

NUEVOS HORIZONTES DE TRANSFORMACIÓN PRODUCTIVA EN LA REGIÓN ANDINA

Cero emisiones netas en los Andes:
DESCARBONIZACIÓN
de los sectores del plástico, textil,
automotriz y pesquero en Colombia,
Ecuador y Perú

Francis Li
Chris Bataille
Adrien Vogt-Schilb



Cero emisiones netas en los Andes:
DESCARBONIZACIÓN
de los sectores del plástico, textil,
automotriz y pesquero en Colombia,
Ecuador y Perú

**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Li, Francis G. N.

Cero emisiones netas en los Andes: Descarbonización de los sectores del plástico, textil, automotriz y pesquero en Colombia, Ecuador y Perú / Francis G. N. Li, Chris Bataille, Adrien Vogt-Schilb.

p. cm. — (Monografía del BID ; 1108)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Climate change mitigation-Andes Region. 2. Carbon dioxide mitigation-Andes Region. 3. Greenhouse gas mitigation-Andes Region. 4. Textile industry-Environmental aspects-Andes Region. 5. Fish industry-Environmental aspects-Andes Region. 6. Manufacturing industries-Environmental aspects-Andes Region. 7. Plastics industry and trade-Environmental aspects-Andes Region. I. Bataille, Christopher. II. Vogt-Schilb, Adrien. III. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. IV. Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Países del Cono Sur. V. Título. VI. Serie.

IDB-MG-1108

Códigos JEL: O54, L52, Q48, Q01, O33

Palabras claves: mitigación del cambio climático, transición energética, estrategia industrial, industria pesada, energía renovable, acuicultura, solar, eólica, política industrial, Acuerdo de París

Copyright © 2023 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



AGRADECIMIENTOS

Este informe fue redactado por el Dr. Francis G. N. Li, ingeniero principal de YarCom Inc; el Dr. Chris Bataille, investigador adjunto del Centro de Política Energética Global de la Universidad de Columbia e Investigador Asociado del IDDRI; y Adrien Vogt-Schilb, economista sénior del Sector de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible del BID.

Agradecemos a numerosos colegas del BID sus constructivos comentarios y sugerencias en diversas fases del proyecto: Javier Beverinotti, Alison Regan Cathles, Priscilla Grissel Gutiérrez Juárez, Pauline Henriquez Leblanc, Sandra López, Osmel Manzano, Nathalia Amarante Pufal, Vanderleia Radaelli, Juan Alfredo Rihm Silva, Daniel Alejandro Stagno Izaguirre, German Sturzenegger, Cecilia Yanez, Wladimir Zanoni López. Agradecemos a Ali Hasanbeigi, de Global Efficiency Intelligence, sus profundos comentarios.

Diseño gráfico de Sara Ochoa, edición de Karen Brandon.

Todas las decisiones editoriales y errores restantes son de los autores.

La investigación la financió el Programa de Desarrollo Estratégico para Países del Banco Interamericano de Desarrollo (RG-T4029).

RESUMEN EJECUTIVO

RETOS Y OPORTUNIDADES PARA LA REGIÓN ANDINA

A medida que el mundo comienza a avanzar hacia una economía baja en carbono, la región andina se encuentra en la cúspide de cambios que probablemente transformarán las trayectorias de desarrollo económico, social y ecológico en las próximas décadas. La región se enfrenta a muchos retos a la hora de afrontar estos profundos cambios. A corto plazo, la región andina se enfrenta a la inflación, la desorganización de la cadena de suministro, las consecuencias económicas de la pandemia COVID-19 y las complicaciones en materia de seguridad energética y alimentaria derivadas de la invasión de Rusia a Ucrania. A mediano plazo, la región también se enfrenta a los riesgos de impactos climáticos potencialmente desestabilizadores. Las previsiones indican que es probable que el suministro de agua disminuya y se haga más variable, y que las olas de calor y las inundaciones sean cada vez más frecuentes. Estos cambios amenazan la producción agrícola y la fiabilidad de la energía hidroeléctrica y, además, perturban a la sociedad y a la economía. Por lo tanto, los países andinos tendrán que actuar a corto y mediano plazo para reorientar las políticas industriales y crear vías que fomenten el desarrollo económico sostenible, mejoren la calidad de vida y aborden las desigualdades profundas, estructurales e imperantes (Stern & Valero, 2021).

Este periodo de profundos cambios ofrece a los países andinos oportunidades para mejorar sus economías y sociedades. De hecho, los países andinos están bien posicionados para un potencial resurgimiento económico. La región se beneficia de una demografía favorable, abundantes recursos energéticos y materiales renovables, y la proximidad geográfica a las economías poderosas en América del Norte. Los países andinos tienen rutas comerciales bien establecidas con América del Norte, Europa y Asia Oriental.

El gobierno, la industria y la sociedad civil deben trabajar juntos como nunca antes para realizar los cambios económicos y sociales transformadores necesarios para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París y limitar el calentamiento global 1,5-2 °C por encima de los niveles preindustriales. Este informe examina estas cuestiones interrelacionadas centrándose en tres países de la región andina (Colombia, Ecuador y Perú) y en cuatro sectores industriales dentro de ellos (plásticos, textiles, fabricación de automóviles y pesca). Los tres países se seleccionaron en función de la disponibilidad de datos clave, recopilados por el departamento de países andinos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), necesarios para sustentar el análisis; los cuatro sectores se seleccionaron en función de la evaluación de diagnóstico del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) de los sectores industriales que tienen potencial económico importante para la región en un futuro próximo.

El informe explora las vías que pueden lograr una producción industrial neutra en carbono en la región. Examina los retos y las oportunidades técnicas y operativas de cada sector, el panorama de políticas energéticas y medioambientales de cada país, y las formas en que estos temas interactúan entre sí, en un contexto más amplio de innovación tecnológica global y de gobernanza y financiación internacionales.

Este informe se centra en un objetivo: alcanzar la neutralidad de carbono. No profundiza en ninguna vía intermedia de reducción de emisiones (por ejemplo, propuestas para reducir las emisiones en un 50%

u 80%) que puedan ser ambiciosas pero que, en última instancia, no alcancen el objetivo general de cero emisiones netas. En este sentido, el informe toma al pie de la letra las aspiraciones del Acuerdo de París, del que son signatarios los tres países incluidos en este informe, y su objetivo de contener el aumento de la temperatura global en 1,5-2 °C por encima de los niveles preindustriales. Para lograr este objetivo y evitar alterar el sistema climático mundial de forma irreversible, las emisiones de gases de efecto invernadero deben desplomarse, hasta alcanzar el cero neto a mediados de siglo. Los términos *cero emisiones netas*, *cero neto*, *carbono-neutralidad*, o *descarbonización*, usados como sinónimos en este informe, significan que todas las fuentes de emisiones se reducen de manera drástica, y que cualquier emisión restante, debe equilibrarse con la cantidad equivalente absorbida de la atmósfera. Para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas se requerirá una transformación de la forma en que el mundo produce y consume bienes, y de cómo viajan las personas y los bienes.

Argumentos a favor de la industria con cero emisiones netas

Alcanzar las aspiraciones del Acuerdo de París (UNFCCC, 2015) de limitar el aumento de la temperatura global entre 1,5 °C y 2 °C por encima de los niveles preindustriales tiene implicaciones de gran alcance para la fabricación, el comercio y el desarrollo económico mundiales. Para alcanzar los objetivos del cero emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) para 2050 y cero emisiones netas para 2070 para todos los otros gases de efecto invernadero (GEI), es necesario modificar de forma significativa el panorama del comercio mundial, de la producción y del transporte de mercancías.

Todas las posibles vías para lograr el Acuerdo de París requieren que las emisiones industriales caigan precipitadamente a un nivel muy cercano a cero, o requieren agregar compensaciones verificables que sean permanentes y que casi con toda seguridad seguirán siendo más caras que la mayoría de las medidas de mitigación (Bataille et al., 2018; Rissman et al., 2020).

Una estrategia para decidir cómo pivotar hacia la industria con cero emisiones netas y con qué rapidez hacerlo es urgente por las siguientes razones:

- i. El lapso de tiempo requerido para las inversiones en fabricación significa que los cambios deben comenzar esta década.** La larga vida útil económica de la mayoría de los equipos en las plantas de fabricación significa que para alcanzar los objetivos de 2050 y 2070, es necesario que todas las nuevas instalaciones tengan emisiones muy bajas a partir de esta década (de 2023 a 2033). Los fabricantes de una amplia gama de sectores, en particular los que dependen de insumos que consumen mucha energía, como el acero, el aluminio, los productos químicos y el hormigón, pueden tener que invertir en equipos y procesos de fabricación con bajas emisiones de carbono en la primera oportunidad disponible, al sustituir o modernizar la capacidad existente (Bataille, Nilsson, et al., 2021). De lo contrario, los países corren el riesgo de perder la oportunidad de alcanzar los objetivos climáticos a tiempo (Vogt-Schilb & Hallegatte, 2014). Se trata de un factor crítico para las estrategias industriales nacionales de los países que pretenden impulsar su propio desarrollo económico a través de la generación de valor agregado en el sector industrial.
- ii. Se está acelerando el énfasis en el comercio internacional con bajas emisiones de carbono.** En las principales economías, como Estados Unidos (EE. UU.), la Unión Europea (UE) y China, la descarbonización de la actividad económica tiene un impulso que quizá conduzca a nuevos requisitos de emi-

siones más estrictos para la certificación y las normas de productos para el comercio internacional. La UE tiene claras aspiraciones de utilizar su posición global y su poder de mercado para hacer del comercio de bienes con bajas emisiones de carbono la “nueva normalidad” y no la excepción. De hecho, la UE impuso nuevos aranceles comerciales a los bienes intensivos en carbono que entrarán plenamente en vigor en 2026 (European Commission, 2021b). Dicha “diplomacia climática” a través del comercio también parece estar cobrando impulso. Estados Unidos y la UE ya formaron una alianza para cooperar en la creación de un mercado de acero y aluminio ecológicos (European Commission, 2021a; Executive Office of the President of the United States, 2021). Estados Unidos está iniciando otras formas de políticas de contratación ecológica. India, el Reino Unido, Canadá, los Emiratos Árabes Unidos y Alemania acordaron colaborar en la elaboración de normas comunes de contratación ecológica (Clean Energy Ministerial, 2021). China también se comprometió a llevar a cabo transformaciones ecológicas en las principales industrias y a crear normas de producto, certificación y sistemas de etiquetado armonizados (National People’s Congress, 2021). Otros actores importantes de las economías del G7 y del G20 podrían unirse para sentar las bases de una nueva zona comercial de bajas emisiones de carbono o de mercados múltiples y superpuestos de bienes con bajas emisiones de carbono antes de 2030. Quedar excluidos de un “club climático” (Nordhaus, 2015) de economías con bajas emisiones de carbono puede poner a los agentes industriales en una situación difícil, obligándoles a realizar grandes inversiones de capital no planificadas y que requieren mucho tiempo, para pivotar hacia una industria con bajas emisiones de carbono en una fase tardía de la partida (Ivleva et al., 2022).

iii. El cambio a cero emisiones netas generará ganadores y perdedores. La naturaleza cambiante de los insumos de producción en un futuro con cero emisiones netas puede crear nuevos ganadores y perdedores (Drake, 2018). Los países con abundantes recursos de energías renovables pueden encontrarse en posiciones ventajosas respecto a los Estados en los que la producción o los ingresos fiscales dependen de los combustibles fósiles. Esto crea la posibilidad de deslocalización y reconfiguración de las industrias establecidas (Gielen et al., 2020; Samadi et al., 2021), y la perspectiva de que los países con recursos de energías renovables se hagan con una parte de la cadena de valor mundial mucho mayor que la actual.

iv. Es probable que los pioneros se beneficien; los rezagados corren el riesgo de quedarse atrás. Las evaluaciones proactivas de las fortalezas, debilidades, oportunidades y desafíos que plantean la transición a una actividad económica neutra en carbono en sectores económicos críticos ofrece la mejor oportunidad de obtener resultados favorables. Un compromiso temprano ofrece a los agentes industriales y a los responsables políticos la mejor oportunidad de anticipar y responder con éxito a las presiones cambiantes en el panorama económico más amplio, evitar la inmovilización de activos y maniobrar para capturar valor a través de las cadenas de suministro (Hallegatte et al., 2013).

Lo imprescindible para la descarbonización de la industria

Las vías de descarbonización de los sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero comparten muchos elementos estratégicos transversales. Estos elementos son importantes no solo para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas en estas industrias específicas, sino también para el amplio abanico de industrias vinculadas a ellas (Bataille et al., 2018; Bataille, Nilsson, et al., 2021; Lechtenböhmer et al., 2016; Rissman et al., 2020). Una hoja de ruta sencilla para la descarbonización industrial incluye los siguientes elementos:

- i.** Hacer que los procesos industriales y el uso de materiales sean lo más eficientes posible desde el punto de vista energético.
- ii.** Cambiar los procesos para utilizar electricidad en lugar de biomasa, carbón, gas natural, petróleo u otras fuentes fósiles.
- iii.** Cambiar al uso de combustibles bajos en carbono (por ejemplo, hidrógeno verde, amoníaco verde, metanol verde) para la combustión cuando el uso de electricidad no sea posible.
- iv.** Adoptar procesos que capturen las emisiones durante la fabricación para utilizarlas como insumos de producción o para su eliminación geológica permanente.
- v.** Conseguir cero residuos mediante la reutilización, el reciclaje y los cambios estructurales para eliminar materiales o productos que no puedan reciclarse (Costello, 2019).
- vi.** Extraer el dióxido de carbono del aire para almacenarlo de forma permanente y verificable cuando no sea posible eliminar las emisiones mediante las opciones anteriores; este debe ser el último recurso.

El liderazgo y la coordinación del gobierno y las asociaciones del sector privado son esenciales para transformar la industria. Cualquier planta o industria que opere de forma aislada y bajo las presiones del mercado no puede emprender los cambios necesarios para hacer realidad la industria con cero emisiones netas. Esto se debe en parte a que el control de infraestructuras críticas, como las redes de electricidad y de combustible, abarca más que cualquier empresa o sector económico individual. Solo los gobiernos pueden marcar la dirección correcta, movilizar capital y financiación a escala y velocidad suficientes, y aprovechar las tecnologías innovadoras para lograr los cambios a gran escala necesarios. Ante la necesidad de cambios masivos y transformadores en las próximas décadas, es fundamental una acción coordinada entre la industria y el gobierno y dentro de los departamentos y niveles gubernamentales (Fazekas et al., 2022). Solo este tipo de asociaciones pueden crear las condiciones que permitan la plena descarbonización de la red eléctrica y la viabilidad y disponibilidad a gran escala de combustibles sintéticos bajos en carbono.

