura, ganadería y silvicultura	4.6%	0.5%
Resto de sectores	0.1%	0.2%
Total	4.7%	0.7%
Electricidad y gas	5.0%	0.3%
Resto de sectores	0.1%	0.1%
Total	5.1%	0.4%

Cálculo con base en la matriz insumo producto y los cuadros de utilización del agua 2017 del DANE.

En consecuencia, el poder transformar la forma de producción del sector agropecuario y/o la estructura de especialización para garantizar que se utilice más eficientemente el agua, contribuiría de manera importante en la gestión de los recursos hídricos hacia el futuro. Además, se reduciría la vulnerabilidad ante los cambios extremos del clima, y contribuiría a reducir los riesgos de la seguridad alimentaria del país.

De manera similar, se observa que algo similar puede suceder con el sector de electricidad y gas, ya que, bajo el escenario considerado, crecerían sus requerimientos de agua en un 5.0%, lo cual equivaldría a 9.205 hectómetros cúbicos adicionales de agua, 1,5 veces lo que usa el sector de acueducto y alcantarillado. Ante la elevada intensidad en el uso de agua por parte del sector eléctrico, es claro que la transición hacia energías renovables se vuelve una prioridad en el sector eléctrico, pero enfocándola hacia energías que no tengan como fuente principal el agua, como podrían ser la solar o la eólica.

Conclusiones

El crecimiento económico es una de las condiciones necesarias para el bienestar de un país en desarrollo, pero debe de ser ambientalmente sostenible y socialmente incluyente. La explotación irracional de recursos naturales como el agua puede llevar a perversas e irreversibles consecuencias ambientales y sociales, por lo que la gestión del agua debe buscar un equilibrio entre el crecimiento económico y la protección de este recurso vital.

Los macro sectores agropecuario y de electricidad presentan una gran dependencia del agua, al ser los que más lo utilizan como insumo en su proceso de producción, un 96% del total. Esto trae como consecuencia su alta vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos, como el del fenómeno del Niño. Por lo cual, es necesario implementar medidas de adaptación al cambio climático para asegurar la seguridad energética y alimentaria del país, aparte de la gestión sostenible y de preservación de las reservas hídricas en el país.

Un problema estructural determinante en Colombia para la gestión eficiente del agua en una perspectiva duradera es la excesiva importancia del uso ilícito y criminal del recurso por parte de actividades abiertamente ilegales, que atenta contra la disponibilidad de un recurso escaso a nivel planetario en el mediano y largo plazo. Hay que tener en cuenta que, casi el 70% de esa agua se ubica en la Orinoquia y el Amazonas, zonas azotadas por la deforestación y la minería ilegal. Es de mencionar que, según GIZ (2017), la deforestación asociada a los cultivos de coca por actividades antrópicas dinamizadas en zonas circundantes (menos de 1 km) representó cerca de un 41% del total de deforestación de la Amazonía colombiana en el periodo 2005-2014.

El análisis del consumo de agua en la economía no puede limitarse al consumo directo. El consumo indirecto de agua debe ser considerado para la gestión sostenible de los recursos hídricos. No tenerlo puede traer consecuencias para la disponibilidad de agua en el futuro. Por lo tanto, es necesario

medir y monitorear el consumo indirecto de agua en cada uno de los sectores económicos, e implementar políticas públicas que incentiven la racionalización y eficiencia del consumo de agua.

De otra parte, también es importante resaltar que el agua es un recurso vital para la vida y la economía, pero su precio a través de las tarifas de provisión del agua no refleja debidamente el costo de oportunidad social e intertemporal de este recurso no solo escaso en medio de una crisis climática planetaria, sino además altamente concentrado en pocos países en el mundo²⁷. Por lo cual es necesario desarrollar indicadores que permitan evaluar el valor real diferencial del agua consumida a nivel tanto regional, como sectorial y de los principales usuarios, a fin de que se internalicen debidamente como referente clave para orientar las decisiones de producción y consumo.

El análisis de las denominadas ganancias del agua por sector es una herramienta útil para la toma de decisiones sobre la gestión del agua. Por lo que es importante considerar en conjunto el consumo de agua, el valor real del agua y las externalidades del uso de este recurso escaso como referente crucial para diseñar una estrategia de gestión sostenible del agua.

La gestión del agua en la agricultura requiere un enfoque integral que incluya la optimización de los sistemas de riego. Si bien el riego por goteo es una destacada opción, la elección del sistema más adecuado depende de las condiciones específicas de cada cultivo y de la aptitud del suelo. Para mejorar la eficiencia en el uso del agua, es necesario integrar la adopción de tecnologías de riego eficientes con la implementación de prácticas de gestión integrada de recursos hídricos, como la planificación de cultivos, la conservación del suelo y la reutilización de aguas tratadas.

Adicionalmente, la gestión del agua es un desafío intergeneracional en la medida en que es una prioridad global garantizar el acceso al agua para las generaciones futuras. La experiencia de ciudades como Ciudad del Cabo, que estuvo al borde de una crisis hídrica en 2018, y Singapur, con sus escasos recursos naturales, ha demostrado que, con medidas drásticas y estrategias integrales, como la restricción del consumo, la reutilización y la desalación, resulta posible gestionar la sostenibilidad hídrica a largo plazo.

De otra parte, la Tasa por Uso del Agua (TUA) como cobro por el uso del recurso hídrico, tiene por objetivo financiar la gestión del agua, fomentar su uso eficiente y conservar los ecosistemas acuáticos. Las corporaciones autónomas regionales (CAR) fijan las tarifas; su valor promedio nacional llegó a ser de \$17,01 por m³ en 2024, un aumento significativo respecto a 2017, que era \$0,89. Sin embargo, sin justificación alguna, esta tasa continúa siendo significativamente más baja que las tarifas de acueducto en muchas ciudades, como Bogotá²⁸, al punto de representar un exiguo 0.5% de la tarifa por consumo básico y no básico de un hogar de estrato 4, por ejemplo. Esta diferencia premia un uso excesivo del agua, especialmente en zonas rurales, considerando su creciente escasez. Es necesario revisar y ajustar las tarifas de la TUA para reflejar el verdadero costo de oportunidad intertemporal del agua y promover su uso sostenible a través del tiempo, razón por la cual se deben integrar las acciones de las CAR y de las autoridades responsables a nivel urbano de la región, como alcaldías y consejos municipales, para la fijación coordinada de tarifas bajo criterios racionales como costo-eficiencia para el uso de agua en la correspondiente jurisdicción.

De acuerdo con GCEW (2024), el mensaje más importante que se debe dar sobre la gestión del agua en el contexto de cambio climático es que las políticas de oferta continuada de agua son cuestión del pasado, porque las lluvias son cada vez más irregulares y, en diversas regiones del mundo, menores. Por lo cual cada vez es más importante la planificación hídrica y, sobre todo, la gestión eficiente de este recurso.

Ante este escenario, la gestión sostenible del agua se vuelve imperativa bajo la responsabilidad del Estado y con la decisiva participación de las comunidades. Para garantizar la seguridad hídrica a largo plazo, es necesario adoptar un enfoque integral que combine medidas de adaptación y

²⁷ Por ejemplo, Colombia ocupa el sexto lugar entre los países con mayores reservas de agua dulce en el mundo, con menos de una tercera parte de las reservas del primer país que es Brasil (2360 km³ al año vs 8233 km³ al año).

²⁸ Un hogar, estrato 4, paga por consumo básico y no básico \$3.343 por metro cúbico, en promedio; para el caso de un local comercial \$5.150 por metro cúbico, y en el caso de que sea industrial \$4.738 por metro cúbico.

mitigación. Algunas de las acciones incluyen, entre otras: protección de ecosistemas acuáticos, gestión integrada de recursos hídricos, inversión en infraestructura sostenible, promoción de prácticas agrícolas sostenibles, modificación del patrón de especialización agropecuario, teniendo en cuenta la vocación agrícola del territorio, y diversificación de la matriz energética. La gestión sostenible del agua no solo es fundamental para garantizar la seguridad hídrica, sino también para asegurar la producción de alimentos y la seguridad alimentaria, la generación de energía, la protección de la biodiversidad y el desarrollo económico. Aunque las acciones gubernamentales son fundamentales, el creciente mercado de financiamiento verde, impulsado por innovadores instrumentos financieros, y diversas modalidades de cooperación internacional, podrían abrir un abanico de posibilidades para el sector privado, las comunidades rurales y las organizaciones sociales, facilitando el acceso a recursos de financiación para proyectos sostenibles.

En conclusión, la gestión sostenible del agua requiere un enfoque integral que considere las diferentes dimensiones de la problemática: ambiental, económica, social e institucional. Es necesario un esfuerzo conjunto de todos los actores sociales para asegurar la disponibilidad de este recurso vital para las generaciones presentes y futuras.

Referencias

- Alteiro, H., Alvarez, A., Calderon S. and Romero, G. "Using water accounts and modelling to help set water prices in Colombia". En: Michael Vardon, Steve Bass, Sofia Ahlroth y Arjan Ruijs (eds). *Better policy through natural capital accounting: Stocktaking and ways forward*. World Bank WAVES.
- Borja-Vega, C., Groot, K. and Serrano, H. (2020). "Colombia - Turning the Tide: Water Security for Recovery and Sustainable Growth". Water Security Diagnostics, Policy brief, World Bank Group.
- Boudhar, A., Boudhar, S. and Ibourk, A. (2017). "An input–output framework for analyzing relationships between economic sectors and water use and intersectoral water relationships in Morocco". *Economic Structures*, Vol. 6 (9).
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia – CTA. (2018). Propuestas de acciones y recomendaciones para mejorar la productividad del agua, la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales y el reúso del agua en Colombia. Misión de Crecimiento Verde, Departamento Nacional de Planeación.
- Global Commission on the Economics of Water - GCEW. (2024). The economics of water: Valuing the hydrological cycle as a global common good – Executive Summary. Enlace en: <https://economicsofwater.watercommission.org/report/executive-summary-economics-of-water.pdf>.
- GIZ (2017). Coca y deforestación. Mensajes de acción para la planeación del desarrollo. Marzo.
- Hernández, G. y Quintero, L. F. (2023). "Dinámica sectorial de la economía colombiana: 2005 – 2019". Archivos de Economía, No 554. Departamento Nacional de Planeación.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M. and Mekonnen, M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan.
- Hoekstra, A.Y. y Hung, P.Q. (2002). "Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade". *Value of Water Research Report Series* No. 11. UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- Ideam (2023). Estudio Nacional del Agua 2022. Ideam
- Velásquez, E. (2006). "An input–output model of water consumption: Analyzing intersectoral water relationships in Andalusia". *Ecological Economics*, Vol. 56 (2), pp. 226 – 240.

Perspectivas sobre la transición energética:
Navegando hacia un futuro sostenible y equitativo

Introducción

La transición energética representa un cambio estructural que va más allá de la simple adopción de energías renovables, ya que implica una transformación profunda en la forma en que se concibe y utiliza la energía, con impactos significativos en la tecnología, la economía y la sociedad en su conjunto.

El objetivo principal de esta transición es reducir el uso de energías contaminantes para avanzar hacia una matriz energética más limpia, sostenible y resiliente. Este proceso requiere cambios culturales y ajustes en las prioridades sociales, centrándose en la equidad y la sostenibilidad como pilares fundamentales para su éxito. La adopción de nuevas tecnologías en esta transición presenta desafíos complejos, como la facilidad y el costo de uso, la eficiencia y el cambio cultural asociado con nuevos patrones de consumo y conservación de energía. La intervención gubernamental, a través de medidas como regulaciones normativas, impuestos e incentivos, desempeña un papel crucial en facilitar o dificultar la adopción de estas tecnologías.

Es imperativo considerar el balance energético actual, identificando los recursos con mayor potencial y determinando la mejor manera de aprovecharlos. Este enfoque es fundamental para construir escenarios de transición energética que resulten en una matriz de oferta equilibrada, costo-eficiente, sostenible y operativamente confiable y estable.

En este proceso, aspectos como el establecimiento de precios competitivos y accesibles para las nuevas fuentes de energía, con referencia a los combustibles fósiles, y el acceso a recursos financieros para proyectos energéticos, deben abordarse prioritariamente. La evolución del mercado internacional de petróleo, gas y carbón también influye de manera determinante en la trayectoria de la transición energética, en el propósito de avanzar hacia una economía baja en carbono por consideraciones económicas, ambientales y de seguridad energética.

En cuanto a la disponibilidad de minerales y materias primas necesarias para la transición, es crucial centrarse en una evaluación cuidadosa sobre la conveniencia de su extracción, producción y procesamiento, considerando su impacto en los costos y el desarrollo de las tecnologías. La innovación tecnológica, la recuperación, el aprovechamiento y la reutilización de minerales, junto con una estructura regulatoria adecuada, son elementos clave para facilitar la transición.

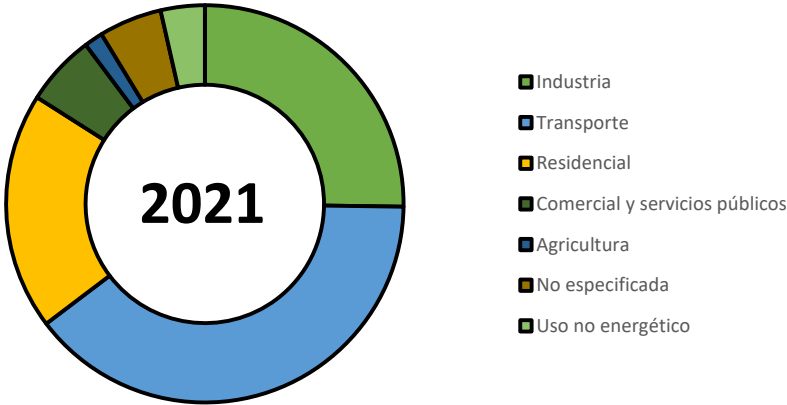
En resumen, la transición energética no solo implica adoptar tecnologías más limpias, sino también cambiar patrones de comportamiento y priorizar políticas públicas activas en función de las condiciones y necesidades del país. La intervención gubernamental, la identificación y el aprovechamiento de recursos estratégicos, y la iniciativa privada son cruciales para la construcción y el desarrollo de una matriz energética equilibrada. Este camino hacia la sostenibilidad no solo se trata de sustituir fuentes de energía, sino de forjar un futuro donde la equidad y la responsabilidad ambiental sean fundamentales para la sociedad. La innovación, la cooperación internacional y el compromiso colectivo serán clave para construir un futuro más resiliente, sostenible y equitativo.

La matriz energética de Colombia para 2021

Tomando como referencia las cifras del Balance Energético Colombiano, el consumo final de energía del país en el año 2021 fue de 1.319 PJ. Como se puede observar en el Gráfico 1, haya una gran participación del sector transporte, con un 39,5% (520,7 PJ), del sector industrial, con un 25,2% (332,7 PJ) y del sector residencial con un 19,3 % (254,5 PJ), mientras que el sector comercial y de

servicios públicos participa con un 5,8% (76,1 PJ), el sector agrícola con un 1,5% (67,5 PJ) y otros sectores con un 8,7% (114,8 PJ).

Gráfico 1. Consumo final de energía - Colombia 2021

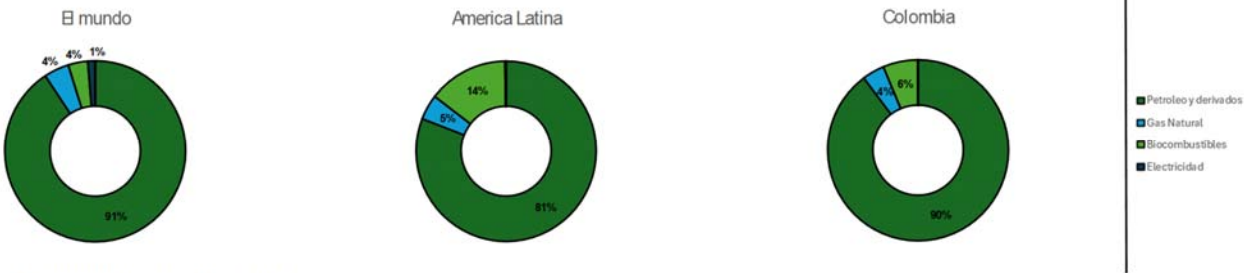


Fuente: International Energy Agency. World Energy Balance

Composición del consumo energético por sector

El sector transporte es el principal consumidor de energía en Colombia, representando el 39,5% del total en 2021. Dentro de este sector, el transporte por carretera, tanto de pasajeros como de carga, es el que más contribuye, seguido por el transporte aéreo. En cuanto al uso de combustibles, la composición en Colombia es similar a la del resto del mundo y de la región. Los combustibles líquidos derivados del petróleo dominan en todas las regiones (91% a nivel mundial, 81% en Latinoamérica y 90% en Colombia). No obstante, es relevante notar que en Latinoamérica los biocombustibles están ganando importancia, representando un 14% del total en la región, mientras que en Colombia esta participación alcanza el 6% (Gráfico 2).

Gráfico 2. Consumo de energéticos del sector transporte (2021)



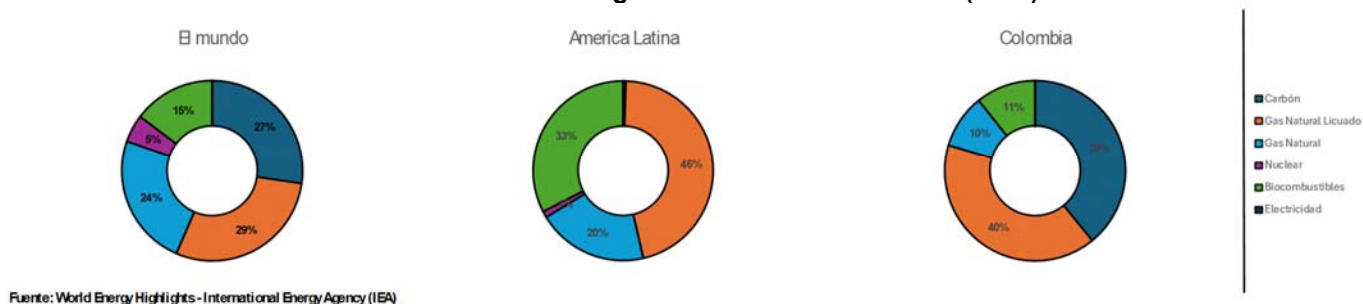
Fuente: World Energy Highlights - International Energy Agency (IEA)

Fuente: Worl energy highlights – international Energy Agency (IEA)

El sector industrial es el segundo consumidor de energía en el país, con una participación del 25,2 % del consumo total. De acuerdo con la estructura de la industria colombiana, el principal uso final de la energía es el calor directo e indirecto. Los energéticos más usados en la industria son el gas natural líquido (40%) y el carbón (39%). Al comparar el consumo de la industria manufacturera colombiana con el de Latinoamérica y el resto del mundo, se observa que las diferencias radican en

una mayor demanda de energía eléctrica y biocombustibles, en contraposición de un menor uso del gas natural (Gráfico 3).

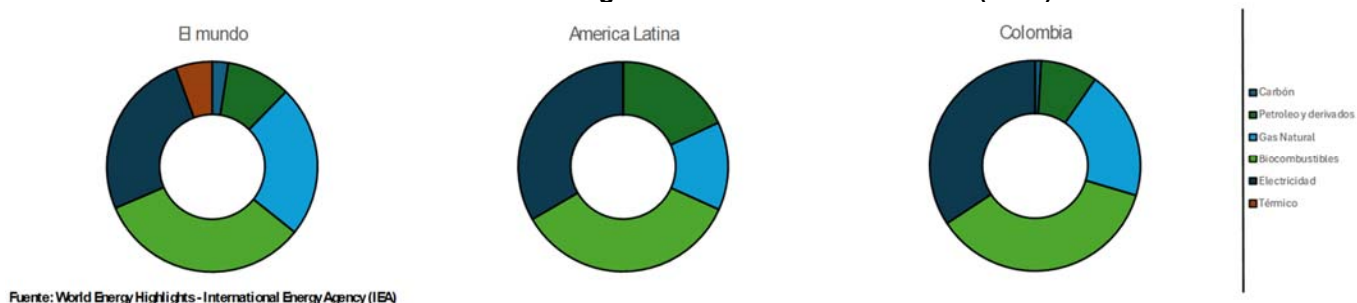
Gráfico 3. Consumo de energéticos del sector Industrial (2021)



Fuente: Worl energy highlights – international Energy Agency (IEA)

El sector residencial representa el 19,3% del consumo final de energía en el país y las actividades con usos más intensivos son la cocción y la refrigeración, seguidos por otras actividades como la televisión, la iluminación, el aire acondicionado, las lavadoras y el calentamiento de agua. Los energéticos más usados en el sector residencial en el país son: la leña con 36%, la energía eléctrica con 34 %, el gas natural con 20 %. Si se compara con el ámbito internacional, Colombia se distingue por un mayor uso de biomasa (biocombustibles) y gas natural en el sector residencial, en contraposición con el resto del mundo y Latinoamérica, que tienen mayores participaciones del petróleo y sus derivados en este sector (Gráfico 4).

Gráfico 4. Consumo de energéticos del sector Residencial (2021)



Fuente: Worl energy highlights – international Energy Agency (IEA).

Composición de la oferta energética y su transformación

Tomando en cuenta las dinámicas presentadas anteriormente, que detallan el comportamiento de los sectores que utilizan mayor cantidad de energía, es posible establecer la línea de base. Esta línea de base no solo describe la oferta y la demanda energética actual, sino también la transformación y los usos intermedios de esta energía.

Al analizar el Gráfico 5, se observa como dentro la matriz energética, la movilidad privada, pública y de carga muestra una alta dependencia de los combustibles fósiles, convirtiéndose así en el sector más contaminante. Esto subraya la urgencia de una transformación en este sector, que tenga en cuenta tanto las necesidades de movilidad como los imperativos medioambientales.

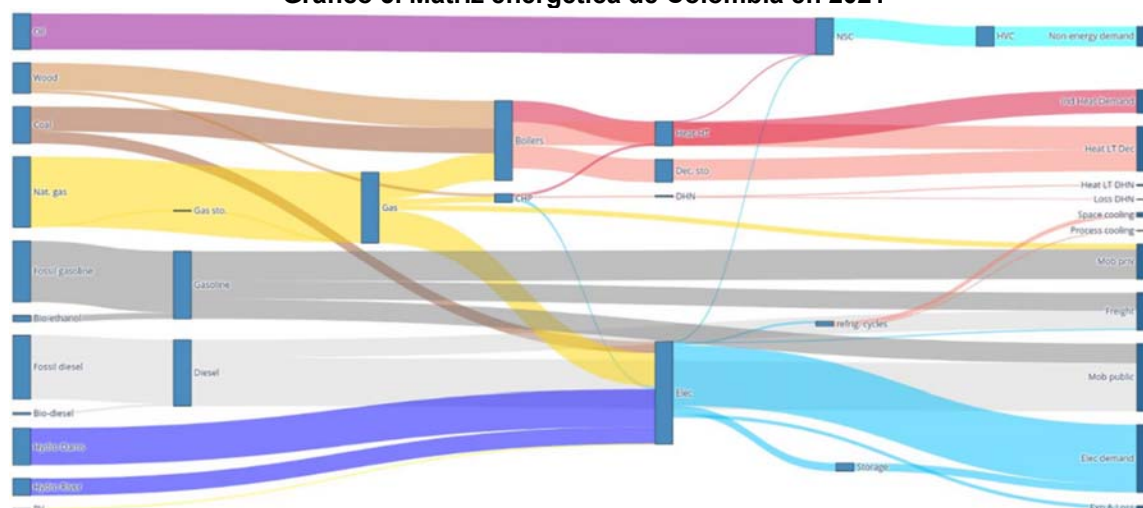
En el caso de la industria, está depende en gran medida de calderas que se alimentan principalmente de carbón, gas natural y madera, lo que no solo genera contaminación ambiental, sino que también

representa un riesgo para la salud pública. Por tanto, este sector presenta importantes aspectos para la transformación energética, ya que puede satisfacer las necesidades del país de manera sostenible ambientalmente.

En contraste, la generación de electricidad, en su mayoría, proviene de fuentes hidroeléctricas, complementada en menor medida por gas natural, lo cual resulta en una matriz energética considerablemente limpia. A pesar de esto, se reconoce la importancia de fortalecer la generación eléctrica con otras fuentes para aumentar su estabilidad y confiabilidad a largo plazo, dadas las vulnerabilidades que aparecen al considerar fenómenos climáticos, como el Niño, al tener una alta dependencia del recurso hídrico para la generación eléctrica.

En consecuencia, resalta la conveniencia de avanzar hacia la diversificación de la matriz energética, promoviendo el desarrollo de fuentes renovables alternativas. Este enfoque no solo contribuiría a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también aumentaría la seguridad energética del país al disminuir su dependencia de combustibles fósiles y fortalecer la resiliencia ante posibles fluctuaciones en los precios de la energía.

Gráfico 5. Matriz energética de Colombia en 2021



Bio-diesel: Biodiésel; Wood: Madera; PV: Fotovoltaica; Hydro dams: Presas hidroeléctricas; Hydro river: Presas de río; CSP: Energía solar concentrada; Wet biomass: Biomasa húmeda; Nat. Gas: Gas natural; Diésel: Diésel; Boilers: calderas; Biomethanation: Biometanización; Gas sto: Almacenamiento de gas; Elec: Electricidad; Gas: Gas; HPs: Bombas de calefacción; Storage: Almacenamiento; HT sto: Almacenamiento de calefacción; Dec sto: Almacenamiento descentralizado; Heat HT: Bombas de calefacción; Refrig. cycles: Ciclos de refrigeración; Gasif to HVC: Gasificación para químicos de alto valor; Electrolyser: Electrolizador; HVC: Productos químicos de alto valor; DHN: Redes de calefacción urbana; H2 prod: Producción de hidrógeno verde; H2 sto: Almacenamiento de hidrógeno verde; H2: Hidrógeno verde; Mob public: Movilidad pública; Heat LT DHN: Calefacción para distritos centralizados; Loss DHN: Pérdidas de redes de calefacción urbana; Heat LT Dec: Calefacción para distritos descentralizados; Freight: Transporte; Non- energy demand: demanda no energética; Elec demand: Demanda eléctrica; Curt: Cortes de energía; Exp & Loss: Exportaciones y pérdidas; Ind Heat Demand: Demanda de calefacción industrial; Mob priv: Movilidad privada; Space cooling: Aire acondicionado; Process cooling: Procesos de refrigeración.

Construida a partir de los datos de la UPME.

Potencial según fuente energética

En el contexto del compromiso global hacia la descarbonización y la transición hacia una economía más verde, resulta crucial explorar a fondo el potencial de las fuentes no convencionales de energías renovables en el país. Para esto el ejercicio se enfoca en examinar detalladamente el amplio abanico de opciones energéticas limpias y sostenibles, desde la energía solar y eólica hasta la geotérmica y la biomasa, evaluando su capacidad para reducir las emisiones de carbono, su impacto en la seguridad energética y su contribución al desarrollo económico local.

Este análisis exhaustivo permite no solo comprender mejor las posibilidades que estas tecnologías ofrecen, sino también trazar estrategias concretas para impulsar su adopción e integración efectiva en la matriz energética, con miras a consolidar un futuro más resiliente y sostenible para el país.

El análisis de los potenciales energéticos en Colombia ofrece una visión integral de las oportunidades y desafíos en el panorama energético del país. Desde el vasto potencial de generación hidroeléctrica hasta el crecimiento prometedor de la energía solar y eólica, se evidencia un horizonte rico en recursos renovables. Los números revelan un potencial significativo en términos de capacidad instalable y producción de energía, tanto a gran escala como en sistemas pequeños de generación distribuida. Sin embargo, para alcanzar estos potenciales, es crucial abordar no solo aspectos técnicos y económicos, sino también regulaciones adecuadas y políticas que fomenten la inversión y la implementación de proyectos sostenibles. El desarrollo de estos recursos energéticos no solo contribuirá a la seguridad y la diversificación de la matriz energética colombiana, sino que también impulsará la transición hacia un futuro más sostenible y resiliente en términos energéticos y medioambientales.

Bioenergía

La biomasa, como fuente de energía renovable, abarca una amplia gama de materia orgánica que puede ser convertida en energía utilizable, desde residuos agrícolas y forestales hasta desechos alimenticios y lodos de depuradoras; su diversidad la convierte en una opción valiosa y continua. Con esta característica, la biomasa presenta un potencial significativo para mitigar la dependencia de combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, su versatilidad permite su aplicación en diversas formas, como la producción de biogás, la generación de electricidad mediante combustión directa o la obtención de biocombustibles líquidos. De este modo, la biomasa se erige como un recurso estratégico en la transición hacia un sistema energético más sostenible y resiliente.

En el marco de evaluación del potencial de la biomasa, se han desarrollado diferentes enfoques para comprender su capacidad de contribuir al suministro energético del país. Uno de estos enfoques se centra en el dimensionamiento del potencial energético bruto, considerando residuos agrícolas, pecuarios y sólidos orgánicos urbanos. Este análisis revela un potencial de 449.478 TJ/año a nivel municipal. Por otro lado, se ha estudiado específicamente el potencial de la biomasa para la producción de biogás destinado a la generación de energía eléctrica o para su uso como gas. Realizado a nivel departamental, se amplía la inclusión de residuos al considerar también los provenientes de procesos industriales, estimando un potencial teórico nacional de biomasa de 53.558 TJ/año. Sin embargo, al considerar criterios de priorización basados en factores logísticos y la disponibilidad del recurso, el potencial estimado se reduce a 14.670 TJ/año. Ahora bien, mediante experimentación y análisis más específicos, se determina que el potencial real de biomasa para los sectores priorizados es de 11.704 TJ/año.

Hidroelectricidad

El Atlas de Potencial Hidro-energético de Colombia, publicado por la UPME en 2015, proporciona una visión detallada del potencial de generación de energía hidroeléctrica en el país. Este estudio se enfoca en diversas formas de aprovechamiento, incluyendo centrales filo de agua con diferentes

longitudes de conducción. Los resultados se presentan por subzonas hidrográficas, cubriendo todas las áreas hidrográficas del territorio nacional.

Según los datos proporcionados, se identifican diferentes tamaños de proyecto con sus respectivas capacidades de generación. Por ejemplo, se estiman 2 MW para pico centrales, 15 MW para micro centrales, 143 MW para minicentrales, 4786 MW para pequeñas centrales, 8113 MW para centrales medianas y 43.129 MW para grandes centrales. En conjunto, considerando un caudal con un 95% de probabilidad de excedencia, se proyecta un potencial de generación hidroeléctrica de 952.083 TJ/año.

El análisis también revela que el potencial hidro-energético de Colombia está ampliamente distribuido en todo el territorio, pero es especialmente abundante en áreas montañosas cercanas a las cordilleras. Esto sugiere que, al menos, existen numerosas oportunidades para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos en el país, aprovechando los recursos naturales disponibles y contribuyendo así a la seguridad energética y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Eólico costa afuera (*offshore*)

Las áreas marítimas ofrecen condiciones óptimas para la generación de energía eólica debido a la ausencia de obstáculos y a las bajas rugosidades de superficie. Esta situación se destaca especialmente en la zona costera de la región Caribe de Colombia, donde prevalecen condiciones favorables en gran parte del área marítima del Mar Caribe. Además, la proximidad de aguas poco profundas a la línea costera, a distancias de hasta 50 km, agrega interés a estas áreas para el desarrollo de proyectos eólicos costa afuera.

En el año 2022, el Banco Mundial presentó la "Hoja de ruta para el despliegue de la energía eólica costa afuera en Colombia", un estudio completo que considera variables técnicas, económicas y ambientales para identificar las áreas marítimas idóneas para el desarrollo de proyectos eólicos costa afuera. Este estudio identificó catorce lugares con condiciones adecuadas, de los cuales seis son aprovechables mediante la implementación de cimentaciones fijas y 8 a través de sistemas flotantes. Esto resulta en una capacidad potencial instalable de 27,2 GW y 21,6 GW, respectivamente, sumando un total agregado de 48,8 GW. Considerando un factor de capacidad del 50%, se estima que el potencial de generación de energía eólica costa afuera alcance aproximadamente 213,7 TWh/año.

El desarrollo de la energía eólica costa afuera en Colombia representa una oportunidad significativa para diversificar la matriz energética del país, aprovechando un recurso renovable abundante y sostenible. Esta expansión podría contribuir a reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables y a mitigar los impactos ambientales asociados con la generación de energía eléctrica.

Solar fotovoltaico

El Atlas de Radiación Solar publicado por el IDEAM en 2016, ofrece una visión detallada de la distribución del recurso solar en Colombia. Destacan regiones como la Región Caribe, los valles interandinos y los Llanos Orientales por su notable disponibilidad de radiación solar. Para estimar la potencia instalable y la cantidad de energía que podría producirse anualmente, Ángel, García y Ortega (2023) evaluaron el recurso solar considerando restricciones ambientales y el desempeño potencial de granjas solares a gran escala. Sus estimaciones revelan una potencia instalable de 8.000.000 MW, capaz de producir 40.366.080 TJ/año. Esta metodología está orientada específicamente a la evaluación de proyectos de gran escala, con capacidades instaladas superiores a los 50 MW, para su integración en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). La distribución del potencial solar en el territorio es amplia y equitativa, destacando las mismas regiones identificadas en el Atlas de Radiación Solar del IDEAM. Esta abundancia de recursos solares ofrece oportunidades significativas para la expansión de la energía solar fotovoltaica en Colombia, lo que podría contribuir

de manera importante a la diversificación de la matriz energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Generación solar distribuida

En 2021, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) llevó a cabo un análisis exhaustivo del potencial técnico y técnico-económico de los sistemas pequeños de generación en Colombia, conocidos como Autogeneradores a Pequeña Escala (AGPE) y Autogeneradores a Gran Escala (AGGE), según lo designado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas. De acuerdo con este estudio, se identifica un elevado potencial técnico de 20 GW, alcanzable mediante la implementación de 8,5 millones de instalaciones, con la capacidad de producir cerca de 18,1 TWh al año. Además, se estima que el potencial técnico-económico disponible en 2021 sería de aproximadamente 7,4 GW, capaz de producir cerca de 10 TWh con la implementación de 415.000 soluciones.

Es importante destacar que el potencial técnico-económico abarca la potencia instalable en categorías comerciales, industriales y oficiales, mientras que el potencial técnico incluye la categoría residencial 2, que consiste en usuarios no subsidiados. Aunque la categoría residencial 1 no se considera en los grupos de potenciales definidos, podría representar un potencial desarrollable en el contexto de las comunidades energéticas.

Los cambios regulatorios podrían desempeñar un papel crucial en habilitar más proyectos para alcanzar viabilidad económica, lo que acercaría el potencial técnico-económico al técnico.

El potencial de la Generación Distribuida (GSD) no solo aborda una parte de la demanda energética, sino que también tiene implicaciones significativas en la descongestión de la red durante periodos de alta demanda, reduciendo las pérdidas técnicas del sistema de distribución y transmisión, y mitigando las condiciones de restricciones existentes en el servicio de energía eléctrica. Este enfoque descentralizado de generación eléctrica puede mejorar la resiliencia del sistema, y contribuir a la sostenibilidad energética a nivel local y nacional.

Elaboración de escenarios para la reducción de GEI

Teniendo en cuenta la línea de base BAU (*Business as Usual*) presentada en la ilustración 10 y el potencial energético anteriormente detallado, se plantean diferentes escenarios de transición que buscan evaluar formas en que se pueda aprovechar de manera sostenible el potencial energético disponible, al tiempo que se satisfacen las demandas energéticas requeridas y reduzcan las emisiones de GEI.

Enfoque de la elaboración de escenarios

En el contexto de la planificación energética, el concepto de costo – eficiencia desempeña un papel fundamental. El enfoque costo – eficiencia se refiere a la capacidad de lograr un objetivo deseado al menor costo posible, maximizando así el rendimiento de los recursos invertidos. En el caso de la energía, implica encontrar el equilibrio óptimo entre el costo de suministrar energía y los beneficios económicos, sociales y ambientales que esta energía proporciona.

Adicionalmente se consideran medidas activas para una reducción de las emisiones de GEI. Estas medidas hacen aún más exigentes los escenarios de transición, ya que se requiere no solo minimizar los costos, sino también reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Por lo tanto, cada escenario analizado toma en cuenta esta presión adicional sobre los recursos disponibles y las opciones de inversión.

Aquí se exploran tres escenarios desde el enfoque de costo – eficiencia, teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente. Cada escenario considera diferentes variables, como la inversión inicial requerida, los costos operativos a lo largo del tiempo, los impactos ambientales y sociales, así como la capacidad de satisfacer las necesidades energéticas actuales y futuras de manera sostenible. A través de estos escenarios, se busca identificar las opciones más eficientes en términos de costo para la transición hacia un sistema energético más resiliente, sostenible y equitativo.

Herramienta utilizada

Para el diseño de estos escenarios, es fundamental utilizar herramientas de modelado para sistemas energéticos. Estas herramientas permiten explorar transiciones hacia una matriz energética más sostenible y eficiente. Dichos modelos se dividen en dos categorías: aquellos centrados en la operación del sistema y aquellos orientados al diseño del sistema en escenarios de largo plazo.

Los modelos de operación del sistema se enfocan en la toma de decisiones en tiempo real o a corto plazo, optimizando la operación de redes de energía y centrales eléctricas. Por otro lado, los modelos orientados al diseño del sistema se concentran en la planificación a largo plazo, abarcando horizontes de simulación de varias décadas para evaluar escenarios de inversión y diseñar sistemas energéticos sostenibles. En este contexto, cabe destacar que se utiliza el modelo *EnergyScope*, el cual es un modelo intermedio que proporciona una resolución técnica general con un horizonte de simulación flexible. Esto permite realizar estudios de planificación para expandir el sistema energético de manera optimizada, bajo un análisis de escenarios.

Estimación de costos

En los cálculos realizados para cada escenario, se ha considerado una visión integral de los costos asociados. Esto implica la inclusión tanto de los gastos de capital (CAPEX), como los gastos operativos (OPEX) y el costo de los recursos necesarios. De esta manera, se obtiene una estimación completa de la inversión requerida, reflejando la realidad económica de cada escenario planteado.

Adicionalmente, se ha incorporado una proyección de crecimiento económico a partir del año 2025, basándonos en una tasa promedio del 3% del PIB. Esta estimación nos permite contextualizar los escenarios en un marco macroeconómico realista, considerando la evolución esperada de la economía en el mediano y largo plazo.

Para garantizar la solidez financiera del análisis, la tasa de descuento utilizada ha sido tomada del documento oficial "Metodología para la evaluación social de proyectos de inversión" publicado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) la cual es equivalente a 9%.

Finalmente, es importante destacar que las proyecciones de precios de las tecnologías se basan en la evolución observada a nivel internacional. Esto implica que la canasta óptima de tecnologías puede variar a medida que avanza el tiempo, adaptándose a las tendencias y cambios en el mercado global. De esta forma, aseguramos que los escenarios reflejen las dinámicas tecnológicas actuales y futuras, incorporando la posibilidad de adoptar nuevas soluciones más eficientes o económicas a medida que estén disponibles.

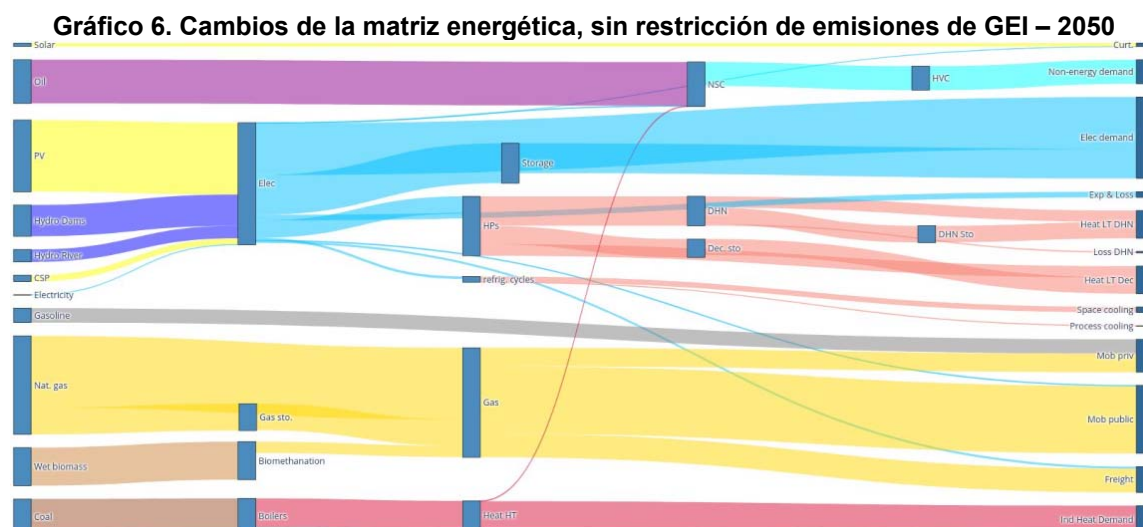
Resultados

A continuación, se presentan los escenarios para una reducción pasiva y activa de las emisiones de GEI, los cuales han sido desarrollados utilizando el modelo *EnergyScope*. Estos escenarios representan una exploración sistemática de posibles trayectorias futuras para el sistema energético,

considerando diversos factores como la demanda energética, el potencial de las fuentes de energía renovable, los cambios en las políticas energéticas y las tecnologías emergentes.

Escenario 1

En el primer escenario simulado (Gráfico 6), se prioriza la eficiencia en costos y el suministro de energía para satisfacer la proyectada demanda a 2050, sin considerar políticas activas de reducción de emisiones de GEI. Aquí se observa la importancia del potencial fotovoltaico (PV) como una fuente confiable con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, proponiendo que alcance alrededor del 50% de la matriz energética.



Bio-diesel: Biodiésel; Wood: Madera; PV: Fotovoltaica; Hydro dams: Presas hidroeléctricas; Hydro river: Presas de río; CSP: Energía solar concentrada; Wet biomass: Biomasa húmeda; Nat. Gas: Gas natural; Diésel: Diésel; Boilers: calderas; Biomethanation: Biometanización; Gas sto: Almacenamiento de gas; Elec: Electricidad; Gas: Gas; HPs: Bombas de calefacción; Storage: Almacenamiento; HT sto: Almacenamiento de calefacción; Dec sto: Almacenamiento descentralizado; Heat HT: Bombas de calefacción; Refrig. cycles: Ciclos de refrigeración; Gasif to HVC: Gasificación para químicos de alto valor; Electrolyser: Electrolizador; HVC: Productos químicos de alto valor; DHN: Redes de calefacción urbana; H2 prod: Producción de hidrógeno verde; DHN Sto: Almacenamiento para redes de calefacción urbana; H2 sto: Almacenamiento de hidrógeno verde; H2: Hidrógeno verde; Mob public: Movilidad pública; Heat LT DHN: Calefacción para distritos centralizados; Loss DHN: Pérdidas de redes de calefacción urbana; Heat LT Dec: Calefacción para distritos descentralizados; Freight: Transporte; Non- energy demand: demanda no energética; Elec demand: Demanda eléctrica; Curt: Cortes de energía; Exp & Loss: Exportaciones y pérdidas; Ind Heat Demand: Demanda de calefacción industrial; Mob priv: Movilidad privada; Space cooling: Aire acondicionado; Process cooling: Procesos de refrigeración.

Cálculos realizados con el modelo *EnergyScope*.

Adicionalmente, se observa un fortalecimiento de la generación hidroeléctrica, sin expandirla significativamente. En cuanto al sector industrial, se mantiene el uso de calderas alimentadas con carbón debido a su precio. Finalmente, se puede destacar una transición hacia el uso de gas en la movilidad pública y de carga, resaltando la importancia de diversificar la fuente de gas mediante procesos de biometanización, utilizando la biomasa disponible en el país.

En lo que respecta al cambio de la utilización energética por la movilidad privada, solo se logra alcanzar la mitad de la flota con gas, subrayando la necesidad de políticas más exigentes para

descontaminar este sector. A pesar de la ausencia de políticas activas de reducción de emisiones, esta transición permite a 2050 una reducción del 21% en las emisiones de CO₂.

Escenario 2

El segundo escenario simulado, no solo se enfoca en la eficiencia en costos y el suministro energético para cumplir con la demanda proyectada en 2050, sino que también considera una política activa de reducción del 60% de las emisiones al final del periodo. En el escenario se destaca el potencial fotovoltaico (PV) como una fuente abundante y constante de energía, garantizando un suministro confiable con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (Gráfico 7).

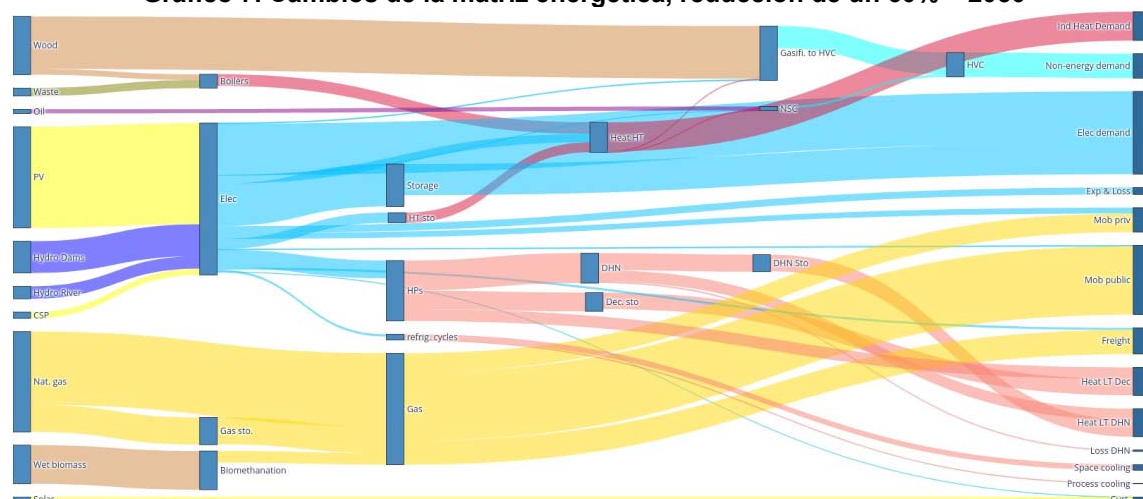
Además, se comienza a plantear la posible participación de las centrales térmicas solares (CSP), las cuales ofrecen la ventaja de generar energía de manera constante y predecible, incluso durante períodos sin luz solar directa, aparte de que también pueden almacenar energía térmica para su uso posterior, lo que las hace especialmente útiles para garantizar un suministro estable y confiable, complementando así el potencial fotovoltaico.

Nuevamente aparece la conveniencia de fortalecer la generación hidroeléctrica sin expandirla significativamente, mientras se integra para alimentar bombas de calor en el sector industrial, sustituyendo el uso de carbón en calderas como una medida inicial para descarbonizar la economía.

Complementariamente, se sugiere una transición hacia el gas en la movilidad pública, privada y de carga debido a su viabilidad económica, enfatizando la diversificación de la fuente de gas mediante procesos de biometanización utilizando la biomasa disponible en el país. Se inicia un cambio de combustibles fósiles hacia la electrificación del sector de movilidad.

En este escenario se contempla que la inversión a realizar es de un total de 8,5% del PIB al año (4,2 puntos porcentuales adicionales del PIB al año frente al escenario BAU). En conclusión, este segundo escenario resalta la importancia del potencial fotovoltaico y las CSP como fuentes confiables y de bajas emisiones, propone la integración de la generación hidroeléctrica para reducir el uso de carbón en el sector industrial y sugiere una transición hacia el gas en la movilidad, haciendo hincapié en la diversificación de la fuente de gas mediante biometanización. Este enfoque activo en la reducción de emisiones muestra un camino hacia un futuro energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Gráfico 7. Cambios de la matriz energética, reducción de un 60% – 2050



Bio-diesel: Biodiésel; Wood: Madera; PV: Fotovoltáica; Hydro dams: Presas hidroeléctricas; Hydro river: Presas de río; CSP: Energía solar concentrada; Wet biomass: Biomasa húmeda; Nat. Gas: Gas

natural; Diésel: Diésel; Boilers: calderas; Biomethanation: Biometanización; Gas sto: Almacenamiento de gas; Elec: Electricidad; Gas: Gas; HPs: Bombas de calefacción; Storage: Almacenamiento; HT sto: Almacenamiento de calefacción; Dec sto: Almacenamiento descentralizado; Heat HT: Bombas de calefacción; Refrig. cycles: Ciclos de refrigeración; Gasif to HVC: Gasificación para químicos de alto valor; Electrolyser: Electrolizador; HVC: Productos químicos de alto valor; DHN: Redes de calefacción urbana; H2 prod: Producción de hidrógeno verde; DHN Sto: Almacenamiento para redes de calefacción urbana; H2 sto: Almacenamiento de hidrógeno verde; H2: Hidrógeno verde; Mob public: Movilidad pública; Heat LT DHN: Calefacción para distritos centralizados; Loss DHN: Pérdidas de redes de calefacción urbana; Heat LT Dec: Calefacción para distritos descentralizados; Freight: Transporte; Non- energy demand: demanda no energética; Elec demand: Demanda eléctrica; Curt: Cortes de energía; Exp & Loss: Exportaciones y pérdidas; Ind Heat Demand: Demanda de calefacción industrial; Mob priv: Movilidad privada; Space cooling: Aire acondicionado; Process cooling: Procesos de refrigeración.

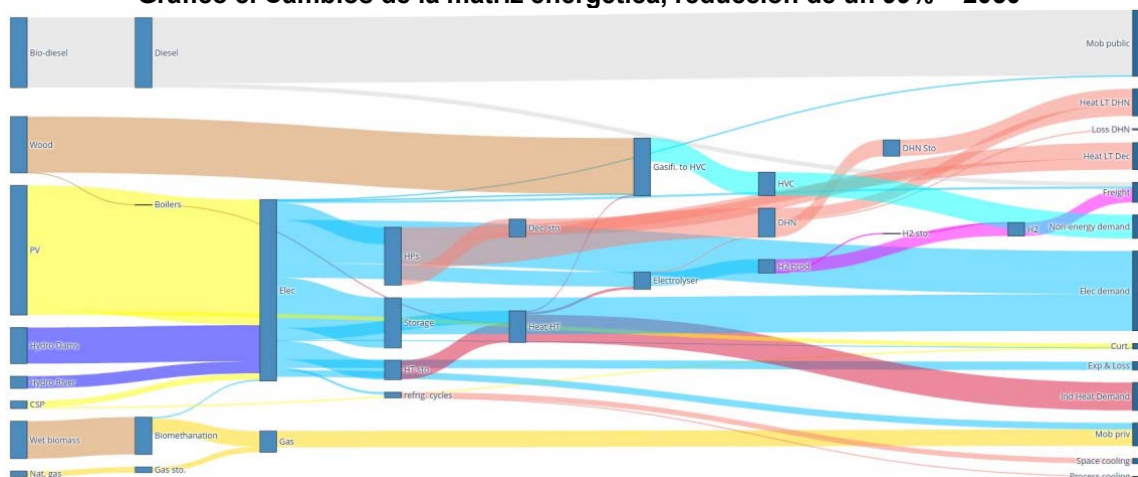
Cálculos realizados con el modelo *EnergyScope*.