El siguiente análisis de cuatro industrias (plástico, textil, automovilística y pesquera) ofrece una visión tanto de los problemas específicos de estos sectores como de la magnitud de la coordinación y la escala necesarias para lograr el cambio.

Plástico

La producción de plásticos es una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero. Es una industria particularmente difícil de abordar porque los cambios deben producirse en toda la cadena de valor y el ciclo de vida del sector, empezando por los insumos basados en combustibles fósiles, continuando con la energía utilizada para refinar los productos químicos y fabricar productos plásticos, y culminando con la eliminación de los productos al final de su vida útil.

Más del 99% de los plásticos del mundo se fabrican a partir de combustibles fósiles, de los cuales, sólo se recicla entre un 8% y un 15% (Geyer et al., 2017; Mulvaney et al., 2021). A nivel mundial, la mayoría de los residuos plásticos que se recolectan se queman, lo que produce más CO₂, o terminan en vertederos, donde pueden contaminar el agua y los ecosistemas alimentarios (Ahamed et al., 2021; Lau et al., 2020). Por lo tanto, cambiar toda la parte de fabricación de la cadena de suministro de plásticos para utilizar energía limpia, una empresa enorme en sí misma, no es suficiente por sí sola para lograr los objetivos de cero emisiones netas para el sector del plástico.

Las tecnologías para reciclar completamente los plásticos sin emisiones se encuentran en una fase incipiente de desarrollo; aún no se ideó una forma fácil y barata de fabricar plásticos a gran escala sin utilizar combustibles fósiles como materia prima. Lograr la neutralidad de carbono para los plásticos será, por tanto, un esfuerzo a largo plazo. Se necesita una acción coordinada entre gobiernos, productores y consumidores para:

- i.** Eliminar el uso de productos de plástico baratos y desechables.
- ii.** Estudiar la sustitución de plásticos por materiales alternativos.
- iii.** Racionalizar la producción de plásticos para utilizar solo polímeros reciclables.
- iv.** Aumentar los esfuerzos para reciclar los plásticos que aún se mantienen en circulación.

Es probable que estas medidas alteren los modelos de negocio establecidos de los productores existentes; por lo tanto, se necesitará una combinación de presiones normativas, incentivos económicos y avances tecnológicos para provocar cambios transformadores en sus operaciones.

Textil

La producción textil también es una fuente importante de emisiones. Dado que aproximadamente dos tercios de todos los textiles se crean a partir de plásticos (Palacios-Mateo et al., 2021), los problemas que afectan al sector del plástico también afectan al sector textil.

El algodón, la segunda fibra textil más utilizada después de las sintéticas (Juanga-Labayen et al., 2022; Tobler-Rohr, 2011), presenta su propio desafío de descarbonización. La producción agrícola de algodón a gran escala requiere el uso de fertilizantes nitrogenados en cierta medida (Ouikhalfan et al., 2022; Walling & Vaneeckhaute, 2020). Como los cultivos no absorben todo el fertilizante aplicado, ese uso de fertilizantes genera emisiones de óxido nitroso, un potente gas de efecto invernadero (Gregorich et al., 2015). Para hacer frente a este problema, las emisiones residuales deben equilibrarse con sumideros de carbono, ya sea a través de soluciones basadas en la naturaleza, como la plantación de árboles o la expansión de los humedales (Harwatt et al., 2020; Reay, 2020), o mediante el uso de técnicas para eliminar directamente las emisiones de la atmósfera (Hanna et al., 2021).

Para que la fabricación textil sea carbono-neutral, se necesitarán cambios estructurales que permitan una economía más circular. La fabricación de productos que, por la razón que sea, no puedan reciclarse tendrá que eliminarse con el tiempo. Se necesita una acción coordinada entre minoristas, fabricantes y reguladores, y los comportamientos de los consumidores tendrán que cambiar. Estos cambios serán necesarios para eliminar la proliferación de ropa “desechable” y, en su lugar, centrarse en prendas de mayor calidad, con una vida útil más larga y una mayor durabilidad.

Fabricación automotriz

Las tecnologías para descarbonizar la mayor parte de la cadena de valor de la fabricación de automóviles ya existen, pero no los incentivos de mercado y normativos. Para lograr la neutralidad de carbono, la industria debe realizar operaciones de fabricación carbono-neutrales y producir vehículos que ellos mismos no emiten. En el momento de escribir estas líneas (principios de 2023), todos los principales fabricantes de automóviles sacaron o están a punto de sacar al mercado vehículos de propulsión eléctrica, pero la mayoría sigue fabricando y vendiendo vehículos que funcionan con combustibles fósiles.

Una transición rápida para centrarse exclusivamente en la producción de vehículos eléctricos dentro de unas décadas requerirá intervenciones normativas (IEA, 2021d; Rietmann & Lieven, 2019). Además, no bastará con descarbonizar el ensamblaje de los vehículos. Se producen emisiones significativas a lo largo de toda la cadena de valor y el ciclo de vida de la industria, desde las cadenas de suministro de materiales y la fabricación de componentes hasta la eliminación al final de la vida útil de los vehículos y sus diversos componentes. Por lo tanto, la descarbonización debe tener lugar en ambos extremos: en la cadena de suministro que extrae materiales y produce componentes de acero, aluminio, plásticos, vidrio y baterías; y en la eliminación al final de la vida útil de los materiales y las piezas de los vehículos. Las perspectivas para lograr la eliminación de los vehículos al final de su vida útil y la circularidad de los materiales son favorables. Ya es técnicamente posible reciclar casi el 90% del peso de la mayoría de los vehículos (D'Adamo et al., 2020). Sin embargo, para crear las condiciones de mercado necesarias para el reciclado total, serán necesarias tanto medidas normativas como cambios en el diseño de los vehículos que permitan un reciclado casi total (K. E. Daehn et al., 2017; Khodier et al., 2018; Vermeulen et al., 2011; Weidenkaff et al., 2021).

Pesquera

Los buques y las infraestructuras portuarias tienen una larga vida útil (Bullock et al., 2022). Como resultado, es poco probable que la competencia de precios y la innovación tecnológica por sí solas logren la descarbonización a gran escala de la industria pesquera en plazos que puedan ayudar a alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Es casi seguro que se necesitarán intervenciones normativas y de mercado para exigir e incentivar cambios tecnológicos críticos (Cullinane & Yang, 2022; Psaraftis & Kontovas, 2020). Tales intervenciones serán fundamentales tanto a nivel nacional (por ejemplo, para la pesca, las piscifactorías, la producción de piensos, el procesamiento del pescado, el suministro de energía y la cadena de frío/refrigeración) como a nivel internacional (por ejemplo, para las actividades pesqueras en aguas internacionales y el transporte de larga distancia).

Para descarbonizar la cadena de valor de los productos del mar será necesario suministrar a gran escala electricidad carbono-neutral y combustibles sintéticos bajos en carbono, como el amoníaco verde (Al-Aboosi et al., 2021; Zincir, 2022) o los hidrocarburos y alcoholes sintéticos (Helgason et al., 2020; Korberg et al., 2021).

Se deben tomar medidas para abordar las emisiones a lo largo de toda la cadena de valor y el ciclo de vida de los buques utilizados en las operaciones de pesca y piscicultura. Las medidas deberán abordar:

- i.** La construcción de buques (Vakili, Ölçer, et al., 2022; Vakili, Schönborn, et al., 2022).
- ii.** El funcionamiento de los buques pesqueros (Balcombe et al., 2019) y su abastecimiento con combustibles sintéticos bajos en carbono (consultar más arriba).
- iii.** La producción de pellets de pienso para piscifactorías (Hedayati et al., 2019; M. MacLeod et al., 2015).
- iv.** El funcionamiento de las piscifactorías (Bujas et al., 2022; Scroggins et al., 2022; Vo et al., 2021).
- v.** El funcionamiento de las plantas de procesamiento de pescado (Alzahrani et al., 2019, 2020, 2022).
- vi.** La construcción y explotación de buques de carga de larga distancia que transporten productos al mercado (Bouman et al., 2017; Mallouppas & Yfantis, 2021).
- vii.** El reciclaje de los buques al final de su ciclo de vida (Miliotis et al., 2019).

Un primer paso importante sería el diseño de hojas de ruta nacionales para comprender la situación de partida de los sectores de la flota pesquera y la cría de mariscos en cada país y trazar un rumbo hacia las emisiones cero en consonancia con los planes nacionales de descarbonización (Fazekas et al., 2022). Su aplicación requerirá la coordinación entre las partes responsables de la política agrícola, alimentaria e industrial; el transporte marítimo y las actividades marítimas; y el sector del suministro energético, con un apoyo específico a las empresas. La disposición de los buques pesqueros al final de su vida útil requiere un cambio hacia una economía más circular. El carácter internacional del negocio del desguace y reciclado de buques requiere una fuerte coordinación a nivel mundial entre los gobiernos y las organizaciones multilaterales.

Oportunidades y puntos neurálgicos regionales

En este informe surgen una serie de temas comunes. Existen oportunidades y puntos neurálgicos para las tres economías (Véanse los capítulos 5, 6 y 7 para un análisis detallado del panorama político de cada país).

Establecer la ambición política y articular una visión estratégica. Se necesita un marco político y legislativo global que abarque toda la economía para crear la visión estratégica y establecer la autoridad legal que sustente una transición hacia una economía con cero emisiones netas. Esto es fundamental. Dicha visión debe articularse claramente antes de poder crear hojas de ruta estratégicas específicas para cada sector. Colombia, Ecuador y Perú se encuentran en distintas fases de desarrollo en cuanto a la articulación de sus estrategias climáticas y la puesta en marcha de las políticas necesarias para alcanzar los objetivos climáticos que se comprometieron a cumplir. Colombia ya presentó una estrategia climática de largo plazo, con objetivo de alcanzar cero emisiones netas para 2050, a las Naciones Unidas (Gobierno de Colombia, 2021) y está en proceso de revisar su último plan energético nacional (*PEN*) 2020–2050 (UPME, 2019a) con esta visión. Ecuador y Perú presentaron documentos que describen los pasos que pretenden dar para descarbonizar, pero aún no establecen objetivos de llegar a cero emisiones netas (en el momento de escribir estas líneas, principios de 2023). Vale la pena subrayar que la creación de objetivos de carbono neutralidad requiere un pensamiento y unas acciones a largo plazo que se extiendan más allá de los ciclos electorales a corto plazo de los políticos de todo el mundo (Fay et al., 2015). Las políticas energéticas y medioambientales de todos los países se resienten tanto del cortoplacismo general como de los cambios de gobierno, que dan lugar a una priorización incoherente de la estrategia climática. Colombia, Ecuador y Perú no son una excepción. La inestabilidad política sigue siendo un reto para poner en marcha una arquitectura política ambiciosa, a largo plazo y transformadora para la industria que pueda durar más que cualquier administración.

Fomentar la coordinación entre las instituciones y evitar la fragmentación. Las experiencias de otras regiones que desarrollaron estrategias de descarbonización industrial, como el Reino Unido y la UE (BEIS, 2021; Merten et al., 2020), demuestran que se puede generar una primera iteración de tales estrategias en un plazo de tres a cinco años. Este ritmo relativamente rápido es posible siempre que un país cuente con ingredientes clave: una estrategia climática nacional, coordinación entre los departamentos gubernamentales y una base de conocimientos y capacidades institucionales necesarios. En el caso de Colombia, Ecuador y Perú, los principales desafíos radican en el desarrollo de mecanismos para coordinar a los numerosos agentes involucrados en la concepción e implementación de una estrategia de descarbonización. Son muchos los agentes que deben trabajar juntos, incluidos los diversos departamentos de energía, medio ambiente, comercio y transporte; los agentes gubernamentales a todos los niveles; las autoridades reguladoras de múltiples sectores; y las organizaciones y líderes de la industria. La fragmentación de las estrategias e iniciativas industriales de descarbonización entre las ramas y los niveles del gobierno o, peor aún, las políticas que se oponen mutuamente, no harán sino ralentizar o detener el progreso. Además, muchas industrias involucran actores y operaciones que abarcan múltiples países. Por ello, los países de la región que deseen desarrollar su potencial como polos industriales

descarbonizados también podrían desear explorar y buscar una mayor coordinación a nivel regional a través de foros como la *Comunidad Andina*¹ o la *Alianza del Pacífico*.²

Adoptar una energía baja en carbono. Lograr un cambio hacia la producción industrial con cero emisiones netas a tiempo para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París requiere un liderazgo político a gran escala y decisiones de inversión en el suministro de energía para abastecer a todo el país. Esta exigencia va más allá de las competencias o la capacidad de cualquier empresa, instalación o industria individual. Un componente fundamental son las infraestructuras estratégicas a nivel nacional que son competencia directa o indirecta de los gobiernos nacionales. Para adoptar la energía limpia, los gobiernos deben cumplir dos misiones: 1) financiar y construir una red eléctrica de cero emisiones, y 2) facilitar el acceso a combustibles sintéticos bajos en carbono, ya sean importados o de producción nacional (como el hidrógeno o el amoníaco verdes). A menos que se cuente con la infraestructura de apoyo necesaria, las empresas pueden no estar dispuestas o no contar con la capacidad para cambiar los métodos o técnicas de producción basados en combustibles fósiles y adoptar alternativas limpias. Uno de los puntos neurálgicos para los tres países es el rápido calendario necesario para transformar las infraestructuras de suministro energético y la complejidad de pasar de una estrategia fiscal y de exportación centrada en la extracción de combustibles fósiles a otra que adopte la energía limpia como combustible del siglo XXI (Solano-Rodríguez et al., 2021; Welsby et al., 2021). Solo en los próximos 10 años se deben lograr avances sustanciales.