Escenario 3

El tercer escenario simulado parte de los escenarios previamente mencionados, pero impone una restricción exigente como es la reducción a 2050 del 99% de las emisiones del sistema energético. Ante esta demanda, se hace imprescindible aprovechar al máximo el potencial de las fuentes no convencionales de energías renovables, como se observa en el Gráfico 8.

En este contexto, la energía fotovoltaica emerge como una solución clave, continuando su importancia en la matriz eléctrica, destinándose no solo a abastecer la demanda eléctrica industrial, sino también a satisfacer necesidades residenciales, calefacción en distritos centralizados y descentralizados, así como a la producción de hidrógeno verde, un recurso crucial para impulsar la transición hacia un transporte de carga más sostenible.

Gráfico 8. Cambios de la matriz energética, reducción de un 99% – 2050



Bio-diesel: Biodiésel; Wood: Madera; PV: Fotovoltaica; Hydro dams: Presas hidroeléctricas; Hydro river: Presas de río; CSP: Energía solar concentrada; Wet biomass: Biomasa húmeda; Nat. Gas: Gas natural; Diésel: Diésel; Boilers: calderas; Biomethanation: Biometanización; Gas sto: Almacenamiento de gas; Elec: Electricidad; Gas: Gas; HPs: Bombas de calefacción; Storage: Almacenamiento; HT sto: Almacenamiento de calefacción; Dec sto: Almacenamiento descentralizado; Heat HT: Bombas de calefacción; Refrig. cycles: Ciclos de refrigeración; Gasif to HVC: Gasificación para químicos de alto valor; Electrolyser: Electrolizador; HVC: Productos químicos de alto valor; DHN: Redes de calefacción urbana; H2 prod: Producción de hidrógeno verde; DHN

Sto: Almacenamiento para redes de calefacción urbana; H2 sto: Almacenamiento de hidrógeno verde; H2: Hidrógeno verde; Mob public: Movilidad pública; Heat LT DHN: Calefacción para distritos centralizados; Loss DHN: Pérdidas de redes de calefacción urbana; Heat LT Dec: Calefacción para distritos descentralizados; Freight: Transporte; Non- energy demand: demanda no energética; Elec demand: Demanda eléctrica; Curt: Cortes de energía; Exp & Loss: Exportaciones y pérdidas; Ind Heat Demand: Demanda de calefacción industrial; Mob priv: Movilidad privada; Space cooling: Aire acondicionado; Process cooling: Procesos de refrigeración.

Cálculos realizados con el modelo *EnergyScope*.

Para completar el panorama del transporte, una parte del transporte de carga se busca abastecer de energía eléctrica y biodiesel, mientras que la movilidad pública se orienta principalmente hacia el uso de biodiesel. En el sector de la movilidad privada, aunque una parte significativa (30%) se nutre de la matriz eléctrica, el resto (70%) se abastece con gas. Es importante destacar que este gas no será de origen natural, sino que provendrá del proceso de biometanización de la biomasa disponible en el país.

Este escenario subraya la importancia de una transformación profunda del sistema energético hacia fuentes más limpias y sostenibles: las energías renovables y la biometanización se erigen como pilares fundamentales para alcanzar una reducción drástica de las emisiones y avanzar hacia un futuro energético más respetuoso con el medio ambiente.

En este escenario se contempla que la inversión a realizar es de un total de 9,6% del PIB al año (5,3 puntos porcentuales adicionales del PIB al año frente al escenario BAU). En resumen, el tercer escenario simulado presenta un enfoque riguroso más estricto en la reducción de emisiones del sistema energético. Se destaca el papel fundamental de las fuentes no convencionales de energías renovables para cumplir con esta exigencia, especialmente la energía fotovoltaica y el proceso de biometanización de biomasa. La integración de estas tecnologías en la matriz eléctrica y en el sector del transporte refleja un compromiso con la sostenibilidad ambiental y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles. Este enfoque representa un paso significativo hacia un futuro energético más limpio y respetuoso con el medio ambiente.

Beneficios y retos económicos de la transición energética

La transición energética es un reto global. En Colombia, esta transición presenta oportunidades clave para transformar su economía, pero también implica desafíos importantes, especialmente considerando su dependencia histórica en hidrocarburos.

Aunque, como se ha visto anteriormente, la inversión inicial en energías renovables puede ser muy elevada, a largo plazo estas tecnologías resultan más económicas y beneficiosas ecológica y socialmente. Al no requerir combustibles fósiles ni procesos complejos, los costos operativos de fuentes como la solar y la eólica serían significativamente menores. Esta reducción en los costos de generación de energía se traduciría en tarifas eléctricas más bajas para consumidores y empresas, lo que estimularía el crecimiento económico y la competitividad del país.

Uno de los principales beneficios de la transición energética sería la diversificación de la matriz energética. Al aprovechar el gran potencial de fuentes renovables como la solar y la eólica, el país reduciría drásticamente su dependencia de combustibles fósiles, limitando así su exposición a las fluctuaciones de los precios internacionales. Además, la transición energética implicaría oportunidades para el desarrollo de nuevas actividades y procesos productivos y de servicios basados en torno a energías limpias, y con una potencial inserción a cadenas de valor internacionales, promoviendo una economía más diversificada.

La región Caribe colombiana, con sus vientos constantes y alta radiación solar, se posiciona como líder para el desarrollo de energías renovables en el país. Los departamentos, primordialmente La Guajira –como el departamento con mayores ventajas relativas en el país–, y subsecuentemente Magdalena, Atlántico y Cesar ofrecen condiciones muy destacadas para la instalación y operación

de grandes parques eólicos, aprovechando la fuerza de los vientos alisios. Paralelamente, la región Andina, con su infraestructura eléctrica consolidada, resulta ideal para proyectos solares a menor escala, complementando así la oferta energética del país. En ambos casos, la abundancia de radiación e intensidad solares en departamentos como La Guajira, Cesar, Atlántico, Magdalena y Bolívar representa un potencial fotovoltaico excepcional

El sector eléctrico, en su conjunto, presenta un alto impacto sobre la economía. Ahora bien, al analizar detalladamente el sector, las energías renovables, particularmente la hidráulica, fotovoltaica y eólica, generan un valor agregado significativamente mayor por unidad de producción. Es así como al incrementar en \$100 la producción de cada uno de los sectores generadores de energía renovable (hidráulica, fotovoltaica y eólica), la economía en su conjunto crecería en \$111 para el caso de la hidráulica y \$97 para el de la fotovoltaica y eólica, respectivamente. En comparación, el sector industrial y el de la construcción presentan multiplicadores de \$91 y \$85, respectivamente, lo que evidencia el mayor potencial de las energías renovables en términos de activación de la economía del país. Resulta claro, entonces, que las tecnologías energéticas renovables demuestran una especial capacidad para estimular la economía en un contexto de transición energética.

El desarrollo y la operación de energías renovables representa una oportunidad para crear empleos de calidad y sostenibles. La construcción, operación y mantenimiento de infraestructuras energéticas limpias genera una demanda permanente de mano de obra calificada y no calificada. Al promover la formación y capacitación de la fuerza laboral local, contribuye a mejorar la empleabilidad. Los datos de la Agencia Internacional de Energía afirman que las energías renovables son una fuente de empleo más intensiva que las de los combustibles fósiles, lo que las convierte en una solución prometedora para contribuir a enfrentar, a largo plazo, los desafíos laborales del país.

La transición energética es una inversión en el futuro sostenible de Colombia. Al cumplir con los acuerdos internacionales y reducir sus emisiones, el país no solo contribuye a la salud del planeta, sino que también abre nuevas oportunidades económicas y productivas.

Ahora bien, la transición plantea un desafío financiero debido a las grandes inversiones iniciales requeridas para transformar e instalar nuevas infraestructuras y desarrollar tecnologías. En el caso de Colombia, con una economía dependiente de los ingresos provenientes de los hidrocarburos, la financiación de estas inversiones genera tensiones fiscales. Para superarlas, es necesario recurrir a diversas fuentes de financiamiento, como la creación de fondos soberanos, la promoción de alianzas público-privadas, el aprovechamiento de oportunidades rentables para el manejo de la deuda externa, la incursión a mercados internacionales de productos verdes cuando sea beneficiosa para el país, entre otros. Además, la atracción de inversión extranjera directa resulta fundamental para movilizar recursos necesarios y acelerar la transición energética.

La integración de energías renovables en la matriz energética colombiana requiere de una actualización tecnológica significativa. Las redes eléctricas actuales deben evolucionar hacia redes inteligentes capaces de gestionar la variabilidad de las fuentes renovables y optimizar el uso de la energía. Las tecnologías de almacenamiento, como las baterías, desempeñarán un papel crucial en este proceso. Sin embargo, esta transformación supone inversiones sustanciales en investigación y desarrollo, así como el despliegue de nuevas soluciones tecnológicas.

Conclusiones

La transición energética en Colombia presenta una serie de oportunidades prometedoras que pueden ser aprovechadas para impulsar un desarrollo económico sostenible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, la combinación de energía fotovoltaica con la posibilidad de incorporar centrales térmicas solares (CSP) ofrece una vía para diversificar la matriz energética del país. Esto no solo garantiza un suministro estable y confiable de energía, sino que también aprovecha eficientemente la abundante radiación solar en Colombia.

Además, la energía hidráulica presenta una oportunidad única para almacenar energía excedente y compensar la intermitencia de las fuentes renovables. Un ejemplo concreto de ello es la posibilidad

de incorporar hidroeléctricas de bombeo en el sistema energético colombiano, que pueden actuar como una especie de batería hidráulica de gran escala, proporcionando estabilidad al sistema y facilitando la integración de otras fuentes de energía renovable.

Por último, el potencial de la biomasa y su desarrollo adicional podrían traer oportunidades significativas para Colombia. La biomasa, como fuente de energía renovable derivada de materia orgánica, puede ser utilizada para generar electricidad, producir biocombustibles y calor para aplicaciones industriales y residenciales. Un ejemplo concreto es el proceso de biometanización de biomasa, que convierte los desechos orgánicos en biogás, ofreciendo una solución sostenible para la gestión de residuos y la producción de energía limpia.

Es crucial destacar la importancia de una colaboración estrecha entre el gobierno, el sector privado y la sociedad civil para aprovechar plenamente estas oportunidades. Promover la investigación y el desarrollo en tecnologías renovables, establecer incentivos fiscales y financieros para la inversión en energías limpias y fortalecer los marcos regulatorios son requisitos fundamentales. Así mismo, la creación de asociaciones público-privadas, plataformas de diálogo multipartidistas y programas de participación ciudadana en la toma de decisiones relacionadas con la energía son pilares para garantizar el éxito de la transición energética. Todo ello con el fin de que la política de transición energética se pueda erigir en una verdadera política de Estado en el país.

Para asegurar la continuidad del progreso hacia los objetivos de transición energética, es esencial establecer mecanismos de monitoreo y evaluación que permitan analizar el avance, identificar desafíos y ajustar las estrategias según sea necesario. Esto garantizará que las políticas y acciones sean adaptables y efectivas a medida que evolucionen las circunstancias y las tecnologías, asegurando así una transición energética exitosa hacia un futuro más sostenible y resiliente en Colombia.

Introducción

En el horizonte de la transición hacia una economía más sostenible, el hidrógeno verde emerge como un insumo estratégico clave en el escenario energético mundial. En Colombia, país reconocido por su riqueza en recursos naturales y su creciente demanda energética, el potencial del hidrógeno verde se presenta como una oportunidad interesante y prometedora. Esta alternativa se vislumbra como una respuesta a la necesidad de explorar fuentes energéticas más limpias y sostenibles, en contraposición a la dependencia histórica en combustibles fósiles como el petróleo y el carbón.

En este contexto, el hidrógeno verde se erige como un recurso estratégico capaz de capitalizar la abundancia de fuentes de energía renovable disponibles en el país, incluyendo la energía solar, la eólica y la hidroeléctrica. Sin embargo, su implementación no está exenta de grandes desafíos. La producción de hidrógeno verde requiere una cuidadosa consideración de factores tecnológicos y de recursos disponibles, desde la instalación de electrolizadores hasta el acceso a fuentes de agua adecuadas para el proceso de electrólisis.

En el ámbito internacional, diversas naciones han reconocido el potencial del hidrógeno verde como un componente fundamental de sus estrategias de descarbonización y transición energética. Países como Alemania, Japón y Australia han realizado inversiones significativas en investigación, desarrollo y despliegue de tecnologías relacionadas con el hidrógeno verde, impulsando la creación de un mercado global cada vez más dinámico. Sin embargo, estas iniciativas también han enfrentado desafíos, como la necesidad de reducir los costos de producción, mejorar la eficiencia de las tecnologías y garantizar la disponibilidad de infraestructura adecuada para su almacenamiento y distribución a gran escala.

Aquí se analizan, de manera detallada, las necesidades específicas para que el hidrógeno verde se pueda convertir en una oportunidad viable y sostenible para Colombia. Se examina el contexto energético actual del país, identificando tanto los retos como las oportunidades en la transición hacia una economía más sustentable. Asimismo, se explora el proceso de producción del hidrógeno verde, así como las tecnologías y los recursos necesarios para su implementación exitosa.

Además, se evalúa el potencial de producción de hidrógeno verde en Colombia, considerando la disponibilidad de recursos renovables y la infraestructura requerida para su producción y distribución a nivel nacional. Además se analizan los sectores industriales y de transporte que podrían beneficiarse del uso del hidrógeno verde, así como las oportunidades de exportación de este recurso y los beneficios que podría generar para el país.

En última instancia, se tiene como objetivo proporcionar una visión clara de las necesidades y oportunidades asociadas con el hidrógeno verde en Colombia, que pueda sentar las bases para su desarrollo como una alternativa energética viable y sostenible en el país, contribuyendo así a la construcción de un futuro más limpio ambientalmente y próspero.

Contexto energético en Colombia

En la evolución de la estructura energética colombiana, se ha evidenciado la relevancia del sector energético como motor del desarrollo económico en distintos sectores del país. En primer lugar, el sector del transporte emergió como el principal consumidor de energía, representando el 39.5% del consumo total de energía en el país, en el cual la principal participación proviene del transporte por carretera, tanto de pasajeros como de carga, con lo cual se sustenta una marcada dependencia de los combustibles fósiles, especialmente derivados del petróleo. A pesar de las tendencias globales

hacia la diversificación de la movilidad, Colombia aún enfrenta desafíos significativos en la reducción de su huella de carbono en este ámbito.

En segundo lugar, el sector industrial ha llegado a participar con el 25.2% del consumo total de energía en el 2021. El uso de los energéticos en el sector industrial se ha concentrado en el uso del calor para las calderas, concentrándose en el gas natural líquido y el carbón como los energéticos predominantes. Aunque la industria colombiana presenta una menor demanda de energía eléctrica en comparación con otras regiones del mundo, la necesidad de una transformación hacia fuentes más sostenibles resulta evidente, no solo por razones ambientales, sino también de seguridad energética.

En tercer lugar, el sector residencial alcanzó el 19.3% del consumo final de energía en Colombia; este consumo se encuentra distribuido en las actividades cotidianas en los hogares, desde la cocción hasta el uso de electrodomésticos, que impulsaron una demanda diversificada de energía, destacándose el uso de la leña, la energía eléctrica y el gas natural. Esta diversidad refleja la necesidad de políticas y tecnologías que promuevan la eficiencia energética y la transición hacia fuentes más limpias y accesibles.

Ahora bien, en cuanto a la oferta energética y su transformación, Colombia ha demostrado una notable diversificación, aunque aún depende en gran medida de los combustibles fósiles. Si bien la generación de electricidad se basa principalmente en fuentes hidroeléctricas, el transporte, la movilidad y la industria muestran una alta dependencia de recursos no renovables. Esta dicotomía subraya la urgencia de avanzar hacia una matriz energética más limpia y diversificada.

En este contexto, el potencial de fuentes no convencionales de energía renovable cobra una importancia significativa. Desde la biomasa hasta la energía solar y eólica, Colombia tiene la oportunidad de aprovechar sus recursos naturales para impulsar una transición hacia una economía más verde y sostenible. Es así como la biomasa ofrece un recurso valioso para reducir las emisiones de carbono, mientras que la hidroelectricidad sirve para aprovechar el abundante recurso hídrico del país. Además, la energía solar y eólica emergen como opciones prometedoras para diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. La generación diversificada también se presenta como una alternativa para descentralizar la producción de energía y mejorar la resiliencia del sistema eléctrico.

Es por esto por lo que Colombia se encuentra en una encrucijada energética interesante ya que, si bien enfrenta desafíos significativos en términos de consumo y producción de energía, también tiene la oportunidad de liderar la transición hacia un futuro más sostenible y resiliente. Esto requerirá no solo inversiones y políticas gubernamentales sólidas, sino también un compromiso colectivo para promover la eficiencia energética y la adopción de fuentes renovables de energía en todos los sectores de la economía.

El hidrógeno verde como fuente de energía estratégica

La producción de hidrógeno verde a partir de fuentes renovables se presenta como una opción prometedora en la búsqueda de una economía más sostenible y libre de carbono. Su producción se basa en la electrólisis del agua, un proceso que separa las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno utilizando electricidad renovable, como la solar o la eólica. A continuación, se detallan algunos de los fundamentos clave de la producción de hidrógeno verde

La electrólisis del agua es un proceso fundamental en la producción de hidrógeno verde, como combustible limpio y sostenible clave en la transición hacia una economía baja en carbono. Este proceso, que utiliza electricidad renovable para descomponer el agua en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno, requiere condiciones específicas y etapas bien definidas para garantizar su eficiencia y seguridad. Para llevar a cabo la electrólisis del agua, es esencial contar con una fuente confiable de electricidad renovable; esta electricidad alimenta el electrolizador, el dispositivo central utilizado en el proceso.

Durante la operación de la electrólisis del agua, se aplican corrientes eléctricas al electrolizador, lo que provoca la descomposición de las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. Estos gases pueden ser recolectados y purificados para su uso posterior como combustible o en otros procesos industriales. Adicionalmente, es importante mantener condiciones óptimas durante el proceso de electrólisis para garantizar una alta eficiencia y seguridad. Aunque se lleva a cabo típicamente a temperaturas moderadas y presiones atmosféricas comunes, las condiciones específicas pueden variar según el tipo de electrolizador y el diseño del sistema como en la electrólisis de agua a alta presión para producir hidrógeno, la cual puede ser beneficiosa para aumentar la solubilidad de los gases producidos, facilitando su recolección.

La electrólisis del agua es el proceso esencial en la producción de hidrógeno verde, aprovechando la electricidad renovable para generar un combustible limpio y sostenible; sin embargo, el poder explotar este potencial también requiere cumplir con ciertos requisitos y condiciones, específicamente en el desarrollo tecnológico y la sostenibilidad de la matriz eléctrica.

El hidrógeno en el mundo

El panorama energético global está experimentando un notable cambio a medida que el mundo se esfuerza por combatir el cambio climático y mejorar la seguridad energética mediante la transición a fuentes de energía más limpias y sostenibles. En este contexto, el hidrógeno de bajas emisiones (o hidrógeno verde) ha surgido como un combustible importante para descarbonizar sectores en los que las emisiones son difíciles de reducir. La reciente crisis energética global también ha dado más ímpetu a este tipo de hidrógeno como medio para fortalecer la seguridad energética. Como resultado, los gobiernos han reforzado sus compromisos para lograr emisiones netas cero, y el hidrógeno se ha convertido en una parte integral de sus planes. Además, algunas economías importantes han adoptado recientemente nuevas estrategias industriales con base en tecnologías de hidrógeno como elemento clave. Sin embargo, a pesar de este impulso, todavía existen desafíos significativos que deben abordarse para desbloquear el potencial del hidrógeno de bajas emisiones.

Reporte de la *Coalición de Importación de Hidrógeno (CIH)*

Durante los últimos años se ha observado un creciente papel del hidrógeno en la transición energética, con despliegue de estrategias nacionales y regionales, y un interés creciente de las empresas en el hidrógeno verde. Es por esto por lo que el informe presentado por la *Coalición de Importación de Hidrógeno (CIH)* resulta fundamental.

En cuanto a la CIH, vale la pena destacar que es una iniciativa multinacional que reunió la experiencia industrial para investigar la importación de energía renovable mediante moléculas portadoras de hidrógeno. Estas moléculas también se espera que desempeñen un papel fundamental en la transición hacia la neutralidad de carbono de muchos usuarios finales, como el transporte marítimo y la aviación, y como materia prima para los clústeres industriales nacionales, en combinación con el carbono circular.

El análisis que presenta abarca toda la cadena de valor, desde la producción de energía renovable, la electrólisis y la síntesis en moléculas portadoras de hidrógeno, hasta el envío, el almacenamiento y el uso final en Bélgica. El caso de Bélgica es relevante para identificar los requerimientos mínimos para participar en este tipo de negocio puesto que se encuentra en una posición ideal para liderar el desarrollo de la economía del hidrógeno verde, con su bien desarrollada red de oleoductos que conecta estados vecinos, infraestructuras portuarias y terminales, clústeres industriales y una sólida base de clientes.

Este análisis resulta fundamental para entender el comportamiento de este energético en la Unión Europea, donde se vislumbra que las moléculas renovables importadas se convertirán en una parte vital de la matriz energética de la región, especialmente en el contexto de la meta de lograr la carbono neutralidad para 2050.

A su vez, la comercialización de energía renovable procedente de la energía eólica y solar será necesaria para complementar la producción local de electricidad renovable en términos de seguridad de suministro, estabilidad y flexibilidad. Por último, las dinámicas del mercado serán las que determinen el equilibrio óptimo entre la producción nacional, las importaciones y una eventual disponibilidad para exportar.

Ahora bien, antes de contemplar una estructura a largo plazo, es esencial comprender las condiciones iniciales. Estas condiciones iniciales implican procesos de electrólisis que se sustenten en la generación de energía limpia, como la energía solar, eólica o hidroeléctrica. No obstante, esta generación debe ser lo suficientemente amplia para reducir los costos y hacer rentable tanto la producción como el consumo interno en una etapa inicial, antes de considerar la posibilidad de exportación.

Supuestos fundamentales para el mercado del hidrógeno

Además de lo anteriormente mencionado, se deben abordar las condiciones técnicas necesarias para que el hidrógeno producido pueda ser clasificado como "verde", y que resulte rentable y beneficioso para el país de producción, aparte de las condiciones que debe cumplir el sistema en su conjunto y así garantizar la sostenibilidad de las operaciones relacionadas con la producción y comercialización de este energético.

Dimensionamiento del sistema

Para hacer tangible la hipótesis de exportación de energías renovables, es fundamental entender los supuestos que se deben hacer con respecto al dimensionamiento del sistema. Para el momento de la transición en la que se considere debe contarse con un sistema de comercialización tanto de energía renovable que respalde la transición energética como de materias primas (las cuales deberían tener una magnitud del orden de miles de Teravatios – hora (TWh) de energía por año), lo que está en el mismo orden de magnitud que los objetivos locales de energía renovable. Incluso a mediano plazo, la comercialización de energía renovable estará en una escala que supera los límites actuales de lo que existe hoy en día. Esta gran magnitud viene acompañada de importantes economías de escala, lo cual es crucial si se quiere lograr una implementación rentable de la cadena de suministro.

En esta dinámica, los flujos energéticos deben ser suficientes para cubrir la demanda nacional de energía y también generar un excedente, el cual pueda ser comercializado, bien sea como hidrógeno o como electricidad. Sin embargo, en el caso que el dimensionamiento del sistema no sea suficiente para cumplir la demanda, no se considera en una primera instancia que sea factible comercializarlo, y que en caso de que se quiera utilizar en la matriz energética interna, deberá ser importado.

Seguridad del sistema de suministro

Es fundamental diseñar una cadena de suministro que sea absolutamente segura en su abastecimiento y capaz de satisfacer la demanda en todo momento. Dada la naturaleza intermitente de las fuentes de energía primaria, como la solar, la eólica y en menor medida la hidráulica, se debe calibrar el amortiguamiento adecuado para permitir un suministro base de una sola fuente. Por lo tanto, cada área de suministro único debería incorporar un cierto factor de sobredimensionamiento de energías renovables, almacenamiento de energía en baterías para optimizar la operación del electrolizador y la operación de síntesis (por ejemplo, la síntesis de Haber – Bosch en el caso del amoníaco), además de almacenamiento de hidrógeno, para permitir la optimización de la síntesis de portadores. Estos elementos, junto con el almacenamiento en barcos, terminales y oleoductos, garantizarían un rendimiento confiable del transporte de hidrógeno desde cada ubicación de

exportación. Este enfoque sólido pero conservador crea confianza y asegura una estimación de costos conservadora en el caso del suministro de energía base (dejando aparte los beneficios adicionales, en lugar de incorporarlos en el modelo sobre la base de configuraciones de sistemas externos y oportunidades que aún son inciertas). La suposición del diseño de carga base asegura que la energía renovable importada de moléculas pueda considerarse inequívocamente como totalmente adicional a las fuentes de energía renovable existentes.

Fuente de carbono

Para la producción a gran escala de portadores de metanol y metano, se necesita carbono en grandes cantidades. Es evidente que, en un sistema de energía y materia prima neutro en carbono, la fuente de carbono también debería ser completamente circular. Por lo tanto, los costos de basar en la captura atmosférica de CO₂ (Captura Directa de Aire o DAC) como la principal fuente futura de carbono. En cuanto a los precios, se asume que el DAC alcanzará la paridad con los precios actuales de captura de fuente puntual, es decir, 80€/tonelada de CO₂. Para fines de sensibilidad de modelado, también se ha tenido en cuenta un escenario en el que el costo del DAC se mantendría en un nivel de 160€/tonelada de CO₂.

Potencial de producción de hidrógeno en Colombia

El hidrógeno de bajas emisiones emerge como un combustible importante en la transición gradual y equitativa hacia una economía carbono neutral. Su capacidad para reemplazar progresivamente los combustibles fósiles en sectores donde su sustitución es compleja y su potencial para desarrollar una nueva cadena de valor, desde el avance del conocimiento hasta la implementación industrial de tecnologías renovables y CCUS, le asignan al hidrógeno un papel crucial en la transición energética. El primer paso en este proceso implica promover una producción competitiva de hidrógeno, aprovechando los variados y abundantes recursos naturales del país, tanto para la producción de hidrógeno azul como verde.

Producción de hidrógeno azul

El hidrógeno gris se produce a partir del proceso de reformación o gasificación de hidrocarburos, al cual, cuando se le aplica un proceso de captura de CO₂ lo convierte en hidrógeno azul. Colombia, con abundantes recursos fósiles como el carbón, puede producir hidrógeno azul. Se espera que los costos del hidrógeno azul se mantengan estables debido a la reducción de los costos de captura de CO₂, mientras que los costos del hidrógeno gris aumentarán debido al impacto de los crecientes costos de las emisiones de CO₂. Para fomentar el uso del hidrógeno azul, se necesitan tanto incentivos como precios elevados del CO₂. El gobierno colombiano planea implementar diferentes mecanismos, como el comercio de emisiones y la creación de incentivos para tecnologías CCUS. Además, se debe adelantar infraestructura para capturar y almacenar CO₂, priorizando la adaptación de infraestructuras existentes en industrias como la minera y petrolera. La producción de hidrógeno azul permitiría la descarbonización temprana de ciertas industrias y garantizaría el suministro a largo plazo en todas las regiones con recursos fósiles en Colombia. Esto representa una alternativa de bajas emisiones para los sectores mineros y gasistas, aprovechando el *know – how* de la industria colombiana y sirviendo como base para la expansión hacia el hidrógeno verde.

Producción de hidrógeno verde

El hidrógeno verde, generado a partir de energías renovables, puede ser impulsado en el país mediante la electrólisis con electricidad renovable para reducir las emisiones. Estos proyectos no solo contribuirían a la reducción de emisiones, sino que también podrían disminuir los costos en tecnologías renovables, especialmente en energía solar y eólica. Han sido identificadas áreas con alto potencial eólico y solar, como La Guajira y algunas regiones del Caribe y los Andes. La selección de estas zonas permitiría reducir costos en el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde hasta en un 25%, lo cual podría posicionar a Colombia como un actor importante en el mercado global de hidrógeno. La energía de red podría complementar la producción renovable, aprovechando los recursos hídricos del país. Además, se debe explorar el potencial de las centrales hidroeléctricas en la producción de hidrógeno verde. Por último, se ha de considerar la combinación de tecnologías renovables, como la geotermia y la biomasa, para aprovechar sinergias en regiones con estos recursos disponibles.

¿Cómo estructurar un entorno para el hidrógeno en Colombia?

El hidrógeno emerge como una pieza central en el camino de Colombia hacia la neutralidad de carbono para 2050, con un enfoque claro en el hidrógeno de bajas emisiones y el hidrógeno verde. Estas formas de energía se presentan como alternativas cruciales en sectores donde la electrificación no es factible, proporcionando un impulso significativo hacia una economía más limpia y sostenible. El desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno no solo posicionaría a Colombia como un actor relevante en el mercado global, sino que también promovería la generación de empleo y la activación económica, especialmente en áreas impactadas por la transición energética.

El compromiso del Gobierno se refleja en la creación de marcos regulatorios e incentivos para estimular la industria del hidrógeno y en la planificación estratégica de infraestructuras necesarias para su implementación. Además, en la búsqueda activa de la participación y el compromiso de las comunidades locales en este proceso, garantizando que sus necesidades y capacidades sean debidamente consideradas, y promoviendo así un desarrollo inclusivo y equitativo en las regiones del país.

Oportunidades de exportación del hidrógeno

Colombia, dados sus abundantes recursos renovables, tiene el potencial para posicionarse como un protagonista en el mercado internacional del hidrógeno, especialmente en un rol como agente exportador del hidrógeno de bajas emisiones, bien sea verde o azul; este potencial es complementado por la ubicación del país, con lo cual pueden desarrollarse *hubs* logísticos en las costas, tanto en el norte como en el occidente del país, donde se darían condiciones de distribución que permitan suplir la demanda de las tres regiones que se consideran claves con un potencial de demanda importante de hidrógeno: Asia, la Unión Europea y los Estados Unidos.

Para materializar que estos potenciales de producción puedan generar divisas a través de las exportaciones han de aplicarse políticas activas relacionadas con infraestructura portuaria y acuerdos bilaterales con los países importadores para consolidarse como un actor clave en el mercado mundial del hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados.

Tomando en cuenta estas consideraciones, a través del modelo *EnergyScope* se realizó un ejercicio para entender cuáles serían las condiciones necesarias para que Colombia pudiera exportar hidrógeno verde (o de bajas emisiones) y otros tipos de *e-fuels* (metano, amoníaco o metanol). Sin embargo, era necesario indagar cómo afectaría esta opción al escenario de transición energético de cero emisiones netas en 2050. En este contexto, se asume el precio de venta de los *e-fuels* en los mercados internacionales calculado por la CIH, basado en el costo nivelado de producción de *e-fuels* en Chile, observándose que este precio de venta resulta notablemente bajo en comparación con el costo de producción en Colombia.

Ahora bien, si se impone la exigencia de exportaciones de energía en el modelo *EnergyScope*, este prioriza las exportaciones de electricidad a países vecinos, en contraposición a la exportación de *e-fuels* a países de otros continentes e incluso América del Norte.

La primera conclusión se deriva de la actual relación entre el precio de producción en el país y el precio de venta en los mercados internacionales. En términos generales, la exportación no sería rentable en los mercados internacionales, ya que los ingresos potenciales no cubrirían los costos asociados con la instalación y operación del sistema de producción. Sin embargo, hacia el futuro se esperaría que el precio tanto de producción como el de venta aumenten gradualmente. Se estima que un incremento del precio internacional de venta en un 25% podría hacer rentable la exportación en Colombia. *EnergyScope*, en este escenario, prioriza las exportaciones de *e-fuels* en un orden específico: en primer lugar, el hidrógeno verde, seguido del metano, el amoníaco, y finalmente el metanol, estos últimos en su forma sintética.

En este contexto, es fundamental considerar dos aspectos clave del proceso. En primer lugar, la generación de electricidad para los electrolizadores debe provenir de fuentes limpias, lo que requiere una capacidad mínima de 50 GW para que puedan funcionar eficientemente. Además, se estima un consumo de agua dulce de aproximadamente 200 mil toneladas al año para el funcionamiento de los electrolizadores. A pesar de que estas condiciones aumentan el costo total del sistema energético, los ingresos generados por las exportaciones de *e-fuels* podría llegar a compensar este incremento, dejando un resultado neto igual al planteado al inicio. Por lo tanto, para generar aún más ingresos y asegurar la rentabilidad a largo plazo, es crucial seguir desarrollando las condiciones necesarias para consolidar una industria de *e-fuels* rentable y sostenible en Colombia.

En resumen, Colombia tiene el potencial de convertirse en un actor destacado en el mercado mundial del hidrógeno, especialmente como exportador de hidrógeno verde y otros *e-fuels*, gracias a sus recursos renovables y su ubicación estratégica. Aunque el precio actual de venta en los mercados internacionales es desfavorable, un aumento progresivo en el precio de venta, junto con políticas que promuevan la generación limpia de electricidad y el acceso adecuado a recursos hídricos, podría hacer que la exportación llegue a ser rentable en el futuro. Para aprovechar este potencial y garantizar la rentabilidad a largo plazo, es crucial seguir desarrollando las condiciones necesarias para consolidar una industria de *e-fuels* sostenible en Colombia.

Conclusiones

La producción de hidrógeno verde presenta una gran oportunidad para Colombia en su camino hacia una economía más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, para aprovechar al máximo esta oportunidad, es esencial establecer condiciones favorables que satisfagan algunos requisitos fundamentales. En primer lugar, es crucial garantizar que la electricidad utilizada en la producción de hidrógeno provenga exclusivamente de fuentes limpias y renovables, como la energía solar, eólica e hidroeléctrica. Esto implica un claro compromiso con el desarrollo de estas fuentes de energía para garantizar un suministro confiable y sostenible.

En segundo lugar, se destaca la importancia de gestionar de manera responsable el uso del agua, un recurso cada vez más escaso. Dado el volumen significativo de agua requerido para producir hidrógeno verde, es esencial implementar medidas efectivas de conservación y gestión del agua. Esto incluye la adopción de tecnologías y prácticas que minimicen el consumo de agua y maximicen su reutilización, así como el establecimiento de políticas que promuevan una gestión sostenible de los recursos hídricos.

En tercer lugar, es necesario desarrollar una infraestructura adecuada para la producción, almacenamiento y distribución eficiente de hidrógeno verde a nivel nacional e internacional. Esto implica la planificación y construcción de instalaciones y redes que faciliten el transporte seguro y confiable de este recurso energético, así como la implementación de estándares y protocolos para garantizar su calidad y compatibilidad con los sistemas existentes. Se destaca la importancia de la

colaboración entre el sector público y privado para impulsar el desarrollo de infraestructuras y asegurar el éxito a largo plazo de la industria del hidrógeno verde en Colombia.

El hidrógeno verde ofrece una oportunidad significativa para transformar el panorama energético colombiano y contribuir a la mitigación del cambio climático a nivel global. Sin embargo, su adecuada realización depende de la creación de un entorno propicio que aborde desafíos y requisitos cruciales como los identificados en este documento. Con el compromiso y la colaboración de diversos actores públicos y privados, así como de las comunidades implicadas y la sociedad en general, Colombia estaría en una posición destacada para convertirse en un líder regional en la producción y exportación de hidrógeno verde, promoviendo así un futuro más limpio, sostenible y próspero.

Introducción

En el debate sobre cómo llevar a cabo una transformación energética hacia fuentes renovables se tiene consenso de reducir la dependencia de los hidrocarburos como fuente para la generación de energía, reemplazándola por fuentes más amigables con el medio ambiente (fotovoltaica, eólica, biomasa, etcétera). Ahora bien, la reducción en la producción de los sectores petrolero y carbonífero como política plantea conocer cuáles pueden ser las consecuencias a nivel económico y social de este tipo de política. Para esto se realiza una evaluación *ex ante* del impacto, a nivel agregado, que tendría esta clase de reducción sobre la economía colombiana, y algunas alternativas de política económica para la mitigación de estos efectos. Así, se hace necesario analizar cuáles pueden ser los efectos de la implementación de políticas orientadas hacia una transición baja en carbono, en aras de conocer cómo puede verse afectada la economía colombiana.

En este capítulo se presenta un análisis de los efectos de este tipo de políticas a nivel macroeconómico. A diferencia de otros análisis ya realizados en este sentido (Bernal *et al.*, 2022, y Godin *et al.*, 2023), en los que solo se considera la restricción económica, sin tener en cuenta los cambios en la matriz energética, aquí se hace una integración entre un modelo energético (*EnergyScope*) y un modelo macroeconómico (GEMMES), para tener en cuenta los efectos de retroalimentación entre la transición energética y las variables macroeconómicas.

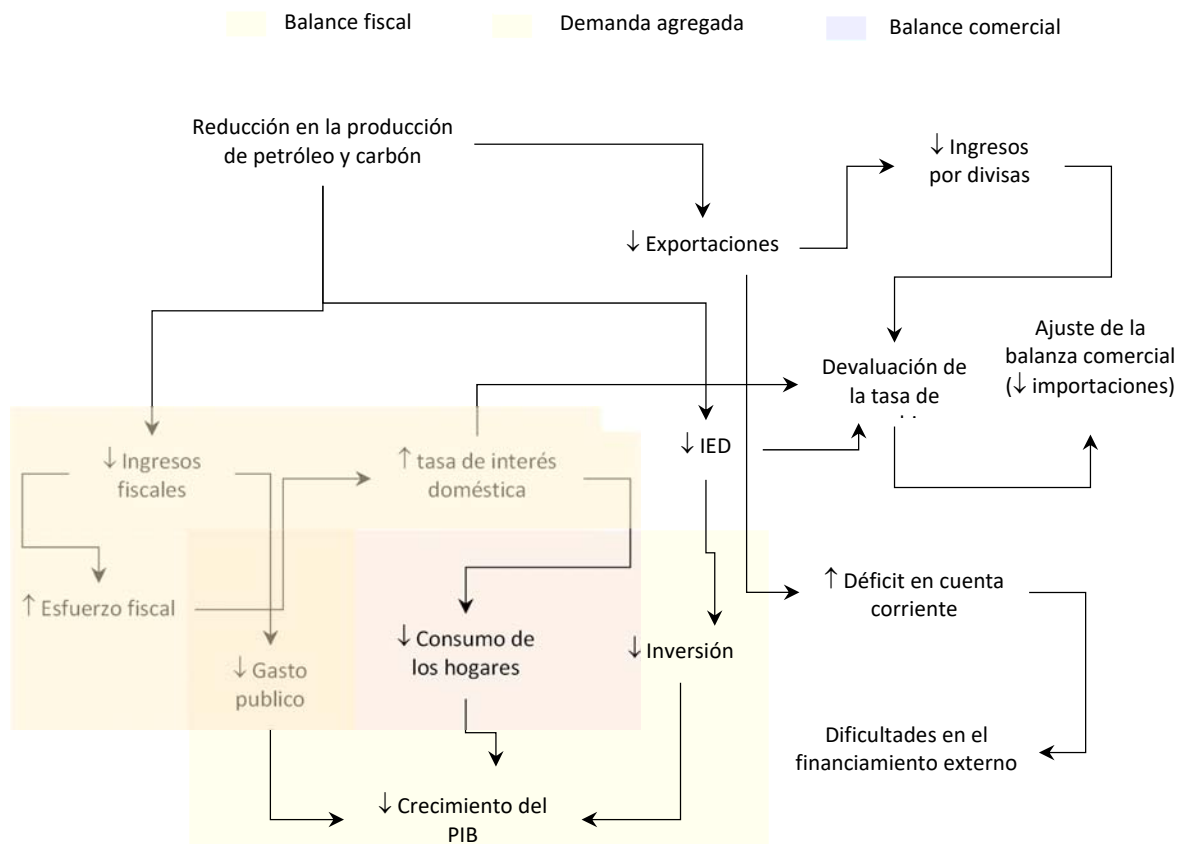
Aquí se identifican tres canales por medio de los cuales esta política puede afectar el crecimiento de la economía: i) un canal de balance comercial y de pagos, ii) un canal de balance fiscal y iii) un canal de demanda agregada. A través de estos canales se afectan directamente algunas variables macro (por ejemplo, la inversión, el consumo, los ingresos fiscales, la inflación, las exportaciones y el tipo de cambio real) o indirectamente otras (por ejemplo, la deuda pública y la demanda agregada). Además, se generan otros impactos provenientes de la retroalimentación entre estas variables, como consecuencia del cambio en la matriz energética hacia generación de energía sustentable medioambientalmente. De esta manera, se pueden identificar los mecanismos de transmisión de la transición energética, e identificar cuáles pueden ser los distintos desequilibrios macro y micro, así como cuellos de botella, ante este tipo de choques en la economía, además de evaluar eventuales alternativas de política para mitigarlos.

Efectos macroeconómicos

Antes de proseguir, es importante considerar el papel del sector petrolero y carbonífero en la economía colombiana, para comprender la racionalidad de los impactos simulados por la reducción de la producción petrolera y carbonífera. En los últimos diez años los sectores de carbón y petróleo, en su conjunto: i) no han representado una proporción elevada del valor agregado del país, ya que esta participación ha sido solamente del 6,4%, de acuerdo con cifras del DANE, ii) han sido muy decisivos en términos de exportaciones, dado que han participado con el 56,2% de las exportaciones totales, en promedio, constituyéndose en una fuente importante de ingresos en divisas para la economía, y iii) atraen un importante flujo de ingresos en divisas por medio de la Inversión Extranjera Directa (IED), con una participación promedio del 34,9% en el total de IED en el país.

Para llevar a cabo el análisis sobre los impactos macro del cambio de la matriz energética de Colombia, se consideran los tres canales de transmisión mencionados: i) un canal de balance comercial y de pagos, ii) un canal de balance fiscal y iii) un canal de demanda agregada (Ilustración 1).

Ilustración 1. Canales de transmisión de la política



Fuente: Elaboración de los autores.

El primer canal consiste en el balance comercial, asociado a una baja en las exportaciones de petróleo y carbón ante una reducción paulatina en su producción, lo cual lleva a que las divisas generadas disminuyan en correspondencia. Además, se afectan negativamente los flujos de inversión extranjera directa, ya que las inversiones originalmente previstas para la exploración y explotación no pueden ser realizadas en su totalidad, lo que lleva a una disminución en la inversión agregada de la economía. Esto, en conjunto, crea presiones sobre la tasa de cambio (una devaluación del peso), encareciendo las compras en el exterior, lo que, *ceteris paribus*, conduce a una reducción de las importaciones de la economía. Adicionalmente, se produce un incremento en el déficit de cuenta corriente, lo que puede generar dificultades para el financiamiento externo del gobierno y la economía en su conjunto. Lo cual está en concordancia con los resultados de Bernal *et al.* (2022) y Godin *et al.* (2023), que ilustran cómo el déficit generado en cuenta corriente hace que el gobierno enfrente una restricción para su financiamiento y a unas mayores tasas de interés domésticas y/o externas.

El segundo canal es a través del balance fiscal. Ante la reducción paulatina de los sectores de carbón y petróleo, se produce una disminución de los ingresos del gobierno, vía impuestos, dividendos de Ecopetrol y regalías, los dos primeros a nivel nacional, y el tercero, particularmente, a nivel local. Esto se traduce en un mayor esfuerzo fiscal para la consecución de ingresos para mantener el déficit fiscal previsto, que puede hacerse por medio de mayor esfuerzo tributario, o una disminución del gasto público y/o a través de incremento de la deuda pública. En el último caso, como se mencionó a propósito del canal del balance comercial, se enfrentan restricciones ante un mayor déficit en cuenta corriente de la balanza de pagos, por lo que se debe recurrir al mercado interno de deuda, ejerciendo presiones al alza sobre la tasa de interés doméstica, y de esta manera encareciéndose el endeudamiento público.

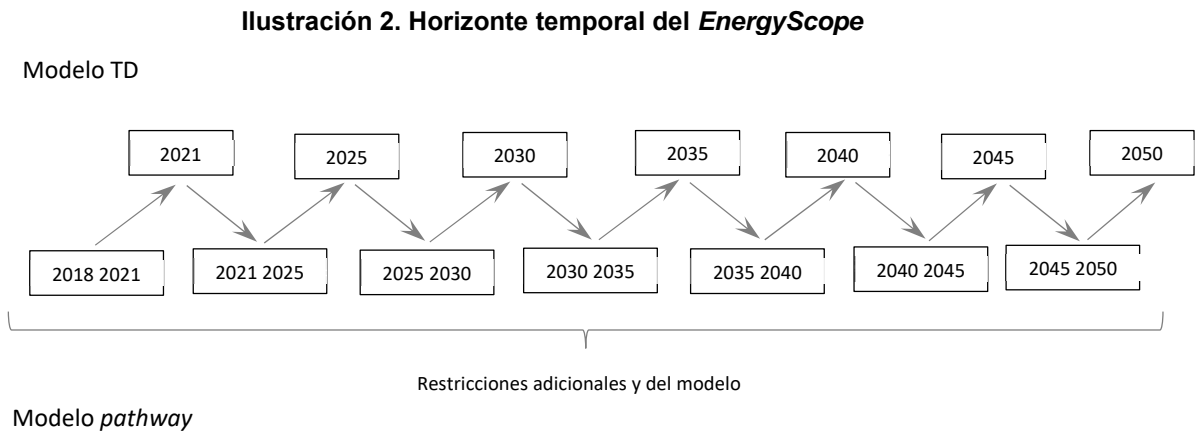
Finalmente, se considera un tercer canal que se da a través de la demanda agregada. Como se evidenció anteriormente, la reducción paulatina de la producción de los sectores minero-energéticos afecta directamente la inversión, en especial vía la menor inversión extranjera directa. Una disminución en la inversión afectaría el crecimiento de la economía en el largo plazo. Ello, como consecuencia de menores expectativas de inversión por parte de empresas extranjeras en el país, especialmente en el sector petrolero. Esto, en conjunto con una reducción en el consumo, dada el aumento en las tasas de interés y una probable reducción en el gasto público, en caso de que la consecución de nuevos ingresos no sea posible, contribuye a una disminución en el crecimiento del PIB.

Interacción entre el modelo EnergyScope y GEMMES

Modelo EnergyScope

Los modelos energéticos pueden clasificarse en dos tipos: simulación y optimización. Los modelos de simulación intentan predecir el comportamiento de un sistema bajo condiciones específicas, mientras que los de optimización busca la mejor configuración entre múltiples opciones. Aunque la optimización es computacionalmente más exigente, su capacidad para explorar diversas alternativas de política la hace ideal para sistemas con alta incertidumbre, como los sistemas energéticos. El modelo *EnergyScope* es una herramienta para modelar y analizar sistemas energéticos a nivel regional o nacional, del tipo optimización. Aquí es utilizado para simular diferentes escenarios y evaluar el impacto de tecnologías renovables sobre la matriz energética nacional.

Este modelo tiene dos aproximaciones según el horizonte temporal: el modelo *EnergyScope Typical Day* (TD)²⁹, cuyo horizonte de tiempo es de un año y no tiene en cuenta la trayectoria desde un sistema energético existente hacia un objetivo a largo plazo. A diferencia, la versión *EnergyScope Pathway*³⁰ extiende el horizonte temporal a quinquenios, décadas, etcétera, y tiene en cuenta la trayectoria de transición desde del sistema energético existente hacia uno objetivo a largo plazo (Ilustración 2).



una trayectoria de descarbonización para alinear la generación de energía con los objetivos de mitigación del cambio climático, en consonancia con el crecimiento de la economía y las dinámicas poblacionales.

Para las simulaciones aquí presentadas, se considera un horizonte temporal hasta el año 2050, a menos que se diga lo contrario, el cual se divide en quinquenios, para la realización de ajustes en las variables exógenas. Esto facilita involucrar diferentes choques, como cambio tecnológico o reducción en costos porque una tecnología evoluciona con mayor rapidez que la esperada, cambios en los objetivos de política energética, como mayor o menor énfasis en la inversión de alguna fuente de energía renovable, o incluso cambios en las trayectorias de descarbonización de la economía.

Modelo GEMMES

Los modelos *Stock Flow Consistent* (SFC) se fundamentan en tres preceptos: i) “Todo viene de un lugar y va para otro lugar”, lo cual se garantiza por el uso de la hoja de balance mediante una matriz de flujos y transacciones para el sector real y financiero; ii) el sector financiero y el real están integrados, esto es dada la no neutralidad del dinero, se modela de forma explícita la conexión entre las variables reales y financieras, y iii) las ecuaciones de comportamiento tienen fundamentos heterodoxos. En este caso se utiliza el modelo GEMMES desarrollado por Godin y Yilmaz (2020), el cual se ha adaptado para la economía colombiana. Recientemente, los modelos SFC se han utilizado para examinar el impacto del cambio climático en los desarrollos macro financieros globales y la estabilidad macroeconómica (Dafermos *et al.*, 2017, 2018; Bovari *et al.*, 2018), así como las implicaciones económicas de las rápidas transiciones energéticas (Jacques *et al.*, 2023).

Estos modelos son adecuados para examinar los desequilibrios externos y la susceptibilidad de un país a las crisis financieras, así como los canales macroeconómicos que puede propagar la pérdida inicial de las exportaciones de combustibles fósiles. Esto se debe al hecho de que el modelo no solo monitorea los desequilibrios de la cuenta corriente y los efectos negativos de primera ronda de una transición global en la balanza comercial, sino también la exposición bruta a los riesgos financieros externos, que típicamente se pasan por alto al evaluar los desequilibrios externos. Si bien el nivel de inversión extranjera es asumido como variable exógena, la dinámica de las reservas de divisas es una variable endógena en el modelo. Además, la estructura del modelo facilita el análisis de cómo riesgos financieros se distribuyen a través de la acumulación de deuda externa en los balances de todos los sectores institucionales en una economía. El modelo también permite efectos de retroalimentación detallados, como los efectos de los precios a través de la evolución de las tasas de interés y los efectos de cantidad, como el racionamiento de la cantidad en el mercado de divisas y el endeudamiento general de la economía.