Aprovechar los abundantes recursos de energías renovables y atraer la inversión extranjera directa. Colombia, Ecuador y Perú cuentan con vastos recursos de energías renovables que ofrecen un enorme potencial para alimentar sectores industriales limpios. Sin embargo, los tres países enfrentan retos para el desarrollo de la red. Por ejemplo, los tres países deben fortalecer las conexiones de la red eléctrica entre las zonas de mayor demanda (donde tiene lugar la mayor parte de la actividad industrial existente) y las zonas de mayor potencial de energías renovables (donde la energía hidroeléctrica, eólica y solar puede desplegarse mejor). Ecuador está a la vanguardia en este sentido; en la última década, construyó tanto centrales hidroeléctricas a gran escala como la red asociada para transportar la carga (Ponce-Jara et al., 2018). En Colombia y Perú, los mayores recursos están en gran medida sin explotar. Los tres países tuvieron dificultades para atraer inversiones extranjeras directas al sector del suministro energético. Esto puede deberse a la incertidumbre sobre la dirección futura de la política energética, que a su vez puede haber creado la percepción de un entorno empresarial débil para la inversión en energías renovables. Para contrarrestar esta situación, se requieren medidas que aumenten la confianza en la durabilidad de la política industrial y climática nacional para demostrar el compromiso (por ejemplo, a través de la legislación) y la capacidad (por ejemplo, a través de la coordinación interdepartamental) del gobierno con las metas de descarbonización. El último plan nacional de desarrollo de Colombia (DNP, 2023), que hace hincapié en la reindustrialización intensiva en conocimiento de la economía, es un ejemplo de ello.

Adoptar combustibles limpios y alejarse de los combustibles fósiles. Los agentes de la industria del petróleo y el gas representan poderosos actores económicos en la región. Este sector tiene grandes posibilidades de aportar soluciones muy necesarias al reto de la descarbonización de la industria. Los

1 Todos los países incluidos en este informe son miembros y partes en el Acuerdo de Cartagena de 1969.

2 Tanto Colombia como Perú son miembros, y Ecuador mantiene, al momento de redactar el presente documento (principios de 2023), la condición de observador.

conocimientos y habilidades existentes asociados a la producción y el manejo de productos petroquímicos se traducen muy bien en la fabricación de combustibles sintéticos de bajas emisiones (como el amoníaco verde o el hidrógeno verde) y en la provisión de infraestructuras para la captura y el almacenamiento de carbono. La perspectiva de la producción nacional de combustibles a partir de energías renovables es atractiva en los tres países; un enfoque de este tipo tiene el potencial de mejorar tanto la seguridad energética nacional como de crear una oportunidad de mercado de exportación para suministrar energía a regiones en las que los combustibles de bajas emisiones no pueden producirse a bajo costo. Tanto Colombia como Perú comenzaron a desarrollar hojas de ruta para la producción nacional de hidrógeno verde. Los tres países podrían explorar la posibilidad de establecer agrupaciones industriales neutras en gases de efecto invernadero para que las empresas puedan compartir el acceso a infraestructuras críticas de transporte y almacenamiento de electricidad limpia de alto voltaje, captura de carbono, hidrógeno verde y amoníaco verde. Se trata de una decisión intrínsecamente política, ya que requiere una planificación espacial de la producción industrial. Al mismo tiempo, este enfoque podría utilizarse de forma estratégica, buscando deliberadamente mejorar los medios de vida de diversas maneras. Por ejemplo, este enfoque podría utilizarse para mejorar las infraestructuras de apoyo (carreteras, agua, electricidad) y para crear oportunidades en regiones económicamente deprimidas.

Fomentar la circularidad de los materiales y mejorar la gestión de residuos. Como la mayoría de los países del mundo, Colombia, Ecuador y Perú están muy lejos de alcanzar la circularidad material. Se requieren normativas y políticas que creen incentivos de mercado para el diseño ecológico de productos que permitan un mejor reciclaje, mejoren las infraestructuras de recolección y reciclaje de residuos y eliminan de manera gradual la producción de bienes que no puedan reciclarse. Si bien la situación está mejorando, sigue habiendo problemas en toda la región, como lo demuestra la eliminación incontrolada de residuos en vertederos abiertos, las fugas de desechos a entornos naturales y los gases de efecto invernadero procedentes de los residuos. Colombia es un líder regional en la reflexión sobre la economía circular ya que elaboró su primer documento de estrategia nacional en el que se esboza cómo orientar la gestión de residuos en esta dirección (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio, 2019). El gobierno peruano también manifestó su intención de orientar la política industrial en esta dirección aprobando los principios de una hoja de ruta para la economía circular (Gobierno del Perú, 2020b).

Próximos pasos

Este informe proporciona un marco para reflexionar sobre las formas de lograr una producción industrial limpia en la región andina. Constituye un punto de partida para la elaboración de hojas de ruta más detalladas, la planificación de estrategias industriales y el análisis exploratorio de escenarios sobre las repercusiones económicas, políticas y medioambientales. Urge seguir trabajando en el desarrollo de políticas eficaces para abordar los problemas emergentes. Por ejemplo, las políticas se beneficiarían de:

- Examinar los proyectos de descarbonización que tuvieron éxito mediante estudios de casos en la región andina.
- Realizar análisis cuantitativos para explorar y comprender el potencial de reducción de emisiones por sector y por país.

- Estudiar las sinergias y compensaciones entre diferentes opciones estratégicas en sectores industriales con importantes solapamientos (por ejemplo, plásticos y textiles).
- Analizar diferentes políticas (por ejemplo, reforma de los subsidios a los combustibles fósiles, subvenciones tecnológicas, diferentes mecanismos reguladores) para explorar su viabilidad e impactos en las vías de descarbonización industrial.
- Analizar las formas en que los diferentes niveles de gobernanza (por ejemplo, local, nacional, regional e internacional) pueden apoyar los esfuerzos para descarbonizar las industrias en la región andina.
- Estudiar los posibles beneficios colaterales medioambientales (por ejemplo, la calidad del aire, el suelo y el agua) de las estrategias de descarbonización para la industria.
- Llevar a cabo un análisis espacial de los recursos energéticos y los centros de demanda industrial como medio para comprender las prioridades futuras de la planificación de infraestructuras.
- Analizar los costos de transición de la descarbonización industrial a lo largo del tiempo y los mecanismos de financiación para alcanzar los objetivos.
- Realizar análisis detallados de los mercados de capital y de trabajo para cada sector industrial.

Como subraya este informe, los esfuerzos para lograr una transformación de esta envergadura requieren medidas que puedan trascender las visiones a corto plazo y abordar cuestiones clave de la economía política en general. Es decir, una transición industrial de tal magnitud debe tener en cuenta las ramificaciones a lo largo del tiempo en los principales actores y grupos de interés de cada país: en los departamentos gubernamentales, los grupos de presión empresariales e industriales, las Organizaciones no gubernamentales (ONG), los grupos de la sociedad civil, los partidos políticos, los movimientos sociales y sindicales, y entre los intereses que operan a escala internacional, nacional, estatal y local. El compromiso directo con los grupos clave a todos los niveles es un requisito para diseñar y ejecutar estrategias duraderas y eficaces de descarbonización que puedan funcionar para las personas, las industrias, los países y el planeta. Muchos de los obstáculos técnicos se superaron o están a punto de superarse. De hecho, las barreras tecnológicas para alcanzar los objetivos de cero emisiones netas son menores que las que hay que superar para coordinar la acción entre los actores clave, mediar en los conflictos entre intereses diferentes y contrapuestos, y garantizar así una transición justa (Saget et al., 2020). La aceptación social y política generalizada de que la próxima transición será justa y equitativa en los esfuerzos por hacer que las industrias sean ecológicas y limpias es fundamental para crear cambios estructurales duraderos que puedan superar la inercia sistémica asociada a dos siglos de producción industrial de altas emisiones.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOSIII

RESUMEN EJECUTIVO RETOS Y OPORTUNIDADES PARA LA REGIÓN ANDINA V

Argumentos a favor de la industria con cero emisiones netas	VI
Lo imprescindible para la descarbonización de la industria	VIII
Oportunidades y puntos neurálgicos regionales	XII
Próximos pasos	XIV

PARTE 1 ANÁLISIS TÉCNICO1

CAPÍTULO 1 FABRICACIÓN DE PLÁSTICOS.....3

1.1 Conclusiones principales	3
1.2 Descripción general de las emisiones de la industria del plástico	4
1.3 Opciones de descarbonización para los plásticos	6
1.4 Estrategia de aplicación	9

CAPÍTULO 2 INDUSTRIA TEXTIL 11

2.1 Conclusiones principales	11
2.2 Descripción general de las emisiones de la industria textil	12
2.3 Opciones de descarbonización para el sector textil	14
2.4 Estrategia de aplicación	16

CAPÍTULO 3 INDUSTRIA AUTOMOVILÍSTICA 17

3.1 Conclusiones principales	17
3.2 Descripción general de las emisiones de la industria automovilística	18
3.3 Opciones de descarbonización para la industria automovilística	21
3.4 Estrategia de aplicación	23

CAPÍTULO 4 INDUSTRIA PESQUERA.....25

4.1 Conclusiones principales	25
4.2 Descripción general de las emisiones de la industria pesquera	25
4.3 Opciones de descarbonización para la industria pesquera	30
4.4 Estrategia de aplicación	33

PARTE 2 ANÁLISIS POR PAÍS.....35

CAPÍTULO 5 COLOMBIA.....37

5.1 Conclusiones principales	37
5.2 Descripción general	38
5.3 Descarbonización de la industria del plástico en Colombia	40
5.4 Descarbonización de la industria textil en Colombia	42
5.5 Descarbonización de la industria automovilística en Colombia	45
5.6 Descarbonización de la industria pesquera en Colombia	47
5.7 Hacia una industria de plásticos, textil, automovilística y pesquera con cero emisiones netas en Colombia	50
5.8 Conclusiones	55

CAPÍTULO 6

ECUADOR57

6.1 Conclusiones principales	57
6.2 Descripción general	58
6.3 Descarbonización de la industria del plástico en Ecuador	60
6.4 Descarbonización de la industria textil en Ecuador	62
6.5 Descarbonización de la industria automovilística en Ecuador	65
6.6 Descarbonización de la industria pesquera en Ecuador	68
6.7 Hacia una industria de plásticos, textil, automovilística y pesquera con cero emisiones netas en Ecuador	71
6.8 Conclusiones	76

CAPÍTULO 7

PERÚ77

7.1 Conclusiones principales	77
7.2 Descripción general	78
7.3 Descarbonización de la industria del plástico en Perú	80
7.4 Descarbonización de la industria textil en Perú	83
7.5 Descarbonización de la industria automovilística en Perú	85
7.6 Descarbonización de la industria pesquera en Perú	88
7.7 Hacia una industria de plásticos, textil, automovilística y pesquera con cero emisiones netas en Perú	90
7.8 Conclusiones	94

REFERENCIAS95

ANÁLISIS TÉCNICO

CAPÍTULO 1

FABRICACIÓN DE PLÁSTICOS

1.1 Conclusiones principales

La producción de plásticos es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero y un sector en particular difícil para la transición hacia cero emisiones netas.

Las estrategias clave para lograr la transición hacia cero emisiones netas en la parte de fabricación del ciclo de vida del producto son los procesos de eficiencia energética, la electrificación con electricidad de red descarbonizada y el cambio a combustibles sintéticos sin emisiones como el hidrógeno verde utilizado para la generación de calor en procesos de alta temperatura.

Los principales retos para conseguir plásticos con cero emisiones netas no proceden de las partes del ciclo de vida dedicadas al refinado y los productos acabados, sino de los segmentos de extracción de recursos aguas arriba y eliminación al final de la vida útil.

Punto neurálgico: la sustitución aguas arriba de combustibles fósiles por materias primas alternativas no presenta soluciones relativamente baratas o fáciles que estén disponibles a nivel comercial a escala. No está claro si las futuras innovaciones en investigación y desarrollo permitirán comercializarlas en un plazo que permita cumplir los objetivos de descarbonización.

Punto neurálgico: es poco probable que el reciclaje sea la panacea para las emisiones y los residuos de la producción de plásticos. Pasar a un flujo de materiales más circular ofrece una vía para mitigar algunos de los daños medioambientales asociados a la cadena de valor existente, pero las tecnologías para reciclar completamente los plásticos sin emisiones se encuentran solo en una fase incipiente de desarrollo tecnológico. En consecuencia, se requiere una acción coordinada entre gobiernos, productores y consumidores para eliminar el uso de productos de plástico baratos y desechables, explorar la sustitución de los plásticos por materiales alternativos, promover los principios del diseño ecológico, racionalizar la producción de plásticos limitándola a los polímeros susceptibles de ser reciclados y redoblar los esfuerzos para reciclar los plásticos que aún se mantienen en circulación.

Punto neurálgico: todo lo anterior puede alterar los modelos de negocio establecidos de los productores existentes. Es posible que se necesite una combinación de presiones normativas e incentivos para provocar cambios transformadores en sus operaciones. Será necesaria una acción coordinada entre la industria y el gobierno para crear las condiciones que permitan la plena descarbonización de la red eléctrica y la disponibilidad a escala de combustibles sintéticos bajos en carbono, como el hidrógeno verde.

1.2 Descripción general de las emisiones de la industria del plástico

Los materiales plásticos tienen una gran demanda y se fabrican principalmente a partir de combustibles fósiles. La industria del plástico crea materiales poliméricos sintéticos que se utilizan en la fabricación de productos para otros subsectores, como envases, construcción, electrónica de consumo y componentes para vehículos (por ejemplo, automoción, aeroespacial, náutica). También incluiremos en este debate a los cauchos sintéticos, ya que son materiales poliméricos fabricados con los mismos principios generales (técnicas, equipos, materias primas) que los plásticos. La mayoría de los plásticos de uso generalizado en la actualidad se fabrican a partir de combustibles fósiles; como tal, la industria del plástico puede considerarse parte de las industrias química y petroquímica más amplias. La demanda mundial de plásticos ha crecido alrededor del 4% anual desde 2000 (Geyer et al., 2017), lo que representa la categoría de mayor crecimiento de todos los materiales a granel (IEA, 2018).