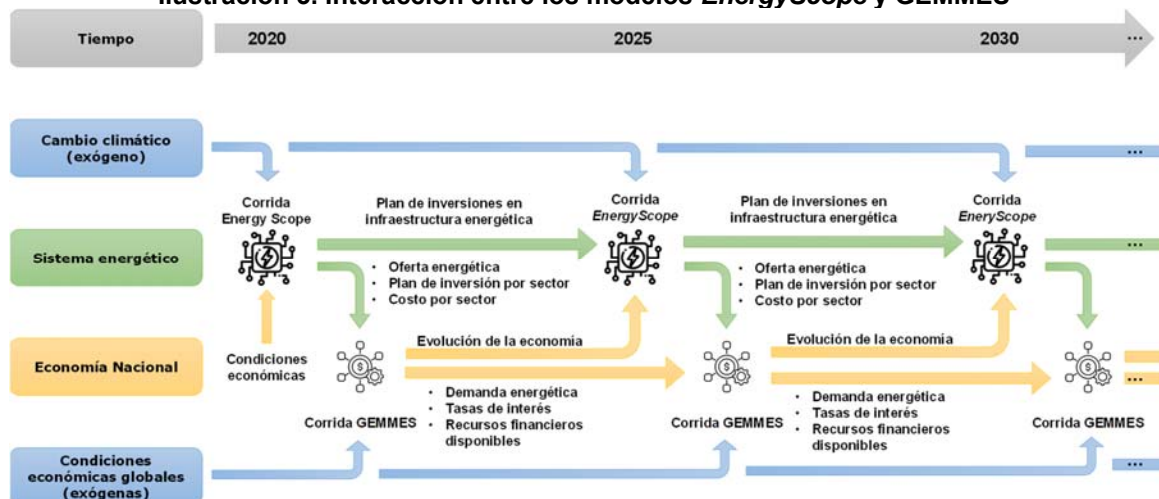
Interacción entre el modelo energético y macroeconómico

En la Ilustración 3 se presenta la interacción entre los modelos *EnergyScope* y GEMMES. Desde el modelo energético se obtiene cuál sería la mejor matriz energética dada las restricciones de tecnología, de la generación energética dadas por el plan de inversiones de la infraestructura energética, las condiciones económicas, y la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, que es la *proxy* de transición energética.

En el primer periodo, las condiciones económicas, del modelo energético, provienen de la calibración inicial del modelo GEMMES. A partir de allí con el plan de inversiones para el sector energético, se obtiene la mejor combinación de fuentes de generación de energía, dada una reducción objetivo de los gases efecto invernadero, lo cual provee las inversiones necesarias para llevar a cabo este plan. Estas inversiones, son involucradas en el modelo GEMMES, con lo que se puede especificar qué tan sostenible es la financiación de las nuevas inversiones, con base en los requerimientos financieros (tasas de interés, deuda, inversión, etcétera). Aquí hay que mencionar, que existe la posibilidad que el modelo macroeconómico, muestre que la financiación no es sostenible, por lo cual

se debe de modificar el plan de inversiones en el modelo energético. Las condiciones económicas obtenidas por el modelo macroeconómico, particularmente el crecimiento de la economía, son involucradas en el modelo energético para obtener una nueva matriz energética, en el siguiente periodo (quinquenio, en este caso), y así sucesivamente hasta el año 2050.

Ilustración 3. Interacción entre los modelos *EnergyScope* y GEMMES



Fuente: Elaboración de los autores.

Simulaciones y resultados

Se consideran diferentes escenarios que priorizan la velocidad de la transición energética y la utilización de políticas para mitigar efectos no deseados de la transición energética. El primer escenario que se considera es el escenario base (BAU, por sus siglas en inglés), con base en el PEN, para el modelo energético, y el marco fiscal de mediano plazo, para el modelo macroeconómico, priorizando la eficiencia en costos y el suministro de energía para satisfacer la proyectada demanda a 2050, sin considerar políticas activas de reducción de emisiones de GEI. Se asume en la estructura de financiación que el 50 % proviene del sector privado, un 10 % adicional de Inversión Extranjera Directa³¹, la cual juega un papel muy importante, y el 40 % restante del sector público.

Ante una política activa de reducción de gases efecto invernadero, hay que considerar que la reducción de la producción petrolera y carbonífera en el corto y mediano plazo puede generar importantes retos para el crecimiento de la economía del país, así como para la estabilidad fiscal y de balanza de pagos, como lo han mostrado Bernal *et al.* (2022), Godin *et al.* (2023) y Piraquive *et al.* (2023). Se consideran tres escenarios para mostrar los efectos sobre las condiciones macroeconómicas. En todos se asume se impone una restricción de reducción de las emisiones de gases efecto invernadero del 99% para el sistema energético en tres diferentes horizontes de tiempo. Ante esta demanda, se hace imprescindible aprovechar al máximo el potencial de las fuentes no convencionales de energías renovables. Sin embargo, el cumplimiento de llegar a la meta tiene un horizonte temporal diferente: para el primer escenario, rápida transición energética, se asume que el cumplimiento de la meta es en 2040; para el escenario, transición energética media, se espera el

³¹ Cabe destacar que, en 2023, la IED total en Colombia ascendió a US\$17.446 millones, un 1,5% más que en 2022, siendo un 65,6% destinado a sectores no mineros. En 2022 la IED representó un 5% del PIB, uno de los niveles más altos del presente siglo (similar a 2016 y solo superado por el 7% en 2005).

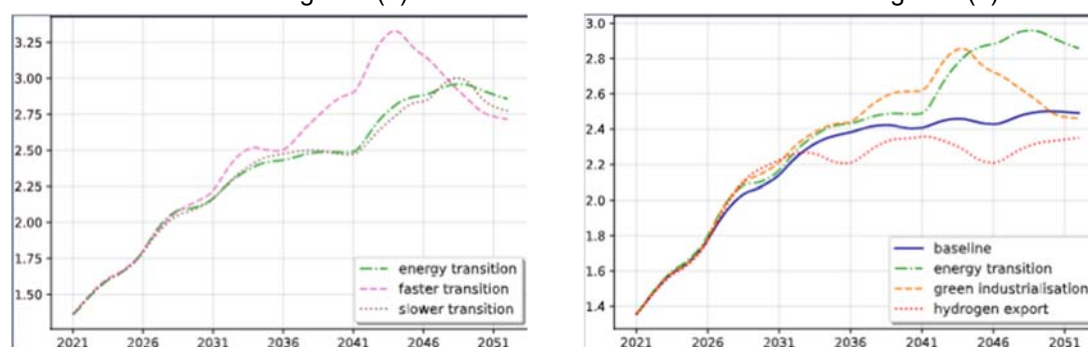
cumplimiento de la meta en 2050, y finalmente, para el tercer escenario, transición energética lenta, el cumplimiento de la meta es en 2070.

Los escenarios de transición energética tienden a mostrar una reducción de las divisas, lo que trae como consecuencia presiones sobre el financiamiento del gobierno y una desaceleración del crecimiento de la economía, por lo cual es necesario tomar medidas para mitigarlas, al menos parcialmente, avanzando necesariamente hacia la diversificación de la economía para reducir la dependencia del petróleo y el carbón de la economía colombiana. En este sentido, se analizan dos escenarios. El primer escenario, de industrialización verde, en el que se considera un desarrollo de los sectores agrícola y de turismo, bajo un patrón sostenible con el medio ambiente, así como el aprovechamiento de las nuevas tecnologías que surjan con el incremento de las energías renovables. En un segundo escenario, se considera, de manera puntual, las exportaciones de hidrógeno, como nueva fuente de energía renovable. Gracias a sus vastos recursos renovables, Colombia está en posición de convertirse en un líder global en el mercado del hidrógeno. Su ubicación estratégica permite desarrollar centros logísticos costeros que faciliten la exportación de hidrógeno bajo en emisiones a Asia, Europa e incluso Estados Unidos.

Un efecto de la transición energética, consecuente con una reducción de la producción de los sectores de hidrocarburos, es la devaluación de la tasa de cambio nominal ante una reducción de las divisas por venta de exportaciones (Gráfico 1). Si se quisiera adelantar la fecha de cumplimiento de la meta de cero neto emisiones, sería aún mayor la tasa de devaluación, que en los escenarios de transición energética media y lenta, que son relativamente similares entre sí, excepto en el último quinquenio del periodo de transición a 2050, que resulta inferior para el caso de la transición lenta.

Ahora bien, si se toman escenarios con la aplicación de políticas activas alternativas, se observa, por ejemplo, cómo el impulso de las exportaciones de hidrógeno verde conllevaría menores tasas de devaluación, como consecuencia del papel de exportaciones de parte de la producción de hidrógeno. También hay que mencionar que sin este tipo de políticas (escenario de transición energética media), la devaluación sustancialmente mayor desde mediados de los 30s y persistente en el resto del periodo de transición (Gráfico 1b).

Gráfico 1. Efectos sobre la tasa de cambio nominal
Según la velocidad de la transición energética (a) Según las políticas activas de transición energética (b)



Cálculos con base en la integración del modelo *EnergyScope* y *GEMMES*.

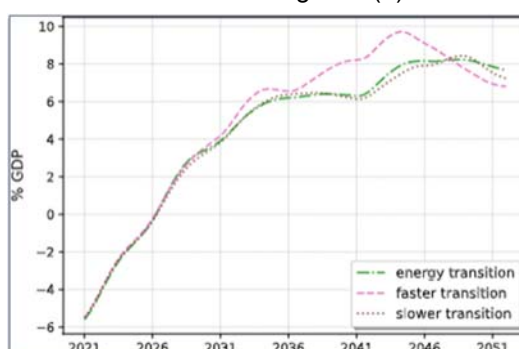
Esta devaluación de la tasa de cambio trae como consecuencia una realineación de la balanza de pagos (esto es, ante menores exportaciones y, por ende, una mayor devaluación), las importaciones se reducen a tal punto que se generan superávits en la balanza de pagos desde el primer quinquenio de transición, acentuándose el superávit especialmente desde la mitad del segundo decenio de transición hasta el último quinquenio para el escenario de transición rápida, al punto que incluso llega

a ser menor respecto a los de los otros dos escenarios de transición (Gráfico 2a). En este punto es de resaltar que el ajuste se realiza fundamentalmente en la reducción de importaciones, sin que haya mayores incrementos de exportaciones ni de la IED hacia el país.

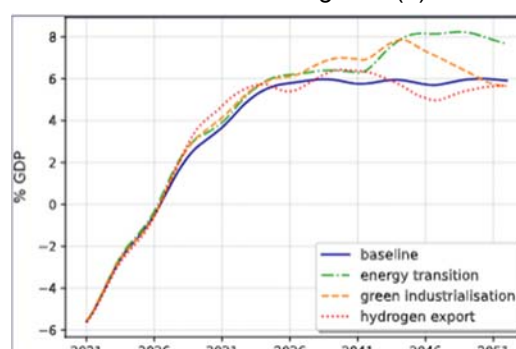
En un escenario como el de impulso a la producción y a las exportaciones de hidrógeno verde, solamente en los últimos años del periodo de transición su superávit de balanza de pagos se acercaría al observado en un escenario de industrialización verde, a pesar de que lo superaría sustancialmente a partir del cuarto quinquenio del periodo de transición (Gráfico 2b).

Gráfico 2. Efectos sobre la balanza de pagos

Según la velocidad de la transición energética (a)



Según las políticas activas de transición energética (b)



Cálculos con base en la integración del modelo *EnergyScope* y GEMMES.

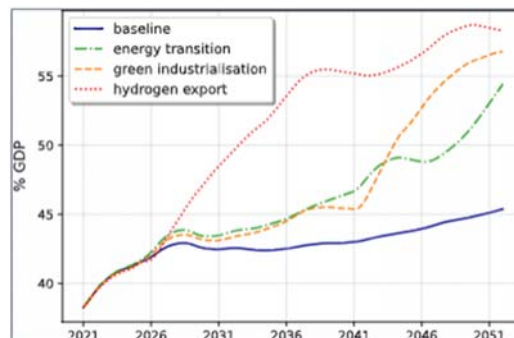
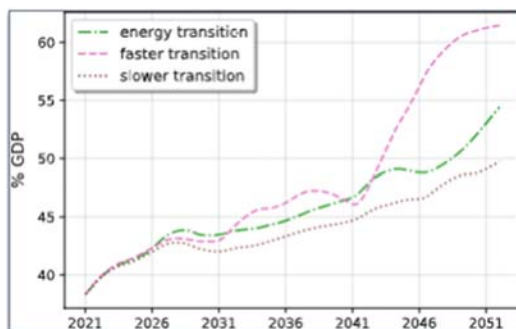
Adicionalmente, a las presiones en el sector externo, el gobierno puede enfrentar problemas en la financiación de sus gastos, a causa de los menores ingresos por la caída de las utilidades de Ecopetrol, de regalías y de impuestos pagados por las empresas de hidrocarburos. Luego para mantener el mismo ritmo del gasto público se debe recurrir tanto al financiamiento interno como externo, con lo que la deuda aumenta. Este incremento en la deuda se agudiza con la mayor velocidad de la transición, en la medida que hacia 2050 la relación deuda total a PIB superaría en un 30% la del escenario de transición rápida respecto a de la transición lenta (Gráfico 3a).

Ahora bien, en el caso de las exportaciones de hidrógeno verde, el incremento de la deuda total observada tiene un componente adicional, ya que muchas de las tecnologías y de los bienes de capital y materias primas requeridos para la producción del hidrógeno verde no son producidos en el país, sino que deben ser importados, lo mismo, pero en menor grado, para el caso de la industrialización verde (Gráfico 3b). En este caso, no se asume sino una baja proporción de inversión privada extranjera, por lo que una mayor intensidad de IED reduciría la presión sobre la deuda del país.

Gráfico 3. Efectos sobre la deuda total de Colombia

Según la velocidad de la transición energética (a)

Según las políticas activas de transición energética (b)



Cálculos con base en la integración del modelo *EnergyScope* y GEMMES.

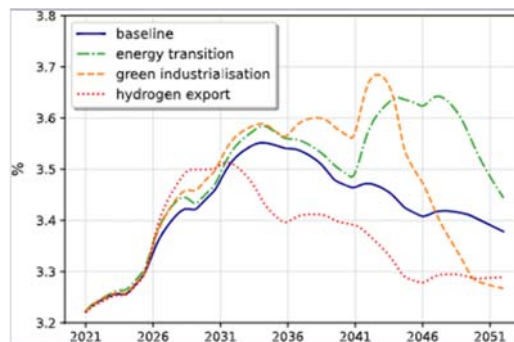
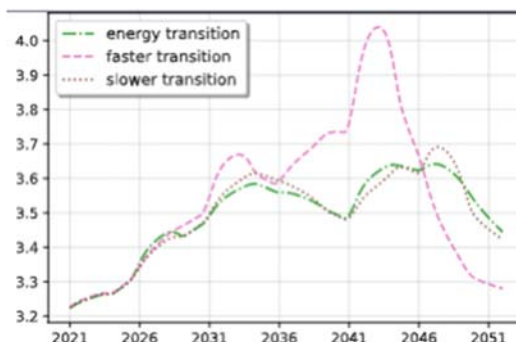
La presión sobre la deuda del gobierno se ve reflejada en los intereses que debe pagar el gobierno para adquirir recursos de crédito. Como se puede observar en el Gráfico 4a, entre más rápida la transición, mayor la subida de la tasa de interés de bonos del gobierno durante el periodo de transición, a excepción del último quinquenio, con una drástica caída que la sitúa incluso muy por debajo de la correspondiente a los escenarios de transición lenta y media (en cerca de 0,15 puntos porcentuales).

Ahora bien, en el escenario de exportaciones de hidrógeno verde, los efectos sobre la tasa de interés son relativamente menores a lo largo del periodo de transición (incluso menores relativamente que las correspondientes al escenario de industrialización verde) porque los acreedores pueden apreciar que el país puede respaldar sus deudas tanto en pesos como en divisas extranjeras (Gráfico 4b).

Gráfico 4. Efectos sobre la tasa de interés de los bonos del gobierno

Según la velocidad de la transición energética (a)

Según las políticas activas de transición energética (b)



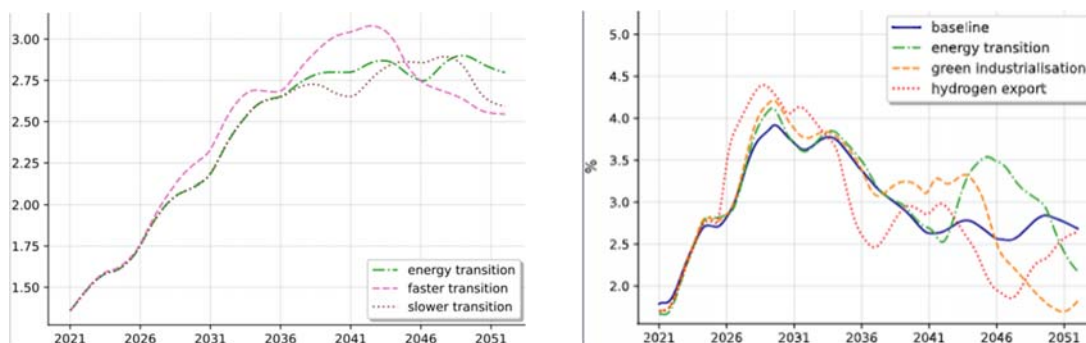
Cálculos con base en la integración del modelo *EnergyScope* y GEMMES.

En conjunto, todos estos efectos se ven reflejados en el crecimiento de la economía. Como se observa en el Gráfico 5a, aunque la tasa de crecimiento del PIB es un poco mayor con una rápida transición, hacia el final del periodo de transición se equipara con la del escenario de transición lenta. En el caso de la aplicación de diversas políticas activas, se tiene que la evolución de la economía, aunque puede sufrir una mayor volatilidad que en el caso de que no se apliquen, la evolución de la tasa de crecimiento económico observa un patrón relativamente similar entre desarrollo de la exportación de hidrógeno e industrialización verde (Gráfico 5b).

Gráfico 5. Efectos sobre el crecimiento del PIB

Según la velocidad de la transición energética (a)

Según las políticas activas de transición energética (b)



Cálculos con base en la integración del modelo *EnergyScope* y GEMMES.

Con el objetivo de transformar la matriz energética, Colombia debe emprender una serie de inversiones importantes en el sector para tener mayor participación de energías renovables, mejorar las redes de transmisión y distribución, desarrollar capacidades tecnológicas en almacenamiento de energía, y promover usos finales más eficientes y limpios. Ahora bien, este esfuerzo no se limita únicamente al sector energético; a la par se debe transformar la estructura económica del país para la adopción de estas tecnologías y llevar a cabo una diversificación de las exportaciones, para dejar la dependencia del sector de hidrocarburos. Este punto es crucial, ya que la generación de divisas provenientes de una canasta exportadora sólida y diversificada es un insumo fundamental para respaldar las importaciones de tecnología, maquinaria, insumos y bienes de capital indispensables para llevar adelante la transición energética. Si el país no crea nuevas fuentes de ingresos de divisas con mayores exportaciones y/o entradas de capital, extender el plazo de la transición energética (veinte o treinta años, por ejemplo) aliviará o postergará los ajustes sobre el financiamiento y sobre el crecimiento de largo plazo, pero no los evitará.

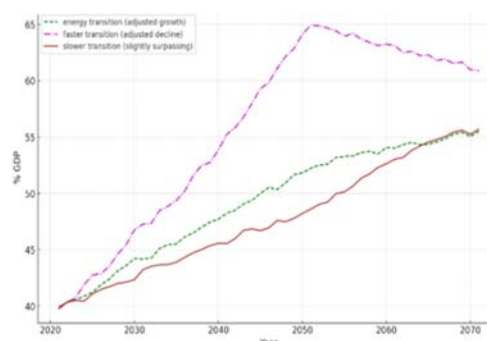
Como se observa en el Gráfico 6a, en el escenario de transición rápida la tasa de interés de los bonos de gobierno descendería en los últimos años del periodo, específicamente a partir de los años 2047-2048, para ubicarse por primera vez desde 2052 progresivamente por debajo de las tasas para los escenarios de transición lenta y media, hasta alcanzar un diferencial de hasta 0,35 puntos porcentuales hacia el año 2070. Similarmente, la deuda total con respecto al PIB comienza a descender progresivamente a partir del año 2052 para el escenario de transición rápida, en tanto que continúa aumentando para los escenarios de transición media y lenta, al punto que su diferencial de 13-16 puntos porcentuales en 2052 a cerca de 9-10 puntos hacia 2070 (Gráfico 6b).

Gráfico 6. Extensión de la transición energética

Tasa de interés de los bonos del gobierno (a)



Deuda de Colombia (b)



Cálculos con base en la integración del modelo *EnergyScope* y GEMMES.

Asegurar un flujo estable de divisas no es solamente un factor técnico; es un requisito estratégico para el financiamiento de la transición. La arquitectura financiera para soportar la transición (inversión pública y privada, nacional y extranjera) demanda un entorno de confianza y credibilidad. Los inversionistas nacionales e internacionales buscan asegurarse que el país pueda generar los ingresos externos suficientes para solventar sus obligaciones de pago de la deuda, adquirir los bienes intermedios y finales necesarios, y mantener una balanza de pagos sana. Así se reduciría el costo de financiación del país, y se facilitaría el financiamiento de la transición energética.

Alcanzar una economía descarbonizada y sostenible al 2050 exige una visión de largo alcance, incluso más allá de este hito temporal. Si el país logra transformar la estructura productiva y consolidar un sector exportador robusto capaz de generar divisas estables, la transición será más sostenible y financiable. Por el contrario, postergar las decisiones sin atender las causas estructurales de la poca diversificación productiva y exportadora podría resultar en un agravamiento de las condiciones financieras y de la dependencia externa, que pondría en riesgo la misma transición energética.

La diversificación del aparato productivo es, por ende, una condición *sine qua non*. La transición energética exige insumos de alta tecnología, componentes especializados, maquinaria avanzada, conocimiento y patentes que no siempre estarán disponibles en el mercado interno. Para la consecución de estos insumos y tecnologías se necesita divisas. Así, la consolidación de nuevos sectores exportadores (tecnologías limpias, agroindustria de alto valor, servicios de conocimiento, manufacturas sofisticadas, entre otros) permitirá no solo sustituir las exportaciones de hidrocarburos, sino ampliar la capacidad del país de adquirir aquellos bienes finales e intermedios que no se producen localmente.

En las fases iniciales de la transición energética, el Estado colombiano debe asumir un rol protagónico. Debe crear condiciones habilitantes que generen certidumbre, credibilidad y estímulos para la inversión privada y extranjera. Los proyectos de infraestructura en energías renovables y modernización de las redes eléctricas, inversiones en investigación y desarrollo, y el establecimiento de regulaciones claras y estables, son medidas que el sector público debe liderar desde el principio. Al actuar diligentemente en estas etapas críticas, se envía una señal inequívoca de su compromiso con la transición, lo que, a su vez, impulsa la confianza en los mercados internacionales, facilita el acceso a financiamiento a menores tasas de interés y contribuye a la formación de expectativas positivas que promuevan el ingreso de capital privado.

Este esfuerzo público inicial es fundamental para que el sector privado tome decisiones de inversión, tanto del sector energético como de otros sectores, que involucre la transición energética. Sin la percepción de un entorno de bajo riesgo macroeconómico y de reglas de juego claras y estables, el capital privado podría mostrarse renuente, lo cual limitaría la escala y la velocidad del cambio. Una vez el sector privado nacional y extranjero se sume al proyecto, invierta capital y desarrolle actividades productivas, se incrementarán las oportunidades de generar divisas mediante nuevos emprendimientos que se orienten no solo al mercado interno, sino también a la exportación de bienes y servicios relacionados con el sector energético renovable. Así se puede consolidar un ciclo virtuoso de confianza y credibilidad.

Conclusiones

La transición hacia una economía baja en carbono va mucho más allá de los cambios en las tecnologías que implican las energías renovables, exige profundos cambios estructurales que afectarán sustancialmente a la economía y a la sociedad. El éxito o fracaso de lograr la descarbonización de la economía dependerá de cómo podrá reducir su dependencia de los sectores más intensivos en emisiones de GEI en términos de sus relaciones comerciales y de inversión con el resto del mundo, sus impactos fiscales en el sector público y sus intensidades salariales y de empleo en la economía. Al analizar la capacidad del país para adaptar su estructura productiva, se puede constatar cómo la alta dependencia con respecto al sector petrolero y carbonífero (dada la cuantiosa generación de divisas por exportaciones de estos sectores) implica un riesgo importante

en la sostenibilidad del sector externo y el financiamiento de la economía, ante una reducción de su nivel de producción ya sea por una política a nivel nacional o por la disminución de la demanda externa para el cumplimiento del Acuerdo de París.