Los plásticos representan una fuente importante de emisiones de GEI. Gran parte de la literatura mediambiental sobre plásticos se centra en los residuos plásticos y sus implicaciones para los ecosistemas y la salud humana a través, por ejemplo, de los microplásticos en los océanos (Jambeck et al., 2015) y la lluvia de plástico (Brahney et al., 2020). Pero la producción de plástico a partir de combustibles fósiles también contribuye significativamente a las emisiones de GEI a la atmósfera, se estima que la industria del plástico representa alrededor del 4% del total de las emisiones mundiales, y que la producción de los plásticos más comunes que se utilizan en la actualidad genera algo más de 4 kg de CO₂e (kilogramos de CO₂ equivalente) por kg de plástico producido (Zheng & Suh, 2019). Las Naciones Unidas y representantes de 175 países se comprometieron recientemente a crear un acuerdo internacional jurídicamente vinculante para poner fin a la contaminación por plásticos que entraría en vigor en 2024 (*United Nations Draft Resolution UNEP/EA.5/L.23/Rev.1: End Plastic Pollution: Towards an International Legally Binding Instrument*, 2022). La fabricación de plásticos produce emisiones de GEI que calientan el planeta en varias etapas clave (i-v) del ciclo de vida del producto.

i. Extracción de recursos aguas arriba

La asociación industrial European Bioplastics calcula que en 2021 solo alrededor del 1% de la producción mundial total de plásticos corresponderá a plásticos de origen biológico (European Bioplastics, 2021). Las principales materias primas para la producción de plásticos son los combustibles fósiles, por lo general, petróleo crudo o gas natural. Por lo tanto, por definición, la producción del 99% restante de los plásticos del mundo implica emisiones asociadas a la extracción, el refinado y el transporte de materias primas basadas en combustibles fósiles hasta el sitio de producción. Las emisiones incluyen las emisiones directas de la extracción, como las fugas de metano y la quema en antorcha (Scarpelli et al., 2020), las emisiones liberadas por la combustión en los equipos de perforación y refinado (Jing et al., 2020), el lugar de trabajo y los vehículos de transporte de combustible a granel (remolques cisterna, barcos, etc.). Las emisiones también se asocian a la electricidad de red utilizada en estos procesos (a menos que la propia red esté descarbonizada).

ii. Producción de resinas

La etapa de producción de resinas (también llamada refinado de plásticos) consiste en la síntesis química de polímeros a granel. Básicamente, se trata de utilizar altas temperaturas y presiones para crear productos químicos intermedios (monómeros) a partir de combustibles fósiles antes de mezclarlos con colorantes, estabilizadores y otros aditivos (el proceso preciso varía según el tipo de plástico) para crear diversos tipos de plástico de uso final (polímeros) como el polietileno, el polipropileno y el cloruro

de polivinilo. Según la aplicación a la que se destinen, pueden tomar la forma de láminas planas, tubos, varillas, gránulos o polvos (American Chemistry Council (ACC) & Franklin Associates, 2010). Todos estos procesos implican el suministro de energía para el funcionamiento de bombas, compresores, motores, iluminación y otros equipos especializados necesarios para mover los productos sólidos y líquidos por la refinería o la fábrica, así como la energía térmica necesaria para diversas reacciones químicas y para permitir los cambios de fase de los materiales (por ejemplo, de sólido a líquido). Los GEI se liberarán tanto directamente de la combustión de combustibles fósiles in situ para la producción de calor a alta temperatura como de las emisiones indirectas asociadas al suministro de electricidad de la red eléctrica (a menos que esta sea ya una red de cero emisiones).

iii. Transformación de polímeros en productos

La transformación de polímeros a granel en productos finales se basa en diversos procesos industriales, como el moldeo por inyección, el moldeo por soplado, el termoformado y la extrusión (Franklin Associates, 2011). Si bien los procesos varían entre sí en cuanto a sus detalles específicos, todos requieren aportes de energía para alimentar las fuerzas mecánicas, proporcionar iluminación (incluidos los láseres), calentar y enfriar el equipo y los productos.

iv. Transporte de productos al mercado

A menos que se utilicen directamente en el lugar de fabricación, la mayoría de las cadenas de valor implicarán el transporte de productos plásticos a otras empresas de fabricación o a minoristas para su venta a los usuarios finales. La mayoría de los mecanismos de transporte de mercancías dependen de los combustibles fósiles (IEA, 2021g).

v. Eliminación al final de la vida útil

Las opciones de eliminación de los plásticos al final de su vida útil incluyen enviar los residuos al vertedero, incinerar los artículos o reciclarlos (CEIL, 2019). Enviar los residuos al vertedero produce el perfil de GEI más bajo de las tres opciones, pero introduce otros riesgos significativos, principalmente la contaminación por partículas de plástico de los ecosistemas hídricos y alimentarios, con repercusiones para la salud humana (Ahamed et al., 2021; Lau et al., 2020). El perfil de los GEI liberados por los plásticos en descomposición en el medio natural depende del plástico concreto de que se trate. Por ejemplo, el polietileno se degrada y produce metano y etileno (ambos son GEI) cuando se expone al agua o a la luz solar. La incineración es la opción de eliminación más intensiva en emisiones; además, la liberación de GEI a la atmósfera crea una serie de riesgos adicionales para el medio ambiente y la salud humana derivados de las partículas de plástico y las toxinas transportadas por el aire. El reciclado de plásticos ofrece la vía con menos GEI, pero se ve limitado por problemas como los elevados costos de mano de obra y capital para separar y procesar eficazmente los plásticos, y una gama limitada de aplicaciones para los plásticos reciclados en comparación con los plásticos recién producidos a partir de material virgen. Los métodos de reciclado se dividen en dos categorías principales: mecánicos y químicos (Meys et al., 2020) (que, por extensión, incluyen las enzimas biológicas (Singh et al., 2021)). El reciclado mecánico es el más común y consiste en limpiar y clasificar el plástico antes de cortarlo en fragmentos y fundirlo para producir un flujo de material reutilizable (en su mayor parte) libre de impurezas. El reciclado químico consiste en volver a transformar los residuos plásticos en monómeros. Cabe señalar que el reciclado químico es una tecnología aún en pañales (Ragaert et al., 2017) y que la sostenibilidad general del reciclado químico sigue siendo controvertida (Mah, 2021).

1.3 Opciones de descarbonización para los plásticos

Se pueden realizar intervenciones tecnológicas para eliminar las emisiones a lo largo del ciclo de vida de los plásticos. El carbono es el elemento principal de los materiales plásticos, por lo que la descarbonización en el contexto de los plásticos es un oxímoron. Sin embargo, el término es de uso generalizado para describir el concepto de desvinculación de la producción de plásticos de los combustibles fósiles o la creación de plásticos sin liberar GEI a la atmósfera. Las primeras iniciativas corporativas, como el objetivo de IKEA de usar solo bioplásticos en sus productos o la producción por parte de Coca-Cola de una botella con contenido de bioplástico (Coca-Cola Company, 2015) representan pasos graduales en la dirección correcta, pero no alcanzan la ambición requerida para que el uso continuo de plásticos se ajuste a los objetivos del Acuerdo de París. Analizamos aquí opciones específicas para reducir la huella de emisiones de la producción de plásticos en cada etapa (i-v) del ciclo de vida del producto.

i. Extracción de recursos aguas arriba

Desvincular la fabricación de plásticos de las materias primas de combustibles fósiles sin disminuir eliminaría las emisiones asociadas a la extracción de petróleo o gas natural del ciclo de vida del producto. Existen varias opciones para reemplazar los átomos de carbono necesarios para los plásticos por fuentes de combustibles no fósiles. Entre ellas están (a) crear bioplásticos a partir de biomasa, (b) reciclar carbono del aire para crear plásticos a base de dióxido de carbono, o (c) reciclar carbono de los residuos para crear plásticos a base de dióxido de carbono.

a) Creación de bioplásticos a partir de biomasa

La sustitución de materias primas fósiles por biomasa es una recomendación frecuente en los estudios sobre la reducción de emisiones en la producción de plásticos (Rosenboom et al., 2022; Saygin & Gielen, 2021; Scott et al., 2020; Zheng & Suh, 2019). El cultivo de biomasa se puede utilizar como materia prima para sustituir a los plásticos comunes (por ejemplo, el polietileno obtenido a partir del etanol de la caña de azúcar) (Negri & Lighthart, 2021), o para producir tipos de plástico totalmente nuevos (por ejemplo, la polilactida, también llamada ácido poliláctico (PLA)) (Griffin et al., 2018). El principal desafío al que se enfrentan los bioplásticos es que su desarrollo se verá probablemente limitado por la preocupación que suscita su sostenibilidad general, teniendo en cuenta el cambio en el uso de la tierra y la competencia con los cultivos destinados a la alimentación (Brodin et al., 2017; European Commission, 2018; Nanda et al., 2015).

b) Reciclaje del carbono del aire para crear plásticos a base de dióxido de carbono

En principio, el carbono del dióxido de carbono se puede combinar con el hidrógeno del agua para crear los hidrocarburos necesarios para fabricar cualquier tipo de plástico (Lange, 2021; Palm et al., 2016; Palm & Svensson Myrin, 2018). Capturar el dióxido de carbono del aire, uno de los principales gases de efecto invernadero, es una de las características de muchos escenarios de mitigación del cambio climático (Realmonte et al., 2019), aunque aspectos clave, como la viabilidad económica y tecnológica de esta estrategia, siguen siendo controvertidos (Chatterjee & Huang, 2020). La creación de productos útiles a partir de este flujo de residuos tiene el beneficio de evitar su circulación atmosférica; sin embargo, la eliminación (consulte la etapa (v)) representa una fuente potencial de emisiones si estos productos llegan al final de su vida útil. Una desventaja de los plásticos basados

en dióxido de carbono a partir del CO₂ capturado en el aire es la intensidad energética del proceso, que puede aumentar su costo entre dos y tres veces más que los plásticos basados en combustibles fósiles (Palm et al., 2016).

c) Reciclaje del carbono de los residuos para crear plásticos a base de dióxido de carbono

Una tercera fuente potencial de carbono para su uso como materia prima de plásticos es, de hecho, el reciclado de plásticos de desecho (Carus et al., 2020) o materias primas de desecho (Moretti et al., 2020). La viabilidad tecnológica y comercial de los distintos enfoques no se conoce bien y puede requerir importantes inversiones en investigación y desarrollo. Los esfuerzos realizados en el pasado se abandonaron antes de alcanzar la escala comercial (Ren & Patel, 2009).

ii. Producción de resinas

La producción de los productos químicos intermedios que intervienen en la fabricación de resinas poliméricas implica reacciones químicas bajo calor y presión. Los requisitos de calentamiento típicos en el refinado de plásticos varían, pero las temperaturas de reacción oscilan entre 700 y 950 °C (Le Van Mao et al., 2013). Por ejemplo, el polietileno, el plástico más común en volumen, suele fabricarse convirtiendo líquidos de gas natural en etileno en una planta llamada craqueador de etano, que requiere calor a alrededor de 850 °C (Posch, 2011). El suministro de este calor a partir de recursos no fósiles es un requisito para la producción de plásticos con cero emisiones netas. Para el craqueo al vapor a alta temperatura, la principal opción de descarbonización es utilizar hidrógeno renovable como combustible en lugar de gas natural u otros combustibles fósiles. Esto ya es tecnológicamente viable hoy en día, pero requiere la creación de una infraestructura de apoyo para el hidrógeno en la industria (por ejemplo, como propone el gobierno federal de Alemania (BMWi, 2020)). Una alternativa que está en desarrollo pero que aún no maduró a nivel tecnológico a escala es el craqueo electroquímico del etileno a temperaturas mucho más bajas (menos de 400 °C), que en principio podría utilizar la energía de una red eléctrica con cero emisiones netas (Tullo, 2021).

iii. Transformación de polímeros en productos

Las principales estrategias para eliminar las emisiones procedentes de la transformación de polímeros a granel en productos plásticos son la mejora de la eficiencia energética, la electrificación de la energía de proceso siempre que sea posible (Negri & Ligthart, 2021; Van Geem et al., 2019), el cambio a combustibles con cero emisiones de carbono cuando la electrificación no sea factible (Rissman et al., 2020) y la captura de emisiones (Lange, 2021). Los requisitos de calentamiento en la producción de plásticos oscilan entre 50 °C (para el precalentamiento) y 300 °C (para el moldeo por inyección a alta temperatura). En los últimos 10 años se produjo una mejora significativa en las temperaturas de suministro de las bombas de calor, y las soluciones comerciales de múltiples fabricantes pueden suministrar calor en el rango de 90-150 °C; en un futuro próximo, es probable que también sea posible superar los 150 °C, con muchos proyectos de demostración y comercialización recientemente completados o a punto de completarse (Arpagaus et al., 2018). La electrificación con electricidad de red descarbonizada y la provisión de infraestructuras de hidrógeno verde requieren decisiones políticas y de inversión a gran escala que van más allá del nivel de las plantas de fabricación individuales (Lechtenböhmer et al., 2016).

iv. Transporte de productos al mercado

Para alcanzar los objetivos de cero emisiones netas, casi todas las formas de transporte de mercancías (carretera (Meyer, 2020), ferrocarril (IEA, 2019; Rungskunroch et al., 2021), aviación (Bauen et al., 2020; IEA, 2021c; Schäfer et al., 2019), transporte marítimo (Bouman et al., 2017; IEA, 2021e; Mallouppas & Yfantis, 2021)) deberán descarbonizarse utilizando electricidad o combustibles sintéticos sin GEI, como el hidrógeno verde.

v. Eliminación al final de la vida útil

No existen pruebas que respalden las afirmaciones de muchos fabricantes de que los bioplásticos son intrínsecamente inocuos para el medio (Walker & Rothman, 2020). El origen biológico de las moléculas no influye en los problemas que plantea su eliminación. Los llamados plásticos biodegradables son problemáticos, ya que las enzimas y las condiciones ambientales necesarias para que se descompongan por completo a menudo no se dan en la naturaleza (Ajayi & Reiner, 2020; Narayan, 2012; Palm & Svensson Myrin, 2018), y en el proceso de descomposición se liberan gases de efecto invernadero. Los defensores de los bioplásticos argumentan que las emisiones se capturan durante el proceso de cultivo de las materias primas vegetales, lo que hace que el proceso de descomposición global sea en cierto modo neutro; sin embargo, para que esto sea cierto, muchos otros aspectos de la producción también tendrían que ajustarse para reducir las emisiones derivadas del uso de fertilizantes intensivos en combustibles fósiles y de la cosecha agrícola, así como del transporte; los aditivos del plástico también tendrían que lograr cero emisiones netas (Bishop et al., 2021). El reciclado es la única opción real para mantener los plásticos fuera del circuito de emisiones, pero los planteamientos actuales están plagados de problemas. Se calcula que solo se recicla entre el 8% y el 15% de los plásticos (Geyer et al., 2017; Mulvaney et al., 2021), y de ellos, solo alrededor del 2% se reciclan en productos con prácticamente la misma función que el original, porque el reciclado produce polímeros de menor calidad (Ellen MacArthur Foundation, 2017b). Además, los plásticos reciclados suelen estar contaminados con sustancias químicas tóxicas para la salud humana (Caballero et al., 2016; Pivnenko et al., 2016). Conseguir que los plásticos actuales sean más reciclables o que se biodegraden en materiales inocuos a través de su diseño físico o químico puede requerir una química de polímeros totalmente nueva (Gandini, 2008; Hatti-Kaul et al., 2020) y que la industria se replantee por completo el proceso de diseño de productos para la fase de fin de vida (K. Daehn et al., 2022). Incluso algunos de los planes de acción más ambiciosos en materia de reciclado de plásticos de la UE, líder en el ámbito de la economía circular, reconocen actualmente que, aun así, es posible que las emisiones solo se reduzcan a la mitad (EIT Climate-KIC, 2021).