Ahí residen las principales vulnerabilidades de la economía colombiana por tan elevada dependencia del sector externo con respecto a dichos sectores extractivos. Los canales de balanza comercial y de pagos y el de balance fiscal son los principales mecanismos de transmisión directa del choque de la caída de producción/exportación de petróleo y carbón, dadas especialmente las necesidades de financiamiento del gobierno para costear la transición energética. Además, es de resaltar que estas vulnerabilidades se acentúan a nivel departamental, ya que los departamentos intensivos en la producción de carbón y petróleo han ido construyendo su estructura productiva alrededor de estos sectores, por lo que les resulta más difícil absorber un choque de esta naturaleza.

La transición energética requiere un esfuerzo integral a nivel de políticas públicas. Esto es, las medidas tomadas en el sector energético deben estar alineadas con la política industrial, la política comercial y la política fiscal. Por ejemplo, la promoción de las energías renovables debe complementarse con una estrategia clara de inserción en cadenas globales de valor, ojalá con acuerdos comerciales que faciliten el acceso a insumos clave y con una diplomacia económica que abra espacios para la diversificación exportadora.

El papel de las instituciones es vital, ya que un entramado institucional sólido, transparente, con normativas claras y estables, reduce la incertidumbre y estimula la inversión nacional y extranjera. Un clima de negocios estable, repercute positivamente en las condiciones financieras y en la percepción del riesgo-país. Una sólida reputación en los mercados internacionales puede ser tan valiosa como las reservas de divisas, ya que reduce el costo del financiamiento, amplía las posibilidades de apalancamiento de recursos y refuerza la capacidad de la economía para importar bienes y servicios fundamentales. De otra parte, la banca multilateral, los fondos verdes y los mecanismos de cooperación internacional debieran jugar un rol determinante a la hora de canalizar recursos hacia la transición energética.

Aunque gran parte de esta argumentación ha girado en torno a consideraciones financieras, comerciales y energéticas, no se debe olvidar la dimensión social y ambiental de la transición. También es importante invertir en medidas de adaptación, protección de la biodiversidad, fortalecimiento de las comunidades locales y reducción de desigualdades. Un ambiente macroeconómico inestable e incierto no contribuye a la implementación de programas sociales y la canalización de recursos a las regiones más vulnerables. Una sociedad que percibe beneficios tangibles, en forma de empleos de calidad, mejor infraestructura, energía más limpia y accesible, y mayor prosperidad, será más propensa a apoyar la transición. Esta cohesión social es un activo inmaterial que, combinado con una posición económica sólida, brinda al país mayor margen de maniobra político y económico, facilitando así la toma de decisiones a largo plazo.

Referencias

- Bernal, J., Ojeda-Joya, J., Agudelo, C., Clavijo, F., Durana, C., Granger C., Osorio, Parra, D., Pulido, J. y Ramos, J. (2022). Impacto macroeconómico del cambio climático en Colombia. *Revista Ensayos Sobre Política Económica*, No. 102, pp. 1 – 62.
- Bovari, E., Giraud, G., and Mc Isaac, F. (2018). Coping with collapse: A stock flow consistent monetary macrodynamics of global warming. *Ecological Economics*, Vol. 147, pp. 383 – 398.
- Dafermos, Y., Nikolaidi, M., and Galanis, G. (2017). A stock flow-fund ecological macroeconomic model. *Ecological Economics*, Vol. 131, pp. 191 – 207.
- Dafermos, Y., Nikolaidi, M., and Galanis, G. (2018). Climate change, financial stability and monetary policy. *Ecological Economics*, Vol. 152, pp. 219 – 234.
- Garay, L. J., Piraquive, G. y Hernández, G. (2023). Hacia una neutralidad baja en carbono: efectos económicos y políticas de mitigación. Departamento Nacional de Planeación, *Archivos de economía*, Documento 553.
- Gauthier L, Moret, S., Jeanmart, H. and Maréchal, F. (2019) EnergyScope TD: A novel open-source model for regional energy systems. *Applied Energy*, Vol, 255, 113729.
- Gauthier L, Rixhon, X., Contino, F. and Jeanmart, H. (2024) EnergyScope Pathway: An open-source model to optimise the energy transition pathways of a regional whole-energy system. *Applied Energy*, Vol, 358, 122501.
- Godin , A., Yilmaz, D., Guevara, D. Andrade, J., Rojas, L., Barbosa, S. y Hernández, G. (2023). Can Colombia cope with a Global Low Carbon transition? AFD Research papers, No 285.
- Godin, A., and Yilmaz, S. (2020). Modelling small open developing economies in a financialized world: A stock-flow consistent prototype growth model. Agence Française de Développement. Research Paper, No 125.
- Jacques, P., Delannoy, L., Andrieu, B., Yilmaz, D., Jeanmart, H., and Godin, A. (2023). Assessing the economic consequences of an energy transition through a biophysical stock-flow consistent model. *Ecological Economics*, Vol. 209, 107832.
- Piraquive, G., Barbosa, S., Hernández, G. y Garay, L. J. (2023). Vulnerabilidades macroeconómicas de la transición energética. Departamento Nacional de Planeación, *Archivos de economía*, No 550.

En torno a las oportunidades para la economía nacional de las cadenas de valor de las energías renovables

Introducción

La producción de bienes asociados a la generación de energías renovables se encuentra altamente concentrada geográficamente y empresarialmente. De acuerdo con informes de la Agencia Internacional de Energía (IEA), las fábricas chinas concentran más del 80% de la manufactura global de turbinas eólicas, paneles solares fotovoltaicos y baterías de litio a través de no más de cinco empresas para cada producto. Es así como la cadena de producción de estos bienes se concentra en muy pocas fábricas ubicadas principalmente en algunas provincias chinas y en países del sudeste asiático. Estos últimos países son el segundo mayor productor de baterías y paneles gracias a su capacidad de manufactura para el ensamblaje de bienes finales que empresas chinas realizan en su territorio para evitar los aranceles sobre las exportaciones chinas en mercados como la Unión Europea o los Estados Unidos.

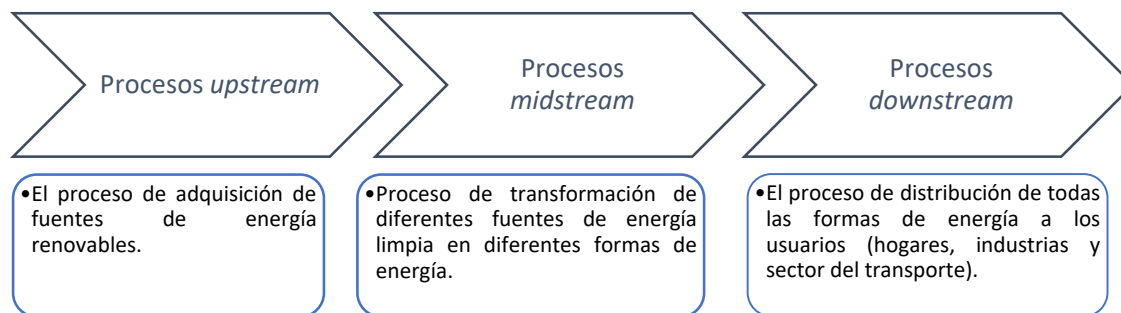
La transición a la energía limpia está provocando cambios en las cadenas de suministro globales de tecnologías energéticas, incluida la minería, la producción de materiales, la innovación y fabricación de tecnología, los sistemas de transmisión y distribución de energía. Las cadenas de valor de las energías renovables desempeñarán un papel clave en el crecimiento a largo plazo de la economía. Una dinámica participación nacional podría constituirse en una fuente para promover un crecimiento sostenible. Una de las oportunidades que trae la transición hacia energías renovables, es la de acertar en cuál(es) eslabón(es) o etapa(s) de la(s) cadena(s) internacional(es) de valor puede involucrarse creativamente el país, esto es, donde puede ser más rentable para el país producir bienes y servicios, que generen mayor valor agregado y mejor calidad de empleo, bajo estrictos estándares ambientales, para suplir tanto la cadena a nivel doméstico en el corto plazo, como a nivel regional a largo plazo. Lo que de nuevo lleva a la pregunta sobre cuáles pueden ser las apuestas productivas del país ante esta transformación de la economía. Entendiendo la importancia de la adopción por parte del país de las tecnologías para la generación de energías limpias, así como las tendencias globales para su uso, aquí se presenta un análisis de cómo pueden afectar a la economía la introducción en la cadena de valor de la energía eólica, solar fotovoltaica y las baterías de litio.

Cadenas de valor de energías renovables y nuevas tecnologías

Una cadena de valor es la serie de pasos, etapas o eslabones para producir un producto o servicio final. En el sector energético, la cadena de valor de la energía se refiere a la conversión de fuentes de energía primarias en una forma de energía utilizable y entregable para los consumidores finales –estos pueden ser hogares, industrias, o algunos productos, como los vehículos eléctricos–.

La construcción de una cadena de valor puede realizarse tomando la imagen de un río que fluye, las primeras etapas de la cadena de valor a menudo se denominan “aguas arriba” (*upstream*) de la cadena de valor, mientras que las etapas de la cadena de valor cercanos al consumidor final se denominan “aguas abajo” (*downstream*) de la cadena. Las etapas en el medio de la cadena de valor, entre aguas arriba y aguas abajo, a veces se denominan parte intermedia de la cadena de valor (*midstream*). A lo largo de la cadena se involucran las etapas anteriormente referidas (Ilustración 1).

Ilustración 1. Cadena de valor de energías renovables



Adaptado de Jelti *et al.* (2021).

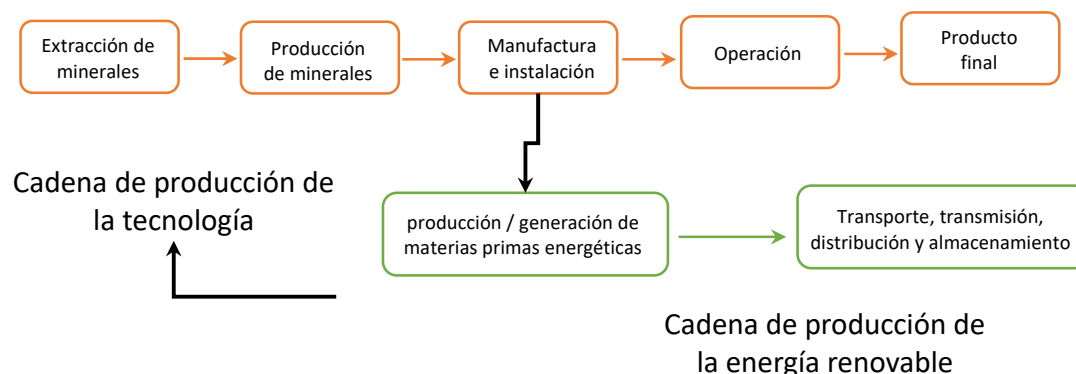
De acuerdo con Jelti *et al.* (2021), las cadenas de valor de la energía renovable se pueden definir como “la transformación de energía bruta en energía utilizable e implica un conjunto eficaz de principios de gestión desde el punto de adquisición de los recursos energéticos hasta el punto de consumo de energía utilizable” (p. 6). Las cadenas de valor pueden ser construidas con cuantos eslabones o etapas se tenga información. Por ejemplo, la cadena de valor puede ser separada en cinco etapas: adquisición, generación, transmisión, distribución y demanda, las cuales cubren todos los procesos a lo largo de la cadena de valor de la energía renovable, desde las materias primas (insumos) hasta el producto final.

De acuerdo con IEA (2023), las cadenas de valor de energía y nuevas tecnologías son interdependientes, ya que una no puede funcionar sin la otra. Producir, generar, transportar y almacenar cualquier forma de energía requiere tecnologías que deben fabricarse y ponerse a su servicio. Paralelamente, todas las diferentes etapas de la cadena de suministro de tecnología consumen energía y, por tanto, dependen de las cadenas de suministro de energía renovable.

El cambio de energías fósiles a tecnologías y combustibles menos intensivos en emisiones GEI transforma las cadenas globales de valor de energía, incluidos los tipos de recursos naturales necesarios. En particular, las tecnologías limpias dependen mucho más de minerales críticos. El problema surge en razón a que su oferta a largo plazo pareciera ser limitada, ya que en la actualidad la producción y el procesamiento de muchos de ellos están altamente concentrados en un pequeño número de países. En general, el suministro de minerales críticos está más concentrado geográficamente que el de petróleo, gas y carbón.

El suministro de componentes intermedios clave y una variedad de materias primas necesarias para la transición energética se está convirtiendo en un problema creciente, ante el hecho de que varían sustancialmente las necesidades y perspectivas de las diferentes regiones del mundo. Al mismo tiempo, existe tensión entre la búsqueda de una mayor producción local (y valor agregado local) y la necesidad de garantizar que algunos elementos clave de la cadena, como los paneles solares y las turbinas eólicas, sean asequibles en precio y calidad para fomentar su uso creciente (Ilustración 2).

Ilustración 2. Cadena de valor de energías renovables y nuevas tecnologías



Fuente: IEA (2023a).

La apuesta de los países en proyectos de energías renovables es una oportunidad que Colombia puede aprovechar a partir de su potencial mineral³², especialmente en lo relacionado con la producción de polimetálicos en los que se destacan los metales base cobre, níquel, zinc y molibdeno, dado que las actividades exploratorias que vienen desarrollando diferentes compañías mineras en el país han confirmado el potencial en estos minerales, llegando en algunos casos a niveles de recursos y en otros casos a reservas minerales.

La extracción y el procesamiento de diversos minerales y metales para diferentes tipos de equipos de energía renovable y otras tecnologías relacionadas con la transición energética, como las baterías, puede ser una de las potencialidades para la inserción en la cadena de valor de las energías renovables y las nuevas tecnologías. Sin embargo, sólo se podrán obtener beneficios en ingreso y empleo, por ejemplo, si se logra desarrollar la capacidad de procesar materias primas, superando el papel de meros productores de materias primas con una limitada generación de valor agregado y empleo, hacia la producción de productos de alto valor agregado.

Ahora bien, hay que evaluar con debido rigor los impactos ambientales de la extracción y el procesamiento de materias primas minerales, para determinar si resulta justificable en clave de sostenibilidad y resiliencia socio-ecológica. Así, por ejemplo, en el caso del aluminio, que es un material esencial para las células solares fotovoltaicas, marcos de módulos, estructuras de montaje, entre otros, su producción primaria a partir de bauxita requiere grandes cantidades de energía y genera importantes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Por tanto, habría que precisarse si una posible alternativa fuera el uso de aluminio secundario reciclado (que actualmente representa un tercio del suministro total) para reducir la intensidad de energía y de emisiones de GEI en los procesos de producción primaria (Maisch, 2022).

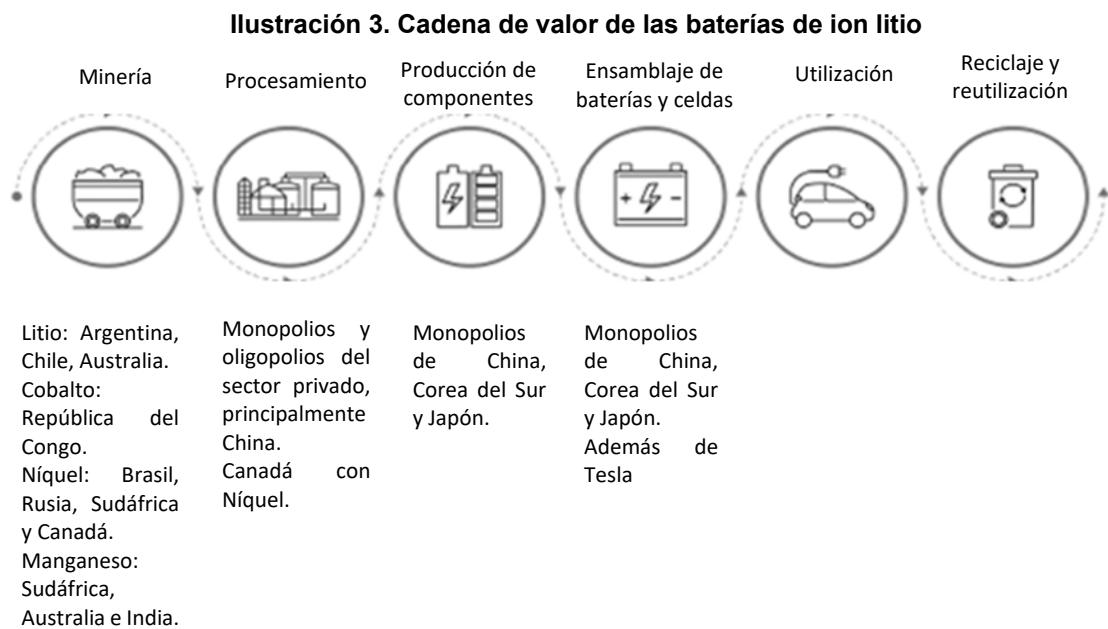
En este contexto, como lo mencionan Graulich *et al.* (2021), se pueden recuperar aproximadamente el 95 % de los materiales utilizados en la industria solar fotovoltaica y hasta el 100 % de los materiales utilizados en las baterías de iones de litio. Sin embargo, gran parte de la infraestructura de energías renovables actualmente existente no se ha diseñado teniendo en cuenta la circularidad, por lo que corre el riesgo de perder, en condición de desecho, materiales raros como el litio, el cobalto, el indio y el germanio. Razón por la cual resulta imperativo adoptar el enfoque de economía circular para reducir al máximo los desechos de materiales valiosos por razones ecológicas y además aprovechar una oportunidad para la generación de empleo. La OIT estima que un aumento de los enfoques de economía circular podría conducir a un aumento neto de seis millones de puestos de trabajo en todo el mundo en actividades como el reciclaje, la reparación y la remanufactura (ILO, 2018). Aunque se pueden perder puestos de trabajo por una menor extracción de estos materiales y su procesamiento,

³² En Colombia los minerales estratégicos o críticos son: oro, platino, cobre, aluminio, fosfato, potasio, magnesio, carbón (metalúrgico y térmico), uranio, hierro y el coltán (niobio y tantalio), los cuales están relacionados con las energías renovables.

se podrían crear muchos otros puestos de trabajo en la reutilización, la reparación, la restauración, el reciclaje y la gestión de residuos.

Cadenas de valor de las energías renovables y almacenamiento

La comprensión de la cadena de valor de las baterías es fundamental para que un país pueda desarrollar políticas públicas que fomenten la participación en esta industria estratégica. Hay muchas maneras de analizar las diferentes etapas de esta cadena. En el caso de las baterías de litio se optó por fragmentar la cadena, comenzando con la minería y el procesamiento de minerales, seguida de la producción de productos químicos para baterías. La siguiente etapa de la cadena de valor consiste en la fabricación de cátodos y ánodos, así como en las líneas de montaje de celdas, módulos y paquetes. Para luego utilizarlas en diversas aplicaciones, incluidos vehículos eléctricos (VE), sistemas de almacenamiento de energía y bienes de consumo. Finalmente, algunos de los componentes pueden ser reciclados y, posteriormente, reutilizados (Ilustración 3).

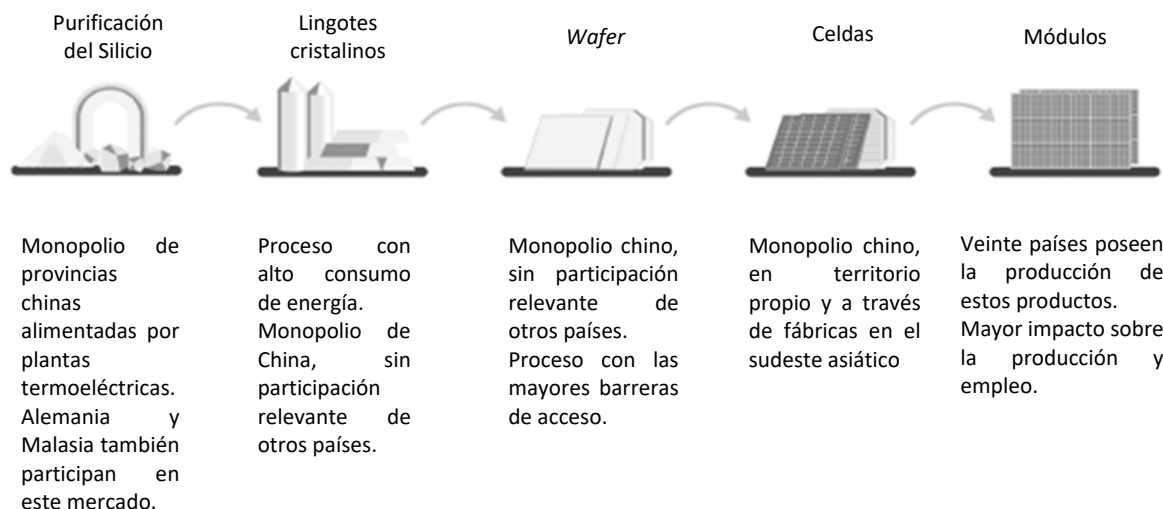


A partir de la información de IEA (2023a, 2023b) e IRENA (2019 y 2022).

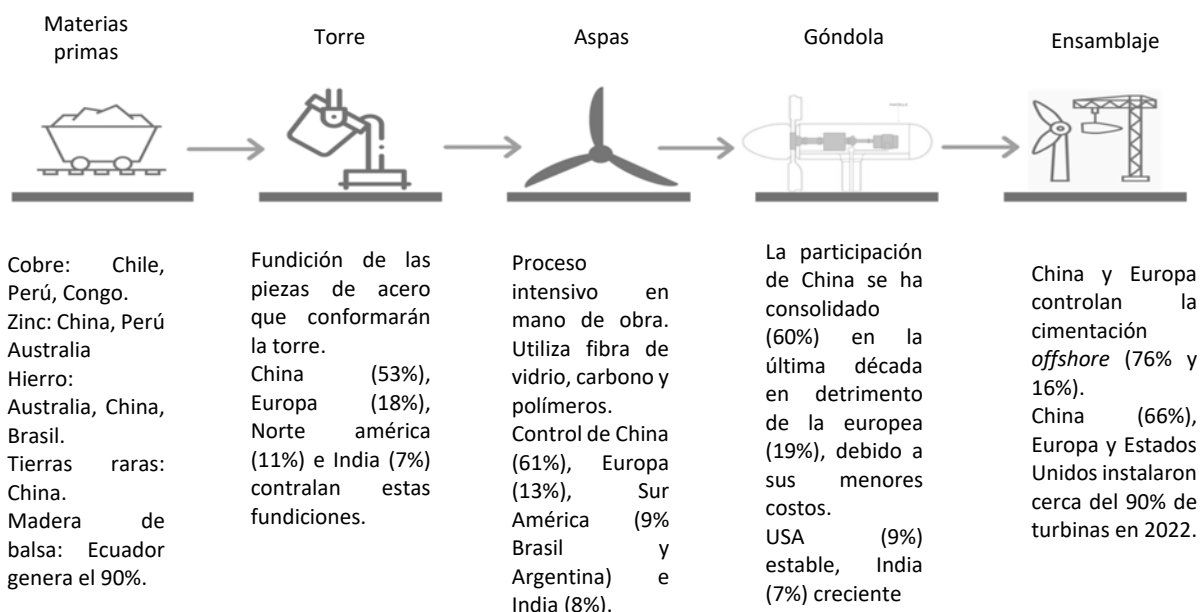
Fuente: Elaboración de los autores.

En el caso de la generación de energía fotovoltaica, se consideró la ilustración de la cadena por medio de la manufactura de los paneles solares. Se comienza con la extracción del cuarzo, la principal fuente de silicio, fundamental para la fabricación de paneles solares, el cual es purificado para obtener una estructura cristalina (policristalina) de silicio de alta pureza, que ofrece una mayor eficiencia en la conversión de energía solar en electricidad. Estos cristales de silicio se transforman en lingotes cilíndricos de gran tamaño, que son cortados en láminas delgadas y extremadamente finas, llamadas *wafers*, que son la base de las células solares. A los cuales se les añaden unas impurezas controladas (dopantes) para crear una unión, que es esencial para la generación de electricidad. Luego se les aplica una capa anti-reflectante, y se encapsulan en las celdas solares, las cuales se conectan en serie y en paralelo para formar módulos o paneles solares. Estos módulos se enmarcan en un marco de aluminio para proporcionar rigidez y protección, y se les añaden cajas de conexiones y cables para permitir su conexión a un sistema eléctrico (Ilustración 4).

Lingotes 5.44



Fuente: Elaboración de los autores.



A partir de la información de IEA (2023a, 2023b) e IRENA (2019 y 2022).

Fuente: Elaboración de los autores.

Efectos de los minerales estratégicos sobre la estructura económica

El cambio de energías fósiles a tecnologías y combustibles renovables ha transformado las cadenas globales de valor de energía, incluidos los tipos de recursos naturales necesarios para la producción de las tecnologías adecuadas para estas industrias. En particular, las tecnologías limpias dependen mucho más de los minerales estratégicos³³ que otras industrias. El problema surge de que su oferta a largo plazo pareciera ser limitada, ya que en la actualidad la producción y el procesamiento de muchos de ellos están altamente concentrados en un pequeño número de países. Entonces, el suministro de componentes intermedios clave y una variedad de materias primas necesarias para la transición energética se está convirtiendo en un problema creciente, ante el hecho de que varían sustancialmente las necesidades y perspectivas de las diferentes regiones del mundo. Al mismo tiempo, existe tensión entre la búsqueda de una mayor producción local (y valor agregado local) y la necesidad de garantizar que algunos elementos clave de la cadena, como los paneles solares y las turbinas eólicas, sean asequibles en precio y calidad para fomentar su uso creciente.

En una primera instancia se puede conocer el efecto de los minerales estratégicos sobre la economía. Como se puede apreciar en el Cuadro 1, los minerales de cobre y níquel tienen un efecto multiplicador, tanto sobre el producto como sobre el empleo. En el caso del cobre, por cada \$100 que se incremente su producción, tanto por efecto de usarse como insumo como por los insumos que utiliza para su extracción, la producción total la economía crecería \$106, mientras que para el níquel sería de \$106. En el caso del empleo, para el cobre por cada empleo contratado en el sector se crearían 2,6 empleos indirectos, mientras que para el níquel este efecto ascendería a 1,9 empleos.

Cuadro 1. Multiplicadores de los minerales estratégicos sobre la economía

Minerales	Producción	Empleo
Hierro	1,75	1,98

³³ Como lo son: litio, cobalto, níquel, manganeso, grafito, tierras raras y cobre, entre otros.

Cobre	1,87	2,61
Níquel	2,03	1,86
Otros minerales	2,06	3,46
Plata	1,34	1,26
Oro	1,34	1,26
Platino	1,33	1,25

Con base en las cuentas nacionales del DANE

Cálculos: Elaboración de los autores.

De otra parte, a modo ilustrativo, se presenta un ejercicio en el cual mediante la interacción entre los minerales estratégicos que tiene Colombia y los otros sectores, que componen la estructura económica del país, se observa cuál puede ser el efecto de generar un gigavatio de energía mediante la tecnología de paneles solares y eólica, y de almacenar un gigavatio de energía por medio de baterías de ion litio. En el Cuadro 2 se presenta la extracción de los minerales estratégicos para las energías renovables que se ha realizado en el país en el periodo 2015-2024, con base en información de la ANM, UPME y el DANE. En general, los saltos que se presentan en los datos (cromo, zinc y manganeso) corresponde a la entrada en explotación de nuevos yacimientos. Como se puede observar, los minerales con un mayor grado de explotación han sido hierro, níquel y cobre.

Cuadro 2. Extracción de minerales estratégicos (toneladas)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Cobre*	-	-	-	-	7.644	9.372	9.194	6.918	8.642	-
Níquel ¹	37.091	36.918	40.605	42.881	40.571	36.094	38.299	41.815	38.708	-
Plata ¹	14	15	15	20	16	23	31	36	52	-
Hierro ¹	902.485	715.894	712.868	575.578	667.207	787.121	750.381	497.595	652.728	-
Cromo [°]	0,145	0,09	0,03	-	60	146	-	35	-	-
Zinc [°]	-	-	-	-	-	-	-	37	25.057	29.142
Grafito [°]	-	-	-	-	135	-	-	-	-	243
Manganeso [°]	146	-	27	211	392	29	359	408	369.079	-

Los guiones (-) indican que no fue posible encontrar información.

* Información tomada de la ANM.

¹ Información tomada de la cuenta satélite de minería del DANE.

[°] información tomada de la UPME.

Elaboración de los autores.

Para obtener las toneladas necesarias de minerales estratégicos para la generación y almacenamiento se recurrió a la información de la *International Energy Agency* (IEA) para la fabricación de paneles solares, turbinas eólicas (tanto costa afuera como costa adentro) y baterías de ion litio (las más utilizadas NMC811 y LFP³⁴). Como se observa en el Cuadro 3, la mayoría de los materiales pueden ser extraídos en el país, con excepción del cobalto y litio esenciales para la producción de baterías de litio, y molibdeno y tierras raras incorporadas en la instalación de las turbinas.

Dado el alto nivel tecnológico y las limitaciones en recursos, se ha determinado que la participación en la cadena de valor de los paneles solares se centraría en el ensamblaje. Colombia posee los minerales necesarios (cobre, zinc, plata) para este proceso y la fabricación de algunas piezas

³⁴ Las baterías de iones de litio se pueden clasificar según la composición de los elementos de su cátodo. De esta manera se encuentran: las de óxido de litio con níquel, manganeso y cobalto (NMC), las de óxido de litio con níquel, cobalto y aluminio (NCA), las de fosfato de litio y hierro (LFP) y las de óxido de litio y cobalto (LCO).

complementarias. En el caso de las baterías de litio, se ha seleccionado la fabricación de cátodos como punto de entrada. Esta etapa, menos concentrada y con menores barreras de inversión, permite aprovechar los recursos minerales locales (excepto el litio). Para la energía eólica, se ha priorizado la instalación de turbinas *offshore*, dada la geografía colombiana y la disponibilidad de cobre. Esta decisión se basa en la importancia estratégica del cobre para la instalación de estas turbinas y el mayor impacto que generaría en la matriz energética nacional. En resumen, se ha optado por aquellas etapas de la cadena de valor que maximizan el aprovechamiento de los recursos locales, minimizan las barreras de entrada y generan un mayor impacto en la transición energética del país³⁵.

Cuadro 3. Minerales necesarios para la generación y almacenamiento de un megavatio de energía renovable (toneladas)

	Paneles Solares	Turbinas eólicas		Baterías de ion litio [†]	
		<i>Offshore*</i>	<i>Onshore*</i>	NMC 811	LFP
Cobalto				0,08	0,00
Cobre	2,82	8,46*	6,54*	0,29	0,43
Cromo		0,53	0,47		
Litio				0,10	0,09
Manganeso		0,78	0,76	0,08	0,00
Molibdeno		0,11	0,11		
Níquel	0,00	0,24	0,40	0,66	0,00
Plata	0,06				
Silicio	3,97				
Tierras raras		0,03	0,27		
Zinc	0,03	5,50	5,50		

* Esto es la suma de mineral de cobre necesario para la fabricación e instalación

† NMC: contienen óxido de litio con níquel, manganeso y cobalto; LFP: contienen fosfato de litio y hierro.

Información de IEA (2022a, 2022b y 2024).

Elaboración de los autores.

De otra parte, hay que considerar que adicional al aumento de la producción en los minerales estratégicos para la producción de paneles solares, turbinas eólicas y baterías de ion litio, hay otros sectores que pueden incrementar su producción, por ejemplo, al ensamblar las torres e instalar las turbinas eólicas, o en el caso del almacenamiento por los requerimientos de cableado y la instalación de transformadores, entre otros. En el Cuadro 4 se presentan los sectores afectados (de acuerdo con los sectores definidos en las cuentas nacionales), para luego involucrarlos en el choque de generación y almacenamiento de energía.

³⁵ Para consultar los requerimientos de otras fuentes de generación y almacenamiento de energías renovables, véase Zuluaga *et al.* (2023).

Cuadro 4. Sectores adicionales afectados por una mayor generación y almacenamiento de energía renovable

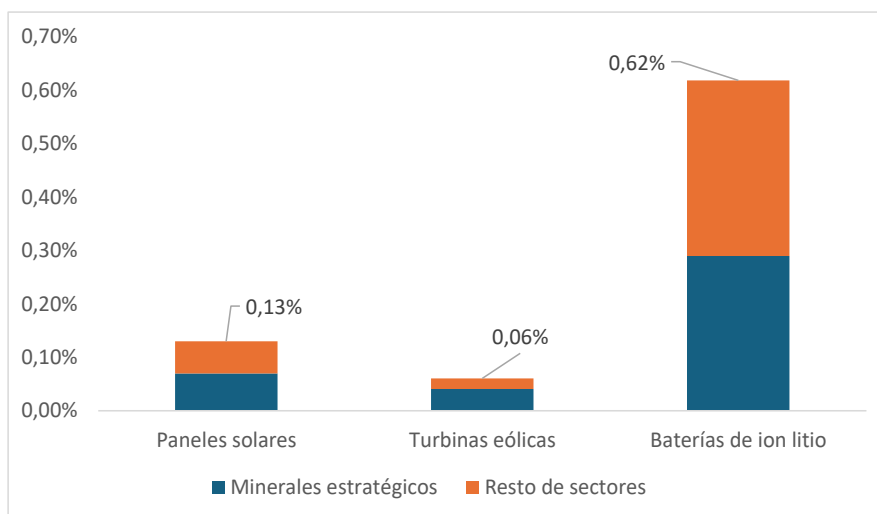
Sector de cuentas nacionales	Paneles solares	Turbinas eólicas	Baterías de ion litio	Razón del choque
Edificaciones	x	x		Adecuación de fabricas
Obras civiles			x	Instalación de turbinas
Auxiliar construcción	x	x	x	Apoyo a obras civiles y edificaciones
Servicios de apoyo	x	x	x	Instalación y adecuación
Productos minerales no metálicos	x	x	x	Vidrio, cemento, concreto
Metalurgia básica	x	x	x	Procesamiento de minerales
Maquinaria y equipo	x	x	x	Maquinaria especializada
Maquinaria eléctrica	x	x	x	Cables y transformadores
Industria química		x		Solventes
Transporte acuático			x	Instalación turbinas

Elaboración de los autores.

Considerando la información recolectada, se realiza un análisis del impacto sobre la producción de la cadena de valor de la generación fotovoltaica y eólica, así como del almacenamiento en baterías de ion litio, para un proyecto de un gigavatio de capacidad. Como se puede observar en el Gráfico 1, el almacenamiento de energía tiene un efecto mayor sobre la producción de la economía, que la generación de las fuentes renovables, ya que hace más eficiente la infraestructura eléctrica existente, al permitir que la energía se transporte en momentos de baja demanda y se utilice cuando la demanda es alta. Además, la intermitencia de las energías renovables, como la solar y eólica, requiere de sistemas de almacenamiento para garantizar un suministro eléctrico continuo y estable. Estos sistemas permiten desacoplar la generación del consumo, facilitando la integración de las energías renovables en la red eléctrica.

De otra parte, hay un efecto indirecto significativo sobre la producción de otros sectores de la economía, al considerar estos como insumos necesarios para la fabricación y operación de las tecnologías de generación y almacenamiento de energía. Este efecto es mayor para las baterías de ion litio y los paneles solares, ya que 53,1% y 46,1%, respectivamente, del crecimiento de la producción es explicado por los incrementos en otros sectores, en comparación con el 32,8% de las turbinas eólicas.

Gráfico 1. Impacto de la generación y almacenamiento de energía de un gigavatio en la producción económica



Elaboración de los autores.

Conclusiones

Las cadenas de valor aquí analizadas: baterías de litio, los paneles solares y las turbinas eólicas, son complejas y requieren de una amplia gama de materiales y procesos. Comprender estas cadenas es fundamental para desarrollar políticas públicas que fomenten la producción local y la creación de empleos en estos sectores estratégicos. Además, identificar los eslabones o etapas de cada cadena internacional de valor en los que el país podría insertarse, permitirá desarrollar estrategias para reducir la dependencia de importaciones, impulsar la producción nacional, y fortalecer la resiliencia de las cadenas de suministro y avanzar en la transición energética.

Los resultados del análisis presentado aquí, indica que la participación en el ensamblaje de paneles solares, la fabricación de cátodos de litio y la instalación de turbinas eólicas *offshore* puede generar un impacto positivo en la economía colombiana, estimulando la producción en sectores estratégicos como la metalurgia y la maquinaria. Sin embargo, la disponibilidad de minerales estratégicos como el cobre puede limitar el alcance de esta participación.

La transición hacia las energías renovables representa una oportunidad para diversificar la matriz energética de Colombia y fortalecer su economía. El país cuenta con una base de recursos minerales que lo posiciona como un actor dentro de la cadena de valor de las energías renovables. Sin embargo, es fundamental desarrollar políticas públicas que fomenten la inversión en investigación y desarrollo, la capacitación de mano de obra calificada y la creación de un marco regulatorio favorable para atraer tecnología e inversión extranjeras. Además, es necesario fortalecer la cooperación internacional para garantizar el acceso a tecnologías limpias y a precios competitivos.

Referencias

Garcia-Casals, X., Rabia F. and Bishal, P. (2019). *Measuring the socio-economic footprint of the energy transition*. Energy Transitions, Vol. 3, pp. 105 – 118.

Graulich, K., Bulach, W., Betz, J., Dolega, P., Hermann, C., Manhart, A., Bilsen, V., Bley, F., Watkins, E. and Stainforth, T. (2021), Emerging waste - streams challenges and opportunities. Öko-Institut, https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/EEA_emerging-waste-streams_final-report.pdf.

Hanna, R., Heptonstall, P. and Gross, R. (2024). *Job creation in a low carbon transition to renewables and energy efficiency: A review of international evidence*. Sustainability Science, Vol. 19, pp. 125 – 150.

International Energy Agency – IEA. (2022a). The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions. March 2022.

International Energy Agency – IEA. (2022b). Special Report on Solar PV Global Supply Chains. Enlace: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf>.

International Energy Agency – IEA. (2023a). Energy technologies perspectives 2023. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf>.

International Energy Agency – IEA. (2023b). World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.

International Energy Agency – IEA. (2024). Batteries and Secure Energy Transitions, April 2024.

International Renewable Energy Agency – IRENA (2019). Measuring the socio-economic footprint of the energy transition: The role of supply chains. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_-_Measuring_socio-economic_footprint_2019_summary.pdf?la=en&hash=98F94BCC01598931E91BF49A47969B97ABD374B5.

IRENA (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Aug/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2022.pdf?rev=cccb713bf8294cc5bec3f870e1fa15c2.

Jelti F, Allouhi A, Büker MS, Saadani R, Jamil A. (2021). *Renewable power generation: A supply chain perspective*. Sustainability. Vol. 13 (3), 1271.

Maisch, M. (2022). Huge aluminum demand expected in solar industry, concerns arise on emissions. PV Magazine, <https://www.pv-magazine.com/2022/01/25/huge-aluminum-demand-expected-in-solar-industry-concerns-arise-on-emissions/>.

Zuluaga, A, Orozco Cera, E, Bastidas-Barranco, M, Sarmiento Orjuela, A, Polo Padilla, D, Rodríguez Redondo, S, Albino Serpa, G, Jaramillo Contreras, D, Sierra Beltrán, D, Salazar Hernández, J, Ospino Carbonell, R, Álvarez Yépez, B y Daza Torres, C. (2023). Escenarios energéticos hipotéticos e improbables para la producción de electricidad en Colombia: un contexto de todas las fuentes de energía en la transición energética. Fundación Universitaria del Área Andina. Disponible en: <https://digitk.areandina.edu.co/handle/areandina/5654>.

Introducción

El turismo es un sector clave en la economía global, generando empleo, impulsando otros sectores y mejorando la balanza de pagos. Los países buscan aumentar sus flujos turísticos para obtener beneficios económicos, lo que ha llevado a una mayor competencia internacional.

El sector turístico fue uno de los más afectados por la pandemia, sufriendo una contracción sin precedentes en su historia. Según datos de la Organización Mundial de Turismo (OMT), la llegada de turistas internacionales se desplomó un 90% en el peor momento de la crisis, paralizando prácticamente esta actividad a nivel global. Las consecuencias de esta crisis fueron devastadoras, afectando desde las economías nacionales hasta las finanzas de las empresas turísticas y el bienestar de las familias que viven del turismo. La OMT reporta que, antes de la pandemia, el turismo internacional creció significativamente, superando los 1.400 millones de turistas en 2019. Aunque la pandemia afectó los flujos turísticos en 2021 y 2022, se observa una recuperación en 2023, que se estima un número cercano a los 1.300 millones de turistas. Europa sigue siendo la región más visitada (67% del total), seguida por América (18%), Asia y el Pacífico (5%), Oriente Medio (5%) y África (4%) (UNWTO, 2024).

Colombia recibió 6,1 millones de llegadas de turistas internacionales en 2023, recuperándose del mínimo de la pandemia de 1,4 millones en 2020 y superando los niveles prepandémicos de 4,5 millones en 2019. El gasto de los turistas internacionales alcanzó un total de 51.000 millones de pesos en 2023. Los principales mercados emisores en 2023 fueron Estados Unidos (27%), Ecuador (8%) y México (8%). El turismo interno también ha superado los niveles prepandémicos. El número de viajes nacionales con pernoctación alcanzó los 47,4 millones en 2023, un 2,5% más que en 2019 (46,3 millones). Los turistas nacionales gastaron 17.700 millones de pesos en 2023, o un aumento del 7,8% sobre los niveles de 2019, en precios corrientes (OECD, 2024).

El sector turístico se ha visto profundamente transformado por la globalización, convirtiéndose en un sector de gran potencial de crecimiento, que se posiciona como un motor de desarrollo y un agente de cambio social, dado su carácter intersectorial, que abarca desde el transporte hasta servicios. Por estas razones, el clúster de turismo puede considerarse una alternativa viable para la generación de ingresos por parte de las regiones, que pueden dejar de percibir ingresos ante una disminución de la producción del sector de hidrocarburos. Ahora bien, el modelo deseable de turismo debe de ser “sostenible ambientalmente”, ya que el turismo tradicional ha generado conflictos relacionados con la gestión de recursos naturales, la planificación territorial y la conservación ambiental.

La importancia del sector de turismo en la economía

De acuerdo con la Organización Mundial del Turismo (OMT), la elección de un destino turístico está asociada al consumo de una serie de bienes y servicios característicos del sector. Entre estos se destacan el alojamiento, la restauración, el transporte y los servicios de agencias de viajes, los cuales conforman la base de la industria turística. En este sentido, para el caso de Colombia, por cada \$100 pesos gastados en el sector de alojamiento, la economía crece \$77 adicionales, lo cual es ligeramente superior al promedio de la economía (\$72)³⁶.

Entonces, la medición del grado de importancia del sector de turismo no sólo debe tener en cuenta al sector en sí mismo, sino también los impactos directos e indirectos sobre aquellos otros sectores

³⁶ Los cálculos son realizados a partir de la matriz insumo – producto del DANE para 2019.

de la economía. Entre los sectores que afecta directamente el turismo se deben tener en cuenta los siguientes:

- Alojamiento (hoteles) y servicios de hostelería, que representa un alto porcentaje de servicios asociados al turismo.
- Servicios de transporte fluvial y terrestre, que incluyen “servicios de transporte marítimo internacional y de cabotaje de pasajeros (inclusive en cruceros turísticos), servicios de transporte marítimo de carga, servicios de alquiler de embarcaciones acuáticas con tripulación.
- Transporte aéreo (con la información del motivo del viaje), que incluye “servicios de transporte aéreo nacional e internacional regular y no regular de pasajeros, servicios de transporte aéreo turístico, servicios de aerotaxi, servicios de transporte espacial de pasajeros, servicios de alquiler de aeronaves con tripulación”.
- Actividades artísticas, de entretenimiento y recreación y otras actividades de servicios, que incluyen actividades culturales y de turismo, tanto nacional como internacional.

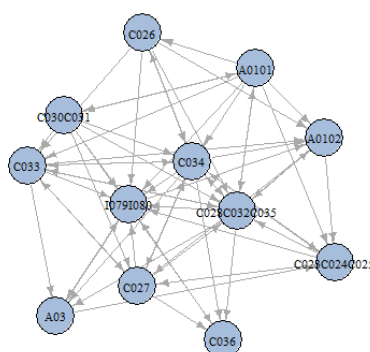
Los sectores impactados de forma indirecta son los involucrados en la cadena de suministro, que también compran bienes y servicios como insumos (por ejemplo, alimentos, mayoristas, servicios públicos) para su producción:

- Construcción de edificaciones residenciales y no residenciales, en la cual se contemplan las construcciones hoteleras y recreacionales.
- Construcción de carreteras y vías de ferrocarril, de proyectos de servicio público y de otras obras de ingeniería civil, que incluyen numerosas obras para promover el turismo tal como se puede apreciar en los proyectos locales financiados con diferentes fuentes y constituyeron el pilar principal de la “agenda interna” de las apuestas hace una década.
- Comercio al por mayor y en comisión o por contrata; comercio al por menor (incluso el comercio al por menor de combustibles); comercio de vehículos automotores y motocicletas, sus partes, piezas y accesorios (el cual incluye el comercio de artesanías, ferias y eventos promovidos por las cámaras de comercio).
- Información y comunicaciones (en la cual se incluye la promoción de eventos y sitios turísticos).
- Actividades y servicios inmobiliarias, en la cual se incluyen servicios y comisiones por alquiler de inmuebles de renta turística.
- Actividades profesionales, científicas y técnicas, en la cual se contempla el producto de los servicios de profesionales especializados, como directores y gerentes de servicios hoteleros y hospedaje, Gerentes y administradores de servicios de alimentos y restaurantes, Pilotos, ingenieros e instructores de vuelo, Empleados de ventas y servicios de viajes, recepcionistas de hoteles entre otros.
- Actividades de atención de la salud humana y de servicios sociales (identificado en el motivo del viaje del formulario del DANE).
- Impuestos menos subvenciones sobre los productos (incluye el IVA a hoteles y restaurantes).

De esta manera, en 2023, el sector de turismo contribuyó al PIB 3,7%, lo que muestra una recuperación continua desde 2020 (2,3%), pero aún está por encima del 3,3% en 2019. De acuerdo con la información a cuatro dígitos de la Gran Encuesta Integrada de Hogares, el sector de turismo compuesto por los subsectores industriales, de construcción y de servicios propiamente dichos, ha generado, en promedio en los últimos años, 958.731 empleos directos y 441.016 empleos indirectos.

Adicionalmente, el sector puede ser visto como un clúster, como se muestra en el Gráfico 5. El clúster de turismo es conformado por doce sectores³⁷, que incluye principalmente los sectores de agricultura, agroindustria, y de restaurantes y hotelería, al punto que, en su totalidad, alcanzó, en 2015, una participación en el PIB del 12,9% y el 24,1% de la fuerza laboral.

Gráfico 5. Clúster de alojamiento, agroindustria y agricultura



A0101: Agricultura sin café; A0102: Ganadería; A03: Pesca; C023C024C025: Carnes procesadas; C026: Aceites; C027: Productos lácteos; C028C032C035: Molinería; C030C031: Azúcar y panela; C033: Chocolate y confitería; C034: Elaboración de otros productos alimenticios; C036: Elaboración de bebidas; J078: Alojamiento; J079I080: Restaurantes.

Fuente: Villamil, Quintero y Hernández (2019).

Efectos socioeconómicos del turismo

La literatura académica sobre turismo ha experimentado un notable crecimiento en las últimas décadas, con un énfasis en el análisis de la demanda turística y sus determinantes. Las investigaciones han demostrado que el turismo puede generar una variedad de impactos, tanto positivos como negativos, en las comunidades receptoras. En particular, la relación entre turismo y pobreza ha sido objeto de un intenso debate. A pesar de que investigaciones como las de Zhao y Xia (2020) y Folarin y Adeniyi (2019) han propuesto una relación positiva entre el turismo y la reducción de la pobreza, la evidencia empírica internacional es escasa y no ha alcanzado un consenso claro.

En el caso de Colombia, Camacho, Gounder y Richardson (2024) encuentran que el incremento del valor agregado, a través de un mayor turismo en la región, conduce a reducciones significativas tanto de la pobreza como de la pobreza extrema. Este resultado tiene importantes implicaciones de política, ya que estimular al sector de turismo podría contribuir con la reducción de la brecha de pobreza monetaria entre regiones.

De otra parte, como lo muestra Dossou *et al.* (2023) para quince países latinoamericanos, si bien tanto el turismo como una buena gobernanza contribuyen a disminuir la pobreza, los efectos positivos del turismo son más pronunciados en contextos de alta calidad institucional. Estos hallazgos sugieren

³⁷ Para más detalles de la metodología, véase Villamil, Quintero y Hernández (2019).

que, para maximizar los beneficios del turismo en términos de reducción de la pobreza, resulta fundamental fortalecer las instituciones y mejorar la gobernanza en los destinos turísticos.

De cualquier forma, el turismo es una importante fuente de desarrollo para las economías regionales. Los datos de la Encuesta de Gasto Interno en Turismo, realizada por el DANE, revela un patrón de migración turística desde el centro hacia la periferia colombiana, con la Costa Caribe como destino principal. Si bien los destinos de sol y playa son los favoritos para el turismo familiar, los grandes centros urbanos como Bogotá y Medellín juegan un papel crucial en el turismo de negocios y convenciones a nivel nacional e internacional. No obstante, el atractivo turístico de Colombia se extiende más allá de las grandes ciudades, con el Eje Cafetero posicionándose como un destino popular para quienes buscan experiencias más relajadas y en contacto con la naturaleza.

Como lo sugieren Garay, Piraquive y Hernández (2023), ante un choque consistente en una contracción a la mitad del sector de hidrocarburos, para diversificar la economía de las regiones carboníferas y petroleras, una política económica que estimule el clúster de turismo (sector agrícola, agroindustrial y de turismo sostenible) podría contribuir a fortalecer la economía regional, reducir la dependencia de los recursos naturales y ayudar a mitigar los efectos sobre la pobreza.

Como se aprecia en el Cuadro 2, para el caso de la región petrolera, la mitigación llegaría a un poco más de la mitad del impacto del choque, esto es, el incremento sería de 6,7%. Mientras que para la región carbonífera, dicha mitigación sería mucho más importante, al ser de 9,1%. De otra parte, al descomponer la mitigación por el crecimiento de los sectores de agricultura, agroindustria y turismo, se observa que el impulso a este último sector incrementaría el PIB regional en mayor medida que en el caso de los otros sectores por separado (0,8% vs 0,2 y 0,6%, respectivamente).