1.4 Estrategia de aplicación

Crear una industria de plásticos sin emisiones es mucho más difícil que pasar a la energía y los materiales ecológicos. El mero uso de energías renovables no ajusta la fabricación y el uso de plásticos a las ambiciones de descarbonización, ya que la eliminación al final de la vida útil representa una parte significativa de las emisiones (CEIL, 2019). Lograr cero emisiones netas en el ciclo de vida de los plásticos exige apartarse totalmente de la cadena establecida de producción, consumo y eliminación, y requiere medidas a nivel de gobiernos nacionales y colaboración internacional entre países (Barrowclough & Birkbeck, 2022). Los conceptos transformadores que van mucho más allá de la propia fabricación de plásticos incluyen la eliminación de los plásticos desechables; la reinención de los envases, las normas de envasado y el diseño de envases para su reutilización; la creación y el fortalecimiento de los mercados para la reutilización de productos de plástico; y la adopción de la economía circular a través de nuevos marcos globales sobre el comercio y la regulación (K. Daehn et al., 2022; Ellen MacArthur Foundation, 2017b; Mulvaney et al., 2021; World Economic Forum et al., 2016). Como resultado de los retos debatidos y del plazo extremadamente corto para alinear la industria con los objetivos basados en el Acuerdo de París (es decir, esta década), la reducción de la demanda total de plásticos también es una dimensión importante que hay que abordar. Algunos ejemplos son el diseño de productos para que las piezas se puedan reutilizar y reemplazar, la reducción de la cantidad de plásticos en los productos, la ampliación de la vida útil y la durabilidad de las piezas de plástico que permanecen en uso, el fomento de comportamientos menos derrochadores en relación con los productos de plástico y la sustitución de los plásticos por otros materiales (UNCTAD, 2023) (por ejemplo, madera y metal en la construcción, fibras naturales en los envases (Scott et al., 2020)).

Avanzar seriamente hacia los plásticos con cero emisiones netas representa una amenaza significativa para la forma en que los actores establecidos hicieron negocios en el pasado, y representa un posible punto neurálgico para la transición. Introducir estos cambios transformadores representa un gran desafío para las industrias establecidas, ya que amenaza sus prácticas, modelos de negocio y uso de recursos establecidos. En un mundo que declaró su ambición de reducir las emisiones a cero netas, la industria petroquímica ve una gran oportunidad para pasar de la producción de combustibles a la producción de materias primas, es decir, de la producción de sustancias químicas para quemarlas y obtener energía a la producción de sustancias químicas para fabricar productos (Cui, 2020; Tullo, 2019). Pero, como ya comentamos anteriormente, eliminar la extracción de combustibles fósiles de la cadena de suministro es un pilar fundamental para avanzar hacia la producción de plásticos sin emisiones. Las industrias de los combustibles fósiles, la petroquímica y los plásticos están estrechamente interconectadas por estructuras organizativas y materiales. Comparten una base común de conocimientos disciplinarios (ingeniería química), vínculos corporativos (por ejemplo, las empresas petroquímicas y las de plásticos suelen ser accionistas clave de las empresas de la otra parte) y pueden compartir personal ejecutivo (F. Bauer et al., 2018). Las empresas existentes son reacias a ver sus principales centros de beneficios eliminados por medidas gubernamentales o de los consumidores para cumplir con los objetivos de descarbonización basados en el Acuerdo de París. Los investigadores documentaron los esfuerzos que están realizando las empresas para maximizar el mercado futuro de los plásticos desechables con alto contenido de GEI, asegurándose que no se promulguen leyes que fomenten flujos de recursos más circulares ni se realicen esfuerzos para cambiar a los bioplásticos, sobre todo tratando de desviar el énfasis de estas discusiones hacia un potencial de reciclaje hipotético utilizando tecnologías no probadas (F. Bauer & Fontenit, 2021; Mah, 2021). Este tipo de estrategias

reactivas son típicas de las industrias que subestimaron el ritmo de los cambios en la regulación (Hurmelinna-Laukkanen et al., 2021). La dinámica de poder regional y nacional entre los gobiernos y los agentes industriales es compleja y variada. Abordar este reto puede exigir que los responsables políticos utilicen requisitos normativos y ofrezcan incentivos para que las industrias consideren la posibilidad de cambiar de rumbo a escala y en plazos adecuados.

CAPÍTULO 2

INDUSTRIA TEXTIL

2.1 Conclusiones principales

La producción textil es una fuente importante de emisiones. El sector está estrechamente vinculado a la producción de plásticos, ya que alrededor de dos tercios de todos los textiles producidos en la actualidad se crean a partir de plásticos. Por tanto, todas las conclusiones del capítulo 1 se aplican por igual a los textiles fabricados total o parcialmente a partir de plásticos.

El algodón es la segunda fibra textil más utilizada después de las sintéticas. El cultivo de algodón con cero emisiones netas requiere no solo energía libre de combustibles fósiles en las operaciones agrícolas y la producción de fertilizantes, sino también cierto equilibrio de las emisiones residuales con los sumideros de carbono. Esto se debe a que parece inevitable cierto nivel de emisiones de GEI por el uso de fertilizantes nitrogenados, ya que no todos los fertilizantes aplicados pueden ser absorbidos al 100% por los cultivos.

Oportunidad: los avances en el diseño y el rendimiento de las bombas de calor significan que los procesos de fabricación textil (incluidas los requisitos de calentamiento de los procesos) pueden abastecerse ahora, en principio, totalmente de electricidad descarbonizada de la red, lo que será una estrategia clave para alcanzar cero emisiones netas en el sector.

Punto neurálgico: se requiere una acción coordinada entre minoristas, fabricantes y reguladores para eliminar la ropa desechable y centrarse en prendas de mayor calidad, vida útil y durabilidad. Se trata de un reto porque requiere una acción política a múltiples escalas y jurisdicciones, y altera el modelo comercial de “moda rápida” de muchos productores.

Punto neurálgico: es probable que la creación de la infraestructura necesaria para apoyar una industria textil sin emisiones netas requiera una acción coordinada entre la industria y el gobierno, ya que es necesaria la descarbonización a gran escala de la red eléctrica. A su vez, es probable que el fomento de la inversión en tecnologías limpias requiera intervenciones normativas y el fortalecimiento de las instituciones y las estructuras de gobernanza (Mielke & Steudle, 2018).

2.2 Descripción general de las emisiones de la industria textil

La industria textil es una cadena de valor compleja con una base de materias primas diversa. La industria textil engloba una amplia gama de actividades destinadas a fabricar productos de fibras entrelazadas para usos finales como prendas de vestir, envases, mobiliario doméstico y materiales de construcción. Las materias primas para la producción textil son diversas y proceden principalmente de plantas (por ejemplo, el algodón) y productos químicos sintéticos (por ejemplo, fibras de polímeros como el nailon), aunque otras fuentes notables son los animales (por ejemplo, la lana de oveja) y los minerales (por ejemplo, la fibra de vidrio). La mayor aplicación individual de los textiles es la ropa (~73%), seguida de diversas aplicaciones técnicas en las industrias de la construcción, el transporte y la medicina (~15%) y el mobiliario doméstico (~9%) (Uddin, 2019). Durante la última década, el poliéster y el algodón han sido los dos textiles más demandados en masa (Juanga-Labayen et al., 2022; Tobler-Rohr, 2011), y la cuota del poliéster ha ido creciendo con el tiempo. Esto sigue una tendencia general que comenzó en la década de 1970, con las fibras sintéticas desplazando de forma progresiva a las fibras naturales (Shishoo, 2012), y Asia sustituyendo a Europa como centro de producción dominante (Nayak & Padhye, 2015; Scheffer, 2012). Alrededor de dos tercios de todas las fibras producidas en la actualidad son sintéticas (Palacios-Mateo et al., 2021), lo que vincula estrechamente la producción textil y la industria petroquímica. La demanda mundial de textiles crece de forma continua a lo largo del tiempo y se estimó en 110 millones de toneladas en 2018 (Juanga-Labayen et al., 2022).

El sector textil es una fuente importante de emisiones de GEI. Se estima que las emisiones de la industria textil ascienden a 1200 millones de tCO₂e (toneladas equivalentes de CO₂), es decir, más que todo el sector de la aviación y el transporte marítimo juntos (Ellen MacArthur Foundation, 2017a). Aunque la gran variedad de tipos de textiles y sus aplicaciones de uso final dificultan las generalizaciones, la fabricación de estos productos es un proceso que consume mucha energía y agua (Muthu, 2014). Se estima que la producción de las formas más comunes utiliza entre 15 y 36 kg de CO₂e por kg de fibra (Beton et al., 2014). Centrándonos en los tipos de fibra más comunes, se calcula que el ciclo de vida completo de 1 kg de poliéster es responsable de unos 30 kgCO₂e; en el caso del algodón, el valor equivalente es de 20 kgCO₂e (Beton et al., 2014). A continuación, describimos varias etapas clave (i-iv) del ciclo de vida del producto que generan emisiones de GEI.

i. Extracción de recursos aguas arriba

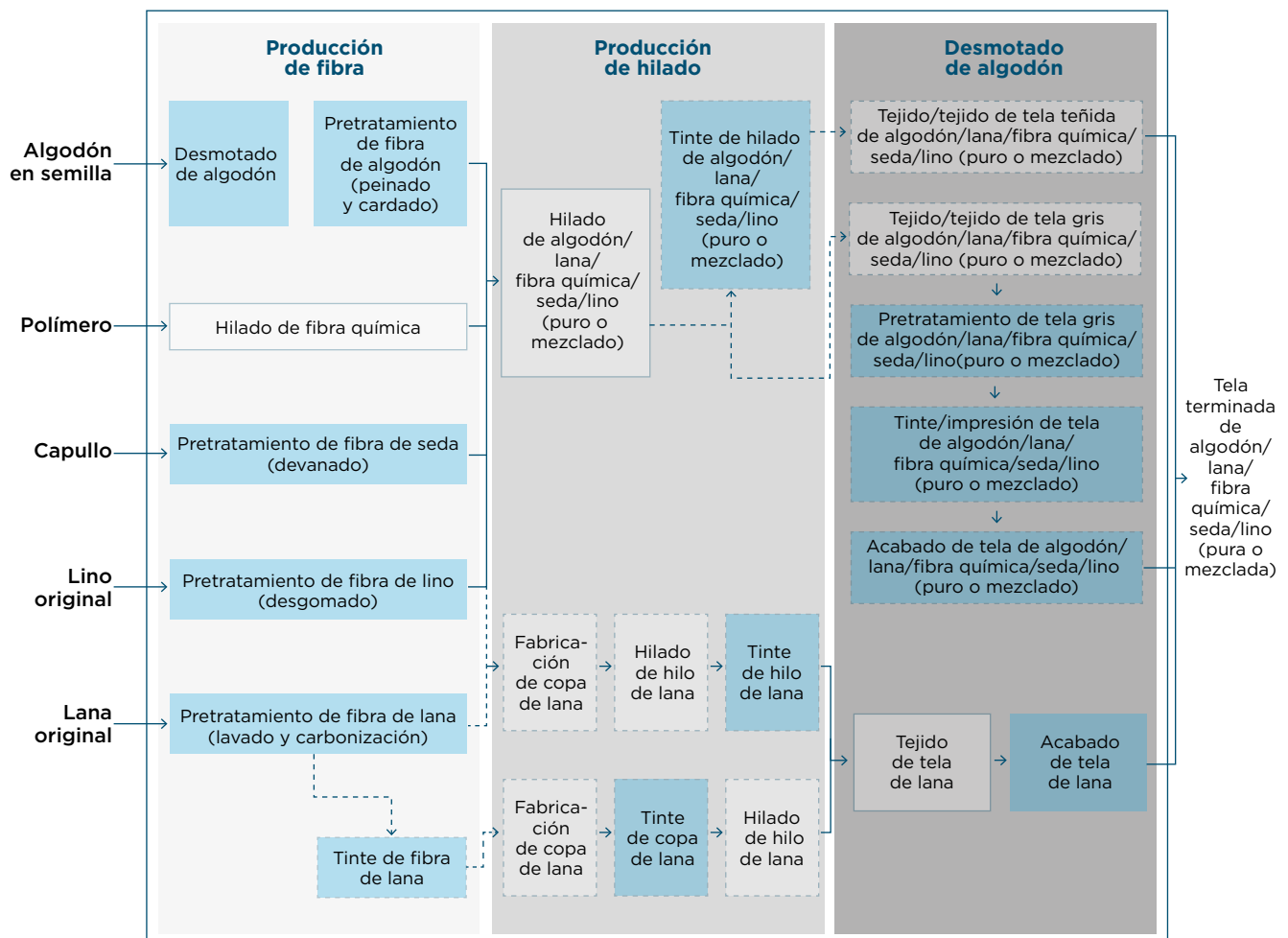
Los textiles hechos de fibras sintéticas o mezclas de fibras con contenido de polímeros sintéticos por lo general se fabrican con plásticos derivados de combustibles fósiles y, por tanto, implican los mismos problemas de emisiones que se describen en el capítulo 1 sobre plásticos. La obtención de fibras naturales a partir de plantas o animales también implica emisiones liberadas a la atmósfera durante diversos procesos agrícolas. Se necesita energía para producir fertilizantes, hacer funcionar la maquinaria de cultivo, bombear agua para regar los cultivos, proporcionar calefacción e iluminación a los edificios de las granjas y almacenes, y transportar los insumos clave al lugar de producción y para la recolección y cosecha de los productos finales. En Chen et al. (F. Chen et al., 2021) se ofrece una descripción detallada del impacto medioambiental del algodón. La producción aguas arriba de fertilizantes para la agricultura (por ejemplo, el cultivo de algodón) también es una fuente de emisiones. Los principales grupos de fertilizantes son el nitrógeno, el fósforo y el potasio (Ouikhalfan et al., 2022; Walling & Vaneekhaute, 2020). Los dos últimos son minerales extraídos de las minas, mientras que los fertilizantes a base de nitrógeno se fabrican hoy en día mayoritariamente

a partir de gas natural. La producción de fertilizantes nitrogenados es un proceso intensivo en energía y utiliza parte del gas como energía para alimentar las reacciones químicas y parte del gas como materia prima como fuente de moléculas para fabricar el propio producto fertilizante. El óxido nitroso es uno de los principales gases de efecto invernadero y tiene un potencial de calentamiento global aproximadamente 300 veces superior al del dióxido de carbono.

ii. Transformación de materias primas en fibras y productos acabados

Chen et al. (L. Chen et al., 2019) ofrece una visión general de esta etapa en un conciso diagrama que se reprodujo en la figura 2.1. La figura omite los procesos anteriores y posteriores, pero proporciona buenos detalles sobre la producción de fibras, la producción de hilos y la producción de tejidos acabados. Las emisiones son el resultado de varios procesos que consumen energía y utilizan combustibles fósiles como insumos. Una planta textil compuesta típica puede utilizar alrededor del 50% de su energía final como electricidad (para procesos como la humidificación de la hilatura y el tejido) y el 50% como calor (para procesos como el blanqueo, el acabado, el teñido y el estampado) (Hasanbeigi & Price, 2015).

Figura 2.1: transformación de materias primas en productos acabados (L. Chen et al., 2019)



iii. Transporte de productos al mercado

Tanto los productos de empresa a empresa como los de empresa a consumidor requieren transporte de mercancías desde el sitio de fabricación, que en la mayoría de las regiones se proporciona utilizando energía de combustibles fósiles (IEA, 2021g).

iv. Eliminación al final de la vida útil

Los textiles se eliminan cuando están dañados o ya no tienen valor para los consumidores (Domina & Koch, 1997). Las opciones de eliminación incluyen enviar los textiles a vertederos, incinerarlos o reciclarlos. A escala mundial, alrededor del 75% de todos los textiles se envían a vertederos, donde liberan GEI a la atmósfera a medida que se degradan; solo el 1% se recicla en prendas de vestir (Juanga-Labayen et al., 2022). Dado que el tejido más común del mundo, el poliéster, es en realidad plástico, todo el debate sobre la eliminación de los plásticos al final de su vida útil tratado en el capítulo 1 se aplica también a los textiles.

2.3 Opciones de descarbonización para el sector textil

Aquí se discuten las opciones para reducir la huella de emisiones de la producción textil en cada etapa (i-iv) del ciclo de vida del producto:

i. Extracción de recursos aguas arriba

En el caso de las fibras sintéticas (por ejemplo, el poliéster), es pertinente todo lo expuesto en el capítulo 1 sobre la descarbonización de los plásticos. En el caso de las fibras naturales, se requiere la plena adopción de prácticas agrícolas con cero emisiones netas. El uso directo de energía en vehículos agrícolas, bombas de riego u otros equipos de cosecha y procesamiento debe electrificarse con electricidad sin emisiones o sustituirse por combustibles de carbono cero en la mayor medida posible (Hedayati et al., 2019). El uso indirecto de energía en la agricultura procede en gran medida de la producción y el uso de fertilizantes. El cultivo de algodón de alto rendimiento, por ejemplo, depende de los fertilizantes, en especial del nitrógeno (Khan et al., 2017). La descarbonización de los fertilizantes de potasio y fósforo requeriría una transición a operaciones mineras descarbonizadas para los minerales necesarios (Ouikhalfan et al., 2022); la producción de fertilizantes a base de nitrógeno requiere amoníaco verde (Chehade & Dincer, 2021; IEA, 2021b), que comparte muchos componentes del proceso con el hidrógeno verde (C. Bauer, Treyer, et al., 2022). Incluso si todos los insumos aguas arriba de la agricultura fueran cero neto, no todos los fertilizantes aplicados son completamente absorbidos por las plantas y las fugas de nitrógeno del suelo (en forma de óxido nitroso) siguen siendo un potente gas de efecto invernadero (Gregorich et al., 2015). El cultivo ecológico de fibras como el algodón depende de fertilizantes, por lo general estiércol animal, que a menudo emiten más óxido nitroso por unidad de producción que los fertilizantes sintéticos (Walling & Vaneckhaute, 2020). Por lo tanto, la agricultura carbono-neutral exige dejar de lado la dicotomía orgánico/sintético y centrarse en el equilibrio entre fuentes y sumideros de emisiones. Las intervenciones planificadas en el uso de la tierra (por ejemplo, la reconversión de tierras agrícolas en bosques que sirvan de sumideros de carbono (Harwatt et al., 2020; Reay, 2020)), son medidas no tecnológicas importantes para lograr

cero emisiones netas en el sector agrícola, aunque también están sobre la mesa varias opciones tecnológicas para la eliminación directa de carbono de la atmósfera (Hanna et al., 2021).

ii. Transformación de materias primas en fibras y productos acabados

Las principales estrategias para conseguir emisiones netas cero en la fase de conversión son la eficiencia energética y la electrificación/cambio de combustible. Mejorar la eficiencia de la producción textil puede requerir nuevos procesos y métodos de producción (Hasanbeigi & Price, 2015), así como optimizar la disposición y el control de las instalaciones (Moon et al., 2013). La electricidad proporciona gran parte de la energía necesaria para la iluminación y el funcionamiento de los equipos en las plantas textiles, por lo que es necesaria la descarbonización de la red. Los requisitos de calentamiento en la producción textil oscilan entre 40 °C y 160 °C, y el extremo superior de la gama se utiliza para el teñido. Las bombas de calor eléctricas ya pueden suministrar calor en el rango de 90 °C - 150 °C, y las soluciones para superar los 150 °C ya completaron con éxito los proyectos de demostración (Arpagaus et al., 2018). Por lo tanto, la electrificación total de la producción textil con electricidad de red descarbonizada ya es una posibilidad técnica.

iii. Transporte de productos al mercado

El transporte de productos acabados tendrá que lograr cero emisiones netas. Dependiendo del mercado de destino y de la ubicación final de venta al por menor de los productos, esto puede significar descarbonizar el transporte de mercancías por carretera, aéreo, ferroviario y marítimo utilizando electricidad o combustibles líquidos sintéticos sin emisiones; y trasladar el transporte de mercancías a los modos con menos emisiones disponibles (Kaack et al., 2018).

iv. Eliminación al final de la vida útil

Dos tercios de los textiles son plásticos. Lo expuesto en el capítulo 1 sobre la eliminación de plásticos al final de su vida útil también es aplicable a los textiles. La fase de fin de vida del sector debe modificarse para que los residuos textiles no acaben en vertederos o incinerándose, liberando emisiones de GEI al degradarse o quemarse. La principal vía para lograr la eliminación sin emisiones al final de la vida útil es la circularidad de los materiales, que requiere mejorar el reciclado y adoptar los principios de la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2017a; McKinsey & Company, 2022; Shirvanimoghaddam et al., 2020; Wojciechowska, 2021). Aunque los métodos y técnicas pueden diferir ligeramente, los retos del reciclado de textiles son similares a los de los plásticos. Por ejemplo, estos procesos requieren mucho tiempo y mano de obra; puede ser difícil separar los materiales que se mezclan y la contaminación de los materiales recuperados puede ser un problema (Juanga-Labayen et al., 2022; Sadeghi et al., 2021).

2.4 Estrategia de aplicación

La fabricación textil sin emisiones netas va mucho más allá de los conceptos de “sostenibilidad” empleados hasta la fecha. La sostenibilidad (es decir, qué es y qué no es sostenible, cuánto esfuerzo es suficiente, etc.) en la industria textil sigue siendo muy controvertida (Greco & De Cock, 2021; Henninger et al., 2016). En la industria de la confección, muchos fabricantes se empeñan en destacar sus credenciales de sostenibilidad por motivos de fidelidad de los clientes (Jung et al., 2020), pero por desgracia se trata sobre todo de marketing sin sustancia (Wren, 2022). Esto no quiere decir que los esfuerzos de la industria hasta la fecha carezcan de mérito; sin embargo, las emisiones producidas por la fabricación textil siguen aumentando (G. Peters et al., 2021) en lugar de disminuir o empezar a acercarse a cero. La descarbonización es un desafío que requerirá medidas que vayan más allá del marketing, el etiquetado y las mejoras graduales de los productos. El mero cambio a la energía y los materiales ecológicos como insumos no supera las emisiones asociadas a la eliminación al final de la vida útil.

Lograr la fabricación de textiles sin emisiones netas cambiaría los modelos de negocio existentes para una gran parte de la cadena de suministro mundial, lo que representa un punto neurálgico clave para la transición. Un sistema cero neto requiere cambios fundamentales: diferentes métodos de producción, nuevos modelos de negocio, nuevos comportamientos de los consumidores y medidas de política para crear y apoyar los mercados necesarios en todas las etapas de la cadena de valor (Manickam & Duraisamy, 2019; Manshoven et al., 2019). En el caso de la ropa, la principal categoría de productos producidos con textiles, es fundamental un cambio hacia prendas de mayor calidad, con una vida útil más larga y una mayor durabilidad (Nature Climate Change, 2018; Niinimäki et al., 2020). Muchos de los desafíos de aplicación analizados anteriormente para la fabricación de plásticos (consulte el capítulo 1) también se aplican a los textiles. El sector textil y de la confección es una industria grande y rentable; se calcula que la propia industria de la moda es responsable del 2% del PIB mundial (Shirvanimoghaddam et al., 2020). Hasta ahora, la industria no ha tenido que asumir los costos de la contaminación de sus productos. Gravar la contaminación puede ser muy perjudicial para la industria.

CAPÍTULO 3

INDUSTRIA AUTOMOVILÍSTICA

3.1 Conclusiones principales

Una industria automovilística con cero emisiones netas no solo necesita llevar a cabo sus operaciones de fabricación sin emisiones, sino también crear productos cuyas emisiones sean bajas. El paso de los vehículos con motor de combustión interna a los de propulsión eléctrica es la forma más directa de lograr este objetivo en la mayoría de los mercados y aplicaciones.

Los vehículos son productos manufacturados complejos con largas cadenas de suministro. Las emisiones más importantes se producen en la cadena de suministro aguas arriba antes de que comience el montaje de un automóvil.

Punto neurálgico: la descarbonización de la fabricación de vehículos requiere la descarbonización de la minería de materias primas y la producción de acero, aluminio, plásticos, vidrio y baterías.

Punto neurálgico: una transición a cero emisiones netas en las plantas de ensamblaje automotriz dependerá de la electricidad baja en carbono para el suministro de la mayoría de los procesos y del uso de hidrógeno u otros combustibles descarbonizados para suministrar calor a los procesos de alta temperatura.

Punto neurálgico: estimular la adopción de medidas en un plazo determinado para cumplir los objetivos de mitigación del Acuerdo de París requerirá probablemente una intervención reguladora. La industria por sí sola es incapaz de realizar los cambios necesarios para que la fabricación de automóviles sin emisiones sea una realidad. Los cambios de gran alcance en las infraestructuras, como la descarbonización de la red eléctrica y la creación de la infraestructura necesaria para suministrar hidrógeno a escala suficiente, requerirán casi con toda seguridad la ayuda de los gobiernos.

Oportunidad: las perspectivas para lograr la eliminación descarbonizada de los vehículos al final de su vida útil y la circularidad de los materiales son bastante favorables en comparación con las perspectivas de otros sectores. En principio, casi todas las partes de un vehículo se pueden reciclar si se proporcionan la infraestructura y los incentivos adecuados, y si el vehículo está diseñado teniendo en cuenta la eliminación al final de su vida útil.

Oportunidad: muchos de los principales fabricantes de automóviles ya demostraron un grado limitado de interés en la producción de vehículos sin emisiones.

3.2 Descripción general de las emisiones de la industria automovilística

La producción de automóviles crea activos de capital de larga duración. La fabricación de automóviles es una industria global que produce vehículos de transporte terrestre para pasajeros, mercancías, aplicaciones industriales, militares y agrícolas. Los automóviles de pasajeros son el mayor componente de esta industria. En las últimas dos décadas se vendieron entre 60 y 92 millones de automóviles al año (IEA, 2020^a). En función de su diseño, las condiciones de conducción y las distancias recorridas, los vehículos pueden tener una larga vida útil, a menudo de entre 8 y 12 años, e incluso más en algunos mercados (más de 15 años). Se calcula que en 2021 hubo 1300 millones de vehículos en circulación, la inmensa mayoría de ellos (~99%) con motor de combustión interna (EIA, 2021). Los vehículos eléctricos representan un segmento de mercado en rápida expansión; alrededor del 9% de todos los automóviles nuevos vendidos en 2021 eran eléctricos, y las ventas de automóviles que funcionan con combustibles fósiles ahora están estancadas o en descenso (Paoli & Gül, 2022).

La industria automovilística representa una gran contribución a las emisiones globales. Se calcula que las emisiones del ciclo de vida de los vehículos producidos por los 12 mayores fabricantes de automóviles rondan las 4,3 GtCO₂e (gigatoneladas de CO₂ equivalente), lo que representa el 9% de las emisiones mundiales (Greenpeace, 2019). Las emisiones asociadas a la producción y eliminación de un vehículo típico (en función de su tamaño y peso) se sitúan entre 6 y 10 tCO₂e (toneladas equivalentes de CO₂) (Helms et al., 2016). Estas estimaciones excluyen las emisiones adicionales de la energía utilizada durante su ciclo de vida; estas emisiones dependen de cuánto se conduzca el vehículo. A modo de ejemplo, los automóviles que funcionan con gasolina o diésel emiten alrededor de 150–200 g de CO₂e por kilómetro recorrido (Helms et al., 2016); por lo tanto, un automóvil que recorre 150.000–200.000 kilómetros puede generar potencialmente 22-40 tCO₂e a lo largo de su vida útil.

Aunque actualmente su producción y uso no están exentos de emisiones, el cambio a la producción y uso de vehículos eléctricos será, no obstante, un medio fundamental para cumplir los requisitos de transporte con cero emisiones netas. Es difícil hacer generalizaciones sobre las emisiones asociadas a la fabricación de las baterías de los vehículos eléctricos; los diferentes vehículos tienen paquetes de baterías de distintos tamaños y también utilizan diferentes químicas de baterías (Ellingsen et al., 2017; J. F. Peters et al., 2017). Sin embargo, la producción de la mayoría de los vehículos eléctricos tiene una huella de emisiones mayor que la de los vehículos impulsados por combustibles fósiles. Además, las emisiones asociadas a la fabricación de los paquetes de baterías por sí solos pueden ser, a veces, superiores a las emisiones asociadas a la fabricación de todas las demás piezas del vehículo juntas (Agora Verkehrswende, 2019). En muchos países en los que la electricidad proviene principalmente de combustibles fósiles, las emisiones de los vehículos eléctricos son comparables a las de los automóviles que funcionan con combustibles fósiles (Helms et al., 2016; Kawamoto et al., 2019). Sin embargo, los vehículos eléctricos, a diferencia de los automóviles que funcionan con combustibles fósiles, tienen el potencial de producir emisiones muy bajas mientras están en uso si su energía proviene de electricidad sin emisiones de carbono, por lo que la electrificación rápida de la flota es fundamental para la estrategia de descarbonización de todas las principales economías del mundo (por ejemplo, los EE. UU. (US Department of State & US Executive Office of the President, 2021), la Unión Europea (European Commission, 2019), China (National People's Congress, 2021), Japón (METI, 2021), Alemania (BMUV, 2016), el Reino Unido (HM Government, 2021), Francia (Ministry of the Ecological Transition, 2020), Canadá (CCI, 2021), e Italia (MISE, 2020)).