Cuadro 2. Efectos regionales sobre la producción de un estímulo al clúster de turismo

	Agricultura (1)	Agroindustria (2)	Turismo (3)	Clúster de Turismo (1) + (2) + (3)
Petroleros	1,5%	3,2%	4,7%	6,7%
Carboníferos	1,6%	3,4%	5,0%	9,1%
Resto	0,0%	0,1%	0,1%	0,2%
Total	0,2%	0,6%	0,8%	1,3%

Departamentos carboníferos: Cesar, La Guajira y Norte de Santander.

Departamentos petroleros: Arauca, Casanare, Meta, Santander y Putumayo.

Cálculos con base en una Matriz Insumo - Producto Regional.

Adaptado de Garay, Piraquive y Hernández (2023).

En cuanto al empleo, se observa en el Cuadro 3 que el sector de la agroindustria sería el que más empleo generaría, en la medida en que los puestos de trabajo creados serían de hasta 2,4 veces más que en el caso de la agricultura y 1,1 veces más que en el sector de turismo. El impulso al clúster de turismo contribuiría con una creación de unos 248 mil empleos. Adicionalmente, la región carbonífera tendría mayores ganancias, en términos de la creación de puestos de trabajo, en el caso del sector turismo, ya que generaría 1,2 veces más empleos que la agroindustria, y hasta 1,9 veces más empleos que el sector turismo en la región petrolera.

Cuadro 3. Efectos regionales sobre el empleo de un estímulo al clúster de turismo^{/1}

	Agricultura (1)	Agroindustria (2)	Turismo (3)	Clúster de Turismo (1) + (2) + (3)
--	------------------------	--------------------------	--------------------	---

Petroleros	20.605	45.451	27.779	93.835
Carboníferos	20.704	45.895	54.126	120.725
Resto	4.194	15.904	13.307	33.405
Total	45.503	107.251	95.213	247.966

Departamentos carboníferos: Cesar, La Guajira y Norte de Santander.

Departamentos petroleros: Arauca, Casanare, Meta, Santander y Putumayo.

^{/1} Basado en los departamentos que tienen información para la GEIH.

Cálculos con base en una Matriz Insumo - Producto Regional.

Adaptado de Garay, Piraquive y Hernández (2023).

El modelo de turismo sostenible

El modelo de turismo “ambientalmente sostenible” difiere sustancialmente del modelo de turismo que ha generado conflictos relacionados con la gestión de recursos naturales, la planificación territorial y la conservación ambiental³⁸, como lo señala Bolaños-Narváez *et al.* (2024). Tal como lo definen Lee y Han (2018), el ecoturismo es una actividad que combina la conservación ambiental, el desarrollo económico y el enriquecimiento cultural. Al visitar áreas naturales con un propósito educativo, el turismo podría contribuir al bienestar de las comunidades locales y a la protección de los ecosistemas.

A este respecto, Saavedra (2020) encuentra que el ecoturismo tiene un gran potencial para impulsar el desarrollo económico local y conservar los bosques. Si bien los resultados a corto plazo son prometedores, es fundamental realizar estudios a largo plazo para evaluar su sostenibilidad. De lograrse, el ecoturismo podría convertirse en una estrategia efectiva para generar ingresos y proteger los ecosistemas. De otra parte, Pineda (2023) muestra que es necesario considerar que las opiniones sobre el desarrollo turístico pueden variar dentro de una misma comunidad. Para garantizar el éxito de los proyectos de ecoturismo, es fundamental involucrar a las comunidades locales en la toma de decisiones y considerar sus percepciones sobre la calidad ambiental y su forma de conservación. Tal como lo plantean Lemahieu *et al.* (2018), un enfoque participativo permite comprender mejor los sistemas ecológicos y fortalecer los vínculos entre las comunidades y su entorno.

Bajo el turismo sostenible, el avistamiento de aves ha crecido exponencialmente en el continente. Colombia destaca entre estos países por su reconocido potencial de actividades de ecoturismo y su estatus como el país con la mayor diversidad de aves del planeta. Como lo señala Ocampo-Peñuela y Winton (2017), los observadores de aves están dispuestos a pagar precios altos por la oportunidad de ver especies únicas³⁹. Si Colombia sigue el ejemplo de Perú, podría atraer un número significativo de turistas de avistamiento de aves, generando importantes ingresos y empleos. El mercado global de avistamiento de aves es grande y en constante crecimiento, lo que sugiere una demanda sostenible a largo plazo. El turismo de observación de aves ofrece la oportunidad de hacer que las tierras protegidas sean económicamente productivas, ayudando a cumplir con los compromisos nacionales e internacionales de conservación.

El turismo de observación de aves tiene el potencial de generar fondos para áreas protegidas, involucrar al público en la valoración de los ecosistemas naturales y proporcionar alternativas de subsistencia en las zonas que dejen de operar las industrias extractivas (Sekercioglu, 2002). Por supuesto, el ecoturismo no es una panacea para la conservación y debe implementarse de manera responsable para ser sostenible (Kruger, 2005).

³⁸ Por ejemplo, véase Murcia y Francel-Delgado (2022).

³⁹ Los individuos que practican el turismo de observación de aves suelen tener un alto poder adquisitivo (Cordell y Herbert, 2002) y muestran una disposición a pagar precios superiores para avistar especies únicas en Colombia, alcanzando un promedio de US\$310 por persona y día (Maldonado *et al.*, 2018).

No obstante, lo anterior, es claro que la expansión del turismo hacia zonas rurales puede agudizar la presión sobre los recursos naturales⁴⁰, la especulación de tierras y la disminución de la producción agrícola⁴¹, razón por la cual se requiere de enmarcar la promoción del turismo en una estricta política pública de conservación medioambiental y de protección de la biodiversidad.

Conclusiones

Colombia se destaca por su rica biodiversidad, su patrimonio cultural y la potencialidad de sus servicios turísticos. La competitividad de sus precios y la variedad de sus destinos, desde playas hasta montañas, la convierten en un destino versátil y atractivo para diferentes tipos de turistas. El país tiene un gran potencial para desarrollar el ecoturismo y el turismo de negocios, diversificando así su oferta y fortaleciendo su posición en el mercado turístico latinoamericano.

El ecoturismo surge como un sector importante para el desarrollo de un modelo de turismo sostenible y respetuoso con el medio ambiente, pero no es una solución mágica para la conservación y el desarrollo local. Es necesario involucrar a la comunidad, comprender sus percepciones sobre la calidad ambiental y la biodiversidad del ecosistema y la estrategia para conservarla e incluso potenciarla. Ahora bien, a diferencia de las industrias extractivas, gran parte de los ingresos del ecoturismo sustentable como en el caso del avistamiento de aves queda en las mismas comunidades locales (Sekericioglu, 2002). Esto hace que esta clase de turismo pueda ser una opción más sostenible socialmente.

De acuerdo con Alcalá-Ordóñez y Segarra (2023), se pueden implementar diversas políticas para impulsar el turismo: mejorar el acceso a financiamiento, simplificar regulaciones, invertir en infraestructura y promover el turismo responsable. Sin embargo, es importante considerar los impactos negativos, como el aumento de los precios, la gentrificación, la contaminación y el deterioro ambiental, entre otros, para diseñar estrategias eficaces para mitigarlos.

En resumen, el desarrollo sostenible del turismo en Colombia requiere un enfoque integral que aborde los desafíos relacionados con la seguridad, la competitividad, la infraestructura y la inversión, la conservación ambiental y de la biodiversidad, el respeto de las culturas ancestrales y territorios colectivos. Al implementar políticas públicas efectivas, promover la inversión privada y fortalecer la colaboración entre los diferentes actores del sector, Colombia puede convertirse en un destino turístico, generando beneficios económicos y sociales para el país.

⁴⁰ Como es el caso del Cañón del Combeima que, evidencia la urgente necesidad de replantear la planificación del suelo rural, buscando una mayor coherencia con el marco legal y los intereses del territorio (Reyes-Bonilla y Francel-Delgado, 2023).

⁴¹ En algunos casos el turismo puede entrar en conflicto con los sistemas de producción tradicional agrícola, especialmente cuando estos se encuentran lejos de los centros de acopio o su tecnología es obsoleta (Madrid *et al.*, 2017).

Referencias

- Alcalá-Ordóñez, A. and Segarra, V. (2023). *Tourism and economic development: A literature review to highlight main empirical findings*. Tourism Economics, Special Focus: Tourism, economic development and environmental impact, pp. 1 – 28.
- Bolaños-Narváez, Y., Francel-Delgado, A. and Kaffure-Ruiz, C. (2024). *Impacts of Tourism on Land Occupation Models: Anapoima, Colombia*. Future Cities and Environment, Vol 10 (1): 8, pp. 1 – 10.
- Camacho-Murillo, A., Gounder, R. and Richardson, S. (2024). *More than a trip: The contribution of tourism to regional poverty reduction*. Tourism Analysis, Vol. 29 (1), pp. 69 – 85.
- Cordell, H. and Herbert, N. (2002). *The popularity of birding is still growing*. Birding, Vol. 34 (1), pp 54 – 61.
- Dossou, T., Ndomandji E., Bekun, F, and Eoulam, A. (2023). *Exploring the linkage between tourism, governance quality, and poverty reduction in Latin America*. Tourism Economics, Vol. 29 (1), pp. 210 – 234.
- Folarin O. and Adeniyi O. (2019). *Does tourism reduce poverty in Sub-Saharan African countries?* Journal of Travel Research, Vol. 59 (1), pp. 140 – 155.
- Garay, L. J., Piraquive, G. y Hernández, G. (2023). Hacia una neutralidad baja en carbono: efectos económicos y políticas de mitigación. Departamento Nacional de Planeación. *Archivos de economía*, Documento 553.
- Hernández, G. y Quintero. L. F. (2023). Dinámica sectorial de la economía colombiana: 2005 – 2019. Departamento Nacional de Planeación. *Archivos de Economía*, No 554.
- Instituto Distrital de Turismo - IDT (2021). Turismo y Pobreza: Análisis de la contribución del turismo a la reducción de la pobreza. Enlace en: <https://www.idt.gov.co/sites/default/files/TURISMO-Y-POBREZA-Analisis-de-la-contribucion-del-turismo-a-la-reduccion-de-la-pobreza-DVOV1.pdf>.
- Krüger, O. (2005). *The role of ecotourism in conservation: Panacea or Pandora's box?* Biodiversity and Conservation, Vol. 14 (3), pp. 579 – 600.
- Lee, T. and Jan, F. (2018). *Ecotourism behavior of nature-based tourists: An integrative framework*. Journal of Travel Research, Vol. 57 (6), pp. 792 – 810.
- Lemahieu, A., Scott, L., Malherbe, W., Mahatante, P.T., Randrianarimanana, J. V., Aswani, S. (2018). *Local perceptions of environmental changes in fishing communities of southwest Madagascar*. Ocean and Coast Management, Vol 163 (1), pp. 209 – 221.
- Madrid J., Aguilar M., Vélez, D y Muriel B. (2017). *Riesgo de pérdida de los sistemas de producción agrícola tradicional por la amenaza turística en Occidente Cercano (Antioquia, Colombia)*. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, Vol. 26 (2), pp. 309 – 325.
- Maldonado, J., Moreno-Sanchez, R., Espinoza, S., Bruner, A., Garzón, N., and Myers, J. (2018). *Peace is much more than doves: The economic benefits of bird-based tourism as a result of the peace treaty in Colombia*. World Development, Vol 106, pp. 78 – 86.
- Morera, N. (2020). Potencialidades y obstáculos del sector turismo en Colombia. Departamento Nacional de Planeación. *Archivos de Economía*, No 513.
- Murcia P. y Francel-Delgado, A. (2022). *Segregación socioespacial y neutralidad normativa en la gestión comunitaria del agua*. Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa, (106), pp. 299 – 329.
- Ocampo-Peñuela N. and Winton, R. (2017). *Economic and conservation potential of bird-watching tourism in post conflict Colombia*. Tropical Conservation Science, Vol. 10, pp 1 – 6.
- OECD (2024), *OECD Tourism Trends and Policies 2024*. Enlace en: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/07/oecd-tourism-trends-and-policies-2024_17ff33a3/80885d8b-en.pdf.

Pineda, F., Padilla, J., Granobles-Torres, J.C., Echeverri-Rubio, A., Botero, C.M. and Suarez, A. (2023). *Community preferences for participating in ecotourism: A case study in a coastal lagoon in Colombia*. Environmental Challenges, Vol. 11, pp. 1 – 8.

Reyes-Bonilla, and Francel-Delgado, A. (2023). *Coordination mechanisms of rural land use planning: Combeima Canyon, Ibagué, Colombia*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Vol. 95 (2), e20230029.

Saavedra, S. (2020). Socio-economic and environmental effects of ecotourism. Universidad del Rosario, Documentos de Trabajo, No 264.

Sanguinet, E., Galvis-Aponte, L.A., Araújo, I.F., Haddad, E.A. (2023). *Urban Travelers Go to the Beach: Regional Effects of Domestic Tourism in Colombia*. En: Eduardo Haddad, Jaime Bonet y Geoffrey Hewings (eds): The Colombian economy and its regional structural challenges, pp, 297–325.

Sekercioglu, C. H. (2002). Impacts of birdwatching on human and avian communities. Environmental Conservation, Vol. 29 (3), pp. 282 – 289.

UNWTO (2024). Tourism Data Dashboard 2024. World Tourism Organization, enlace en: <https://www.unwto.org/tourism-data/un-tourism-tourism-dashboard>.

Utami S., Moslehpour M., Nguyen D., Johari, S., Thi V. and Minh V. (2022). *The Impact of Sustainable Tourism Growth on the Economic Development: Evidence from a Developing Economy*. Cuadernos de Economía, Vol. 45 (127), pp. 130 – 139.

Zhao L. and Xia X. (2020). *Tourism and poverty reduction: empirical evidence from China*. Tourism Economics, Vol. 26 (2), pp. 233 – 256.

Consideraciones finales

La transición energética hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles es un reto global que todos los países están afrontando. En Colombia, esta transición presenta oportunidades clave para transformar su economía, pero también implica desafíos importantes, especialmente considerando su dependencia histórica en la explotación y exportación de recursos naturales como el petróleo y el carbón. Aquí se incluye una breve exploración de los beneficios y retos económicos que enfrenta Colombia en su camino hacia una economía baja en carbono, basándose en proyecciones y modelos de impacto macroeconómico, como los desarrollados por EnergyScope y GEMMES, que reflejan las implicaciones de integrar nuevas tecnologías y adaptar la economía a un nuevo sistema energético.

Beneficios de la transición baja en carbono

Diversificación de la matriz energética

Uno de los principales beneficios de la transición energética es la diversificación de la matriz energética. Colombia cuenta con un potencial significativo para el desarrollo de energías renovables no convencionales, particularmente la solar y la eólica, lo que podría disminuir su dependencia de los combustibles fósiles y del hidrocarburo. Al integrar estas fuentes en su sistema energético, Colombia no solo reduciría su vulnerabilidad a las fluctuaciones de precios internacionales de los combustibles fósiles, sino que también reforzaría su seguridad energética.

La diversificación podría traducirse en una mayor estabilidad a largo plazo para la economía. La volatilidad de los precios del petróleo ha sido históricamente una fuente de desequilibrio o inestabilidad para la economía del país, y la elevada dependencia de estos recursos ha contribuido a distorsionar precios clave en la economía y a limitar el crecimiento de otros sectores productivos. La transición energética representaría una oportunidad para incentivar el desarrollo de industrias basadas en energías renovables y avanzar hacia una economía más robusta y diversificada.

Generación de empleo

El desarrollo de nuevas infraestructuras energéticas, como plantas solares y parques eólicos, requiere inversiones significativas, lo que puede traducirse en la creación de empleos directos e indirectos. Estos empleos no solo se generarían durante la etapa de construcción de proyectos, sino que también se podrían mantener, en buena medida, en las etapas de operación, mantenimiento e investigación de tecnologías limpias a lo largo del tiempo. Además, la instalación de estas infraestructuras suele requerir mano de obra local, lo que generaría oportunidades de empleo en zonas rurales y áreas de menor desarrollo económico.

La Agencia Internacional de Energía ha proyectado que las energías renovables demandarían más empleos por megavatio instalado en comparación con los combustibles fósiles. Esto significa que la expansión de las energías renovables podría ser una herramienta efectiva para enfrentar el desempleo estructural en Colombia, contribuyendo a mejorar los índices de pobreza y desigualdad, especialmente en regiones tradicionalmente afectadas por la dependencia del sector extractivo.

Reducción de costos operativos

Si bien las inversiones iniciales en energías renovables son considerables, una vez operativas, estas tecnologías suelen tener menores costos de operación y mantenimiento (OPEX) en comparación

con las fuentes tradicionales de energía. Las fuentes de energía solar y eólica, por ejemplo, no dependen de combustibles que necesiten ser extraídos o transportados, lo que reduce significativamente los costos operativos. En el mediano y largo plazo, estas reducciones de costos se traducirían en menores precios de energía para los consumidores y las empresas, lo que podría incentivar el crecimiento de la economía y aumentar la competitividad del país.

Cumplimiento de compromisos internacionales

Otro beneficio clave de la transición energética sería el cumplimiento de los compromisos internacionales adquiridos por Colombia, como el Acuerdo de París. La descarbonización de la economía y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero posicionarían al país como un actor relevante en la lucha global contra el cambio climático, lo que podría atraer fondos, tecnología y cooperación internacional para seguir avanzando en su transición. Además, los potenciales incentivos económicos derivados de la acción climática, como la financiación de proyectos sostenibles y la apertura de mercados con ventajas comerciales para productos “verdes”, podrían beneficiar a largo plazo a la economía colombiana.

Potencial para la innovación y desarrollo tecnológico

La transición hacia una matriz energética más limpia también abriría la puerta a la innovación y el desarrollo tecnológico. Colombia podría posicionarse como un centro de investigación y desarrollo de tecnologías limpias, atrayendo tanto talento nacional como internacional: las universidades y centros de investigación tendrían la oportunidad de liderar proyectos enfocados en energías renovables, almacenamiento de energía y redes inteligentes, lo que fomentaría un ecosistema de startups y empresas emergentes para desarrollar soluciones adaptadas al contexto local.

Países como Dinamarca han convertido la transición energética en un motor de innovación tecnológica que ha impulsado su economía. Guardadas proporciones, Colombia podría seguir un camino similar al fomentar alianzas entre el sector privado, el gobierno y la academia para impulsar la creación de nuevas tecnologías y exportar soluciones energéticas a otras naciones de América Latina y más allá.

Incremento de la resiliencia climática

El cambio climático es una amenaza latente para la economía de Colombia, que ha experimentado un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos como inundaciones y sequías. La transición hacia una matriz energética más sostenible podría ayudar a mitigar estos riesgos al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y, por ende, el impacto del cambio climático a nivel nacional.

Un enfoque en energías renovables y tecnologías limpias también podría contribuir al desarrollo de comunidades más resilientes, capaces de enfrentarse en mejores condiciones a los desafíos climáticos con infraestructuras adaptadas. Por ejemplo, la energía solar y eólica distribuida podría dotar de autonomía a comunidades remotas, haciendo que su suministro energético sea más fiable en casos de eventos climáticos anómalos e incluso hasta desastres naturales.

Retos económicos de la transición energética en Colombia

Necesidad de cuantiosas inversiones iniciales

Uno de los principales retos económicos de la transición energética es la necesidad de realizar cuantiosas inversiones iniciales. El cambio a un sistema energético basado en fuentes renovables requiere la modernización de infraestructuras, el desarrollo de nuevas plantas de generación, la instalación de centrales de almacenamiento y la construcción de redes eléctricas más flexibles y resilientes. Estas inversiones serían especialmente desafiantes en un país como Colombia, que enfrenta restricciones fiscales, con el agravante de que una parte importante del presupuesto depende de los ingresos provenientes de la explotación de combustibles fósiles.

Para superar este reto, será necesario desarrollar nuevos y variados esquemas de financiamiento y de manejo de la deuda pública externa, que podrían incluir la creación de un fondo soberano alimentado por los ingresos actuales del petróleo y el gas, destinado a financiar proyectos de infraestructura energética a largo plazo. Complementariamente, la participación del sector privado y la atracción de inversión extranjera directa serán cruciales para que, en conjunto con los otros mecanismos de financiamiento, se logren movilizar los recursos necesarios y asegurar que la transición sea económicamente viable.

Impacto en la estabilidad fiscal y macroeconómica

La transición hacia una economía baja en carbono puede afectar la estabilidad fiscal de Colombia. Históricamente, una parte significativa de los ingresos del gobierno proviene de la explotación de hidrocarburos, al punto de que, al menos en el corto y mediano plazo, una reducción en esta actividad impactaría negativamente los ingresos fiscales, afectando la capacidad del país para financiar gastos sociales esenciales, servicios públicos y proyectos de desarrollo. Ante esta situación, se requerirá que el país avance con celeridad en la diversificación de la economía, promoviendo sectores como el de un turismo sostenible socio-ambientalmente, la agricultura sustentable y las tecnologías limpias para, entre otros propósitos, compensar las pérdidas fiscales y activar fuentes diversas de crecimiento económico. La utilización de modelos, como *EnergyScope* y GEMMES, ayuda a visualizar los impactos macroeconómicos de la transición y, de esta forma, contribuye a evaluar y planificar políticas y medidas de transición para mitigar estos efectos.

Adaptación de la infraestructura energética

La infraestructura energética actual de Colombia está diseñada en torno a fuentes de energía convencionales, como la hidroeléctrica y los combustibles fósiles. La incorporación de energías renovables intermitentes, como la solar y la eólica, plantea un desafío para la red eléctrica del país, que deberá adaptarse para gestionar de manera efectiva la variabilidad en la generación y garantizar la estabilidad del suministro.

El almacenamiento de energía y la digitalización de la red serán aspectos críticos para enfrentar este reto. Las tecnologías emergentes, como las baterías de almacenamiento a gran escala y las redes inteligentes (*smart grids*) ofrecen soluciones prometedoras, pero también requieren inversiones sustanciales. Además, será necesario promover la investigación y el desarrollo de tecnologías que permitan integrar más eficientemente las fuentes renovables y garantizar un suministro energético continuo y fiable.

Impacto sobre sectores tradicionales

La transición energética también tiene implicaciones negativas para los sectores económicos tradicionales, en particular la industria del petróleo, el gas y el carbón, que ha sido un pilar fundamental de la economía colombiana, llevando a la pérdida de empleos y al deterioro de la actividad económica en regiones que actualmente dependen en gran medida de estas industrias. Es esencial que la transición energética se gestione de manera justa, implementando políticas de reconversión laboral y desarrollo económico que apoyen a las comunidades afectadas. La diversificación de la economía regional, el apoyo a nuevas industrias sostenibles y la creación de empleos verdes son fundamentales para asegurar que la transición no genere mayores desigualdades, sino a reducirlas de manera perdurable.

Dificultades en la transición justa para las comunidades dependientes de hidrocarburos

Uno de los retos más críticos de la transición energética es garantizar que sea justa e inclusiva. Las comunidades cuya economía depende de la extracción de petróleo, gas y carbón enfrentan la amenaza de quedarse atrás en este proceso. Estas regiones podrían experimentar una pérdida abrupta de empleos, ingresos y actividad económica, lo que agravaría las desigualdades sociales y económicas existentes.

Para contrarrestar este desafío, es vital que Colombia implemente políticas activas de reconversión económica y social. Esto podría incluir programas de capacitación laboral que preparen a los trabajadores para empleos en sectores de energías renovables y sostenibles, así como inversiones en infraestructura y proyectos que diversifiquen la economía local. Alemania, por ejemplo, ha puesto en marcha políticas de apoyo a sus regiones carboníferas, proporcionando subsidios y formación a los trabajadores desplazados durante su proceso de descarbonización.

Desafíos regulatorios y de gobernanza

El proceso de transición energética no está exento de desafíos regulatorios y de gobernanza. La adaptación de la legislación existente para fomentar la inversión en energías renovables y permitir la integración de nuevas tecnologías puede ser un proceso largo y complejo. En Colombia, esto implica la colaboración de múltiples niveles de gobierno, así como la coordinación entre entidades públicas y privadas.

Un marco regulatorio claro y eficiente es crucial para atraer inversión extranjera y garantizar que los proyectos de energías renovables puedan desarrollarse adecuadamente. Países como Chile han logrado avances notables en la implementación de políticas que favorecen la inversión en energía renovable, lo cual ha fortalecido su posición como líder en la región. Colombia podría beneficiarse de analizar estos ejemplos y adecuar sus políticas para acelerar su propia transición.

Educación y concienciación social

Un aspecto a menudo subestimado en la transición energética es la educación y la concienciación de la sociedad. Para que la transición sea sostenible, es necesario que los ciudadanos comprendan los beneficios y los retos de este cambio, y participen activamente en él. Esto incluye desde la adopción de hábitos de consumo energético más sostenibles hasta la participación en programas comunitarios y de cooperación en proyectos de energía renovable.

La educación ambiental en las escuelas y programas de divulgación pueden desempeñar un papel clave en la creación de una ciudadanía informada y comprometida con la transición energética. Además, es fundamental que las comunidades afectadas por la transición reciban información clara y transparente sobre las oportunidades que este proceso ofrece y cómo se podrían beneficiar del mismo.