Las emisiones se producen en múltiples etapas (i-v) durante el ciclo de vida de un vehículo:

i. Extracción de recursos aguas arriba

Los automóviles son productos complejos fabricados a partir de una variedad de insumos, casi todos los cuales ya se procesaron aguas arriba a partir de materias primas básicas. Como resultado de sus aportes de materiales, las emisiones aguas arriba para la fabricación de automóviles están vinculadas al uso de energía en las industrias de extracción de petróleo, minería y petroquímica. En los vehículos de pasajeros, por ejemplo, los materiales consisten principalmente en acero, aluminio, plásticos y caucho. El vidrio para las ventanas también es importante, al igual que los textiles técnicos. Los vehículos eléctricos también tienen baterías grandes como fuerza motriz. Si bien todos los automóviles son diferentes en cuanto a forma y tamaño de la carrocería, se podría decir que un automóvil “típico” impulsado por combustibles fósiles incorpora 900 kilogramos de acero (World Steel Association, 2021), 160 kilogramos de aluminio (Ducker, 2020) y 150 kilogramos de plásticos (Tullo, 2017). Los vehículos eléctricos suelen ser más pesados que los modelos similares del segmento de mercado que funcionan con combustibles fósiles y, en un esfuerzo por ahorrar peso, a menudo se fabrican con más aluminio en su estructura (~290 kg) (Ducker, 2020). El peso de las baterías en los vehículos eléctricos varía según el modelo y la autonomía máxima prevista, pero un vehículo de lujo de altas prestaciones puede llevar baterías de hasta 700 kilogramos (Nicoletti et al., 2020). La fabricación de acero, aluminio y baterías son procesos intensivos en energía y emisiones.

ii. Producción de componentes y montaje de vehículos

Una gran parte de la fabricación de vehículos consiste en trabajar el metal para crear la carrocería del vehículo. Los vehículos también se componen de productos manufacturados complejos que ya sufrieron una importante transformación a partir de materias primas. Por ejemplo, las llantas, las bolsas de aire, los cinturones de seguridad y las computadoras deben ensamblarse en el vehículo. Este ensamblaje requiere una compleja serie de procesos que consumen energía. Las emisiones derivadas del uso de energía surgen de la electricidad necesaria para hacer funcionar la iluminación, los motores, las bombas, los ventiladores, los equipos de soldadura, los equipos de pintura y revestimiento de carrocerías, las prensas de metal y la robótica de precisión. El calor del proceso también es necesario para una amplia gama de procesos como el moldeo de plásticos, el laminado en caliente, la forja y fundición de metales, y el decapado del acero para eliminar óxidos. El balance de fuentes de energía primaria en una planta típica (a título ilustrativo) podría ser de un 56% de electricidad y un 44% de combustibles fósiles (Giampieri et al., 2020). La figura 3.1 del trabajo de Sato y Nakata (Sato & Nakata, 2020) ofrece una visión general de la composición de los materiales de un vehículo de ejemplo, un Honda Accord de 2011, y de los principales procesos utilizados en su fabricación.

Figura 3.1: materiales y procesos de un vehículo de ejemplo, Honda Accord 2011 (Sato & Nakata, 2020)

Acero 47%

- Estampado -33%
- Forja 2%
- Mecanizado 12%

Hierro 5%

- Fundición 4%
- Forja 1%

Plástico 13%

- Moldeo por inyección 5%
- Extrusión 2%
- Moldeo por compresión 2%
- Moldeo por soplado 0,3%
- Calandrado 0,3%
- Termoendurecido 4%

Vidrio 2%

- Formación de paneles de vidrio 2%

Caucho 4%

- Moldeo por compresión 4%
- Moldeo por inyección 0,4%

Aluminio 13%

- Fundición 10%
- Extrusión 3%

Cobre 1%

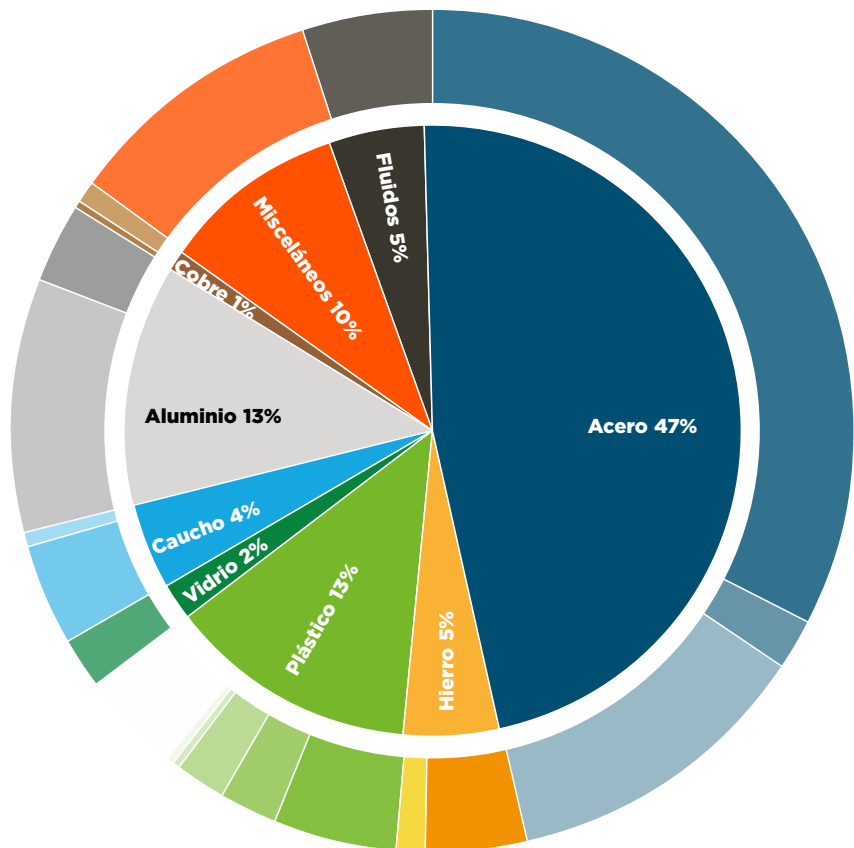
- Estampado 0,1%
- Dibujo 1%

Misceláneos 10%

- Varios 10%

Fluidos 5%

- Varios 5%



iii. Transporte al mercado

Tres cuartas partes de los automóviles que se venden en el mundo se producen en China, los Estados Unidos, la Unión Europea, la India y Japón (IEA, 2020a). Si bien la producción final de automóviles tiende a estar cerca de los mercados de destino (Sturgeon et al., 2008, 2009), las cadenas de valor de los componentes de los vehículos pueden ser regionales o globales, y la energía para el transporte de mercancías proviene principalmente de fuentes de combustibles fósiles.

iv. Uso del vehículo

Los vehículos generan emisiones a medida que se utilizan. Un vehículo que utiliza un motor de combustión interna alimentado por combustibles fósiles libera directamente GEI a la atmósfera. Un vehículo eléctrico utiliza electricidad para cargar sus baterías; hoy en día, y en la mayoría de los países, esta electricidad suele generarse a partir de fuentes que también producen emisiones.

v. Eliminación al final de la vida útil

Como se señaló anteriormente, la mayoría de los vehículos son principalmente de acero y aluminio en peso. Tanto el acero como el aluminio tienen un excelente potencial de reciclado, con tasas de recuperación del 91% - 93% que ya se encuentran en mercados con infraestructura maduras de reciclado de vehículos; entre estos mercados se encuentran Estados Unidos o Japón (Kelly & Apelian, 2016; Ohno et al., 2015). La razón principal por la que no se recicla el 100% de los metales es la contaminación durante el proceso de clasificación y recuperación, pero la investigación en curso tiene como objetivo mejorar tanto la calidad como la cantidad de aluminio (Capuzzi & Timelli, 2018) y acero (K. E. Daehn et al., 2017; Sawyer, 2016; Yellishetty et al., 2011) que se puede recuperar. Las fracciones restantes de los residuos de automoción suelen acabar en vertederos. La eliminación al final de la vida útil de los plásticos y los textiles se trató en los capítulos 1 y 2. Las baterías de plomo-ácido para arrancar motores de combustión interna ya se reciclan, con tasas cercanas al 99%. Por el contrario, y como resultado de la falta de regulación o de directivas claras, la mayoría de las baterías de tracción de los vehículos eléctricos hoy en día se envían a los vertederos (Mayyas et al., 2019). Una batería de automóvil típica contiene un 15% de productos químicos orgánicos y un 7% de plásticos (que pueden liberar GEI a la atmósfera al degradarse), y el resto es una mezcla de metales pesados que pueden ser muy tóxicos para la salud (Ordoñez et al., 2016; Winslow et al., 2018).

3.3 Opciones de descarbonización para la industria automovilística

Aquí se analizan las opciones para reducir la huella de emisiones de los vehículos automotores en cada una de las etapas (i-v) del ciclo de vida del producto:

i. Extracción de recursos aguas arriba

Las consideraciones iniciales relativas a los plásticos y los textiles se trataron en los capítulos 1 y 2. Las principales emisiones aguas arriba restantes proceden de las operaciones mineras que extraen mineral de hierro (utilizado para producir acero), bauxita (utilizada para producir aluminio) y litio y cobalto (utilizados para la producción de baterías). La fabricación de acero, aluminio, vidrio y baterías a partir de estas materias primas son importantes fuentes adicionales de emisiones.

a) Extracción de materias primas

Cada explotación minera tiene necesidades energéticas diferentes, pero la electricidad suele ser la mayor de ellas, y por lo general se suministra mediante combustibles fósiles. Para descarbonizar las operaciones mineras puede ser necesaria una combinación de electricidad renovable, almacenamiento en baterías e hidrógeno electrolítico (Igogo et al., 2021).

b) Producción de acero

Las vías para producir acero sin emisiones netas están en la cúspide de la viabilidad tecnológica a escala (es decir, esta década). Las tecnologías clave para la década de 2020 incluyen la reducción directa del hierro utilizando gas natural como gas de síntesis (y la captura y el secuestro de las emisiones), la reducción directa del hierro utilizando hidrógeno verde o la fabricación de acero a partir de chatarra reciclada utilizando electricidad con cero emisiones de carbono (Bataille, Stiebert, et al., 2021; IEA, 2020b, 2021f; Mission Possible Partnership, 2021; van Sluiseveld et al., 2021; Yu et al., 2021).

c) Producción de aluminio

La fabricación de aluminio descarbonizado es posible sustituyendo las fuentes de electricidad con alto contenido en carbono utilizadas para la fundición por electricidad limpia y los ánodos reactivos de carbono por ánodos inertes (Gomilšek et al., 2020; IEA, 2021a; Nature, 2018).

d) Producción de vidrio

La mayor parte de las emisiones (~75%) de un centro típico de fabricación de vidrio provienen del calor a alta temperatura de los combustibles fósiles utilizados para fundir las materias primas, y el resto de las emisiones proceden de la electricidad utilizada en otras partes de la planta (Griffin et al., 2021). El vidrio se funde a temperaturas extremadamente altas (superiores a 1500 °C) (Furszyfer Del Rio et al., 2022), por lo que el cambio a combustibles netos (como el hidrógeno verde) que puedan alcanzar estas temperaturas será fundamental para esta industria.

e) Producción de paquetes de baterías

La producción de baterías de última generación suele depender de una mezcla de electricidad y combustibles fósiles para procesos como el recubrimiento de electrodos, el secado y el ensamblaje de celdas, todos ellos procesos que pueden electrificarse con electricidad sin emisiones de carbono si se dispone de una red de este tipo (Aichberger & Jungmeier, 2020; Degen & Schütte, 2022).

ii. Producción de componentes y montaje de vehículos

Al igual que muchos sectores industriales, la fabricación de vehículos depende de la producción y el ensamblaje de componentes que en sí mismos implican una variedad de procesos complejos que utilizan cantidades significativas de electricidad y combustibles fósiles para el calor del proceso a alta temperatura. A su vez, las principales vías para lograr la fabricación de vehículos sin emisiones serán similares a las vías que deben utilizar otros sectores industriales; estas vías dependen de la eficiencia energética, la electrificación de tantos procesos como sea posible con electricidad de red con cero emisiones de carbono y el uso de hidrógeno verde para el calor de proceso a alta temperatura (Bataille et al., 2018; Bataille, Nilsson, et al., 2021; Rissman et al., 2020). Las decisiones de los fabricantes en torno al diseño de los productos para los vehículos también son extremadamente importantes. Por ejemplo, una de las formas más importantes de reducir el consumo de energía es reducir la masa del propio vehículo (Czerwinski, 2021; Kacar et al., 2018; Shaffer et al., 2021). Otra decisión importante es la elección del sistema de propulsión (combustibles líquidos o electricidad). Los vehículos con motor de combustión interna no pueden descarbonizarse fácilmente debido a los desafíos asociados a la sustitución de la gasolina o el diésel de automoción por productos sintéticos de origen biogénico o etanol (básicamente debido al uso limitado de la tierra y al conflicto potencial con la producción de alimentos, consulte (Bonsch et al., 2016; Goldemberg, 2008; Slade et al., 2014)). Esto significa que los vehículos eléctricos deberían ser el principal objetivo de los fabricantes de automóviles en el futuro.

iii. Transporte al mercado

Los elementos de transporte de mercancías de la cadena de suministro de la automoción (tanto los productos acabados como los componentes intermedios) deben electrificarse o alimentarse con combustibles sintéticos líquidos o gaseosos carbono-neutrales. Se estudiaron soluciones tecnológicas para descarbonizar el transporte de mercancías por carretera (Meyer, 2020), ferrocarril (IEA, 2019),

avión (Bauen et al., 2020; IEA, 2021c; Viswanathan & Knapp, 2019) y barco (Bouman et al., 2017; Mallouppas & Yfantis, 2021).

iv. Uso del vehículo

Los vehículos eléctricos dependen de una red descarbonizada para lograr la neutralidad climática. Esto implica sustituir la generación ininterrumpida de combustibles fósiles por fuentes de energía renovables, energía nuclear o permitir la captura y el almacenamiento de carbono para las emisiones de combustibles fósiles (IEA, 2021f). Los vehículos más ligeros con las mismas baterías y sistemas de propulsión llegarán más lejos, por lo que los fabricantes deben seguir centrándose en ellos (Soo et al., 2017).

v. Eliminación al final de la vida útil

Como se señaló anteriormente, las vías técnicas para reciclar la mayor parte del acero y el aluminio (más del 90%) utilizados en los vehículos ya existen y siguen mejorando con el tiempo. Se trata de garantizar que se dispone de la infraestructura y los incentivos de mercado necesarios a la escala necesaria. Los plásticos y los textiles plantean una serie de retos distintos en lo que respecta a la eliminación al final de su vida útil, tal y como se expone en los capítulos 1 y 2. Las baterías representan un desafío para el que existen soluciones claras. Las baterías de plomo-ácido y las de níquel-hidruro metálico, habituales en los vehículos eléctricos híbridos, ya se reciclan con altos índices de recuperación de materiales (Gaines, 2014). Es necesario desarrollar infraestructuras y procesos estandarizados (por ejemplo, un etiquetado claro para los distintos productos químicos) para gestionar a gran escala los grandes paquetes de baterías de los vehículos eléctricos, lo que puede requerir una intervención reguladora para empezar en algunos mercados (Mayyas et al., 2019). El propio proceso de reciclado (sobre todo si se trata de recuperar metales puros en lugar de baterías enteras o componentes para su reutilización) suele consumir mucha energía (Ciez & Whitacre, 2019; Fujita et al., 2021) y debe pasar a utilizar fuentes de energía sin emisiones de carbono. Por último, los fabricantes pueden desempeñar un papel importante en la mejora de la reciclabilidad de los vehículos durante el proceso de diseño, tanto mediante la selección de materiales que puedan reciclarse fácilmente como estructurando los componentes del vehículo de manera que puedan desmontarse fácilmente para su reutilización como piezas de repuesto, o separarse en flujos de reciclaje individuales (es decir, a través de los principios estándar de la economía circular (Aguilar Esteva et al., 2021; Baars et al., 2021; He et al., 2021)). Esto se aplica especialmente a los paquetes de baterías (C. Bauer, Burkhardt, et al., 2022; Harper et al., 2019), pero también a otros componentes estructurales, como los parabrisas y las llantas (McAuley, 2003; Nakano & Shibahara, 2017; Soo et al., 2017).

3.4 Estrategia de aplicación

Lograr la fabricación de automóviles sin emisiones requiere una acción coordinada en múltiples ámbitos, entre los que se incluyen la política industrial, la política de transportes, la planificación urbana y la planificación de la red eléctrica. La capacidad tecnológica para descarbonizar la mayor parte de la cadena de valor de la automoción ya existe, pero no así los incentivos de mercado y normativos. Lograr cero emisiones en el uso de vehículos requiere una acción coordinada entre los fabricantes de automóviles y los responsables políticos en varios ámbitos clave, y también puede requerir el fortalecimiento institucional para

permitir que la inversión se dirija hacia donde se necesita (Mielke & Steudle, 2018). Algunos ejemplos: ni la producción de vehículos con cero emisiones ni el uso de vehículos con cero emisiones pueden lograrse sin una red eléctrica que sea a su vez descarbonizada. Es poco probable que el uso de vehículos eléctricos se generalice a menos que las ciudades, las regiones y los países (por su cuenta o con la industria) planifiquen redes de estaciones de recarga públicas que sean rápidas y estén ampliamente disponibles. La industria no puede invertir con confianza en nuevos diseños a menos que esté segura de la existencia de mercados sólidos para sus productos.

Los fabricantes están dispuestos a invertir en vehículos sin emisiones, pero su rápida adopción requerirá una regulación y un apoyo normativo sostenidos. En el momento de escribir estas líneas (principios de 2023), todos los principales fabricantes de automóviles lanzaron o están a punto de lanzar al mercado vehículos de propulsión eléctrica; al mismo tiempo, la mayoría sigue fabricando y vendiendo vehículos propulsados por motores de combustión interna que funcionan con combustibles fósiles. Incluso con los bajos precios de los combustibles, es probable que la tecnología de los vehículos eléctricos siga mejorando, alcance la paridad y, finalmente, supere el rendimiento de los vehículos que funcionan con combustibles fósiles (Kapustin & Grushevenko, 2020). No obstante, una transición completa a la electricidad en un plazo que permita alcanzar los objetivos de descarbonización que, a su vez, pueden lograr los objetivos del Acuerdo de París, necesita una presión reguladora (IEA, 2021d; Rietmann & Lieven, 2019). Históricamente, los fabricantes de automóviles han luchado contra casi todas las regulaciones sanitarias o medioambientales, incluidas las relativas a emisiones (Chowkwanyun, 2019; Farrauto et al., 2019), estándares de eficiencia de los vehículos (Penna & Geels, 2012), bolsas de aire y cinturones de seguridad (Sperling et al., 2004). No existe ninguna razón para creer que las cosas vayan a ser diferentes en un entorno normativo para lograr un parque de vehículos sin emisiones. Los responsables políticos deben tener en cuenta toda la cadena de valor y el ciclo de vida de los vehículos, lo que puede significar ir más allá de la simple obligación de que las transmisiones sean eléctricas. Las acciones normativas pueden requerir otras acciones; por ejemplo, las regulaciones podrían fomentar la producción de vehículos más ligeros mediante el uso de impuestos basados en el peso (Shaffer et al., 2021).

Tanto los insumos aguas arriba para la fabricación de automóviles como la eliminación aguas abajo de los vehículos necesitan más investigación y apoyo normativo. Para que los insumos aguas arriba (por ejemplo, acero, aluminio, plástico, vidrio) para la fabricación de automóviles cumplan los estándares de descarbonización, los mercados necesitan estándares y procedimientos transparentes y uniformes para contabilizar las emisiones, mismos que aun no se establecieron de forma generalizada. Por ejemplo, muchos fabricantes de automóviles están dispuestos a comenzar a utilizar “acero verde” en sus automóviles (Muslemani et al., 2022), pero aún no existe una definición estandarizada de acero verde que pueda adoptarse como parte de las normas de producto y etiquetado o en las negociaciones comerciales (Muslemani et al., 2021). El panorama general de la eliminación aguas abajo es que técnicamente ya es posible reciclar casi la totalidad de un vehículo (~90% (D’Adamo et al., 2020)); sin embargo, todavía hay que establecer, a través de la reglamentación, los incentivos económicos y de mercado para el reciclado total y para que los propios vehículos se diseñen de forma que permitan un reciclado casi total (es decir, cercano al 100%) (Khodier et al., 2018; Vermeulen et al., 2011; Weidenkaff et al., 2021).

CAPÍTULO 4

INDUSTRIA PESQUERA

4.1 Conclusiones principales

La creación de un sector pesquero sin emisiones netas requiere intervenciones reguladoras y de mercado para incentivar el cambio tecnológico, tanto a nivel nacional (por ejemplo, para la pesca, las piscifactorías, la producción de piensos, el procesamiento del pescado, el suministro de energía y la cadena de frío/refrigeración) como a nivel internacional (por ejemplo, para las actividades pesqueras en aguas internacionales y el transporte de larga distancia).

Punto neurálgico: el suministro a gran escala de electricidad neta cero y de combustibles sintéticos bajos en carbono (como el hidrógeno verde, el amoníaco o los hidrocarburos y alcoholes sintéticos) será necesario para descarbonizar la producción de gránulos para piensos, la construcción naval, los sistemas de propulsión de los buques pesqueros, las piscifactorías, las plantas de procesamiento de pescado, los sistemas de propulsión de los buques de carga de larga distancia y los segmentos de reciclaje de buques de la cadena de valor de los productos del mar.

Punto neurálgico: para avanzar será necesario realizar ejercicios nacionales de trazado de rutas para conocer las condiciones de partida de los sectores de la flota pesquera y la piscicultura, y trazar vías acordes con los planes nacionales de descarbonización.

Punto neurálgico: lograr una pesca carbono-neutral exigirá la coordinación entre una amplia gama de partes que gobiernan y establecen políticas para el transporte y las actividades marítimas; el suministro de energía; y los sectores agrícola, alimentario e industrial. Esto representa un gran reto de coordinación política internacional a través de múltiples fronteras y jurisdicciones nacionales.

Punto neurálgico: la eliminación posterior de los buques pesqueros requiere la creación de una economía más circular y, debido a la naturaleza internacional de las empresas de desguace y reciclaje de buques, una fuerte coordinación a nivel mundial.

4.2 Descripción general de las emisiones de la industria pesquera

La industria pesquera es un sector intensivo en energía y emisiones que funciona casi exclusivamente con combustibles fósiles. En la era moderna, la flota pesquera mundial se compone principalmente de buques industriales (A. Sala et al., 2022). Se calcula que en 2020 había 4,1 millones de buques en funcionamiento, dos tercios de ellos en Asia (FAO, 2022). Las embarcaciones pesqueras funcionan casi exclusivamente con

combustibles fósiles, principalmente diésel marino y fueloil (Flammini et al., 2022). El uso de combustible representa alrededor del 60% del costo de explotación de una flota pesquera (Tyedmers et al., 2005). La demanda de productos del mar está aumentando, ya que el crecimiento de la población y el aumento de los ingresos a nivel mundial impulsaron una mayor demanda de proteínas animales (Tilman & Clark, 2014). Desde 1950, el pescado suministrado per cápita casi se triplicó (Béné et al., 2015). La pesca de captura silvestre suministra entre 90 y 95 millones de toneladas de pescado al año, lo que supone algo menos de la mitad del total mundial (FAO, 2022).

La acuicultura (cría de marisco) es un sector de rápido crecimiento que también es intensivo en emisiones. A medida que aumenta la demanda de productos del mar, la acuicultura (piscicultura) se convirtió en uno de los sectores de producción de alimentos de más rápido crecimiento en el mundo (Anderson et al., 2017; Gentry et al., 2017). La acuicultura ofrece una vía potencial para aumentar la producción de alimentos de los océanos en el futuro (Costello et al., 2020), aunque para ello haya que superar limitaciones socioecológicas como la preocupación por la contaminación marina (Costa-Pierce & Chopin, 2021; Farmery et al., 2021).

El auge de la acuicultura se debe a que la sobrepesca de poblaciones silvestres se convirtió en una importante amenaza para la seguridad alimentaria y los ecosistemas oceánicos en varias regiones, sobre todo en los trópicos (Cabral et al., 2019; Coll et al., 2008; Link & Watson, 2019). En muchas regiones, la pesca de captura salvaje corrió el riesgo de extraer más recursos de los que son viables para mantener las poblaciones de animales marinos (Costello et al., 2016), y la producción mundial total de la pesca se estancó desde la década de 1990.

(Costello et al., 2020) Si bien se plantearon preocupaciones ecológicas sobre, por ejemplo, la contaminación marina, la acuicultura ofrece una vía potencial para aumentar la producción de alimentos de los océanos en el futuro (Costa-Pierce & Chopin, 2021; Farmery et al., 2021). La contaminación de la acuicultura incluye los residuos orgánicos que se acumulan en los sedimentos, las fugas de nitrógeno de los piensos no consumidos por los peces y la liberación de antibióticos y otras sustancias químicas en el medio marino (Miranda et al., 2018; Reverter et al., 2020; Wu, 1995).

Según las estadísticas de acuicultura, la producción actual ronda los 100 millones de toneladas de pescado y marisco al año (FAO, 2022).³ Es difícil generalizar una huella de emisiones para la acuicultura ya que existe una enorme variabilidad en la cría y el transporte de diferentes especies en diferentes partes del mundo para diferentes mercados (Jones et al., 2022; Poore & Nemecek, 2018). Sin embargo, a grandes rasgos, las emisiones de GEI de la acuicultura son similares en magnitud general a las de la mayor parte de la cría de animales terrestres y a las de parte de la pesca de captura silvestre (M. J. MacLeod et al., 2020; Tilman & Clark, 2014).

Las emisiones procedentes tanto de la acuicultura como de la pesca de captura silvestre crecen rápidamente. El rápido aumento de la cantidad de pescado que se consume y la mayor dependencia de los buques que funcionan con combustibles fósiles hicieron que las emisiones del sector pesquero mundial se cuadruplicaran durante el período comprendido entre 1950 y 2016 (Greer et al., 2019). Las emisiones directas de la pesca de captura silvestre son en su gran mayoría el resultado del uso de combustibles fósiles (Parker & Tyedmers, 2015), y se estima que representan alrededor de 200 millones de toneladas de

³ Las porciones comestibles de muchas especies cultivadas (por ejemplo, crustáceos y moluscos) son inferiores a su peso total. Por ello, algunas investigaciones sostienen que la acuicultura proporciona cantidades muy inferiores de alimentos comestibles, tal vez solo la mitad de la estimación de 100 millones de toneladas (Costa-Pierce & Chopin, 2021; Edwards et al., 2019).

GEI equivalentes de CO₂ (MtCO₂e) al año, alrededor del 0,6% de las emisiones mundiales.⁴ La acuicultura también es una fuente de emisiones en rápido crecimiento (Yuan et al., 2019); las estimaciones indican que genera 250 Mt CO₂e/año (M. J. MacLeod et al., 2020), un nivel que representa aproximadamente el 0,5% de las emisiones mundiales.

El aumento de la demanda, los cambios tecnológicos y el cambio climático hacen que las emisiones del sector pesquero aumenten progresivamente con el tiempo. Los datos sobre las actividades pesqueras y el uso de energía y las emisiones relacionadas suelen ser difíciles de obtener y verificar. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) señala que alrededor del 40% de los países que tienen flotas pesqueras no comunican datos a la FAO (FAO, 2022). A menudo se cuestiona la exactitud de las estadísticas comunicadas (Pauly & Zeller, 2017b; Ye et al., 2017). En muchos informes no se distinguen los datos sobre pesca de otros datos agrícolas (Flammini et al., 2022); se cree que algunos de los datos presentados se elaboraron o alteraron con fines políticos (Moutopoulos & Koutsikopoulos, 2014; Pauly & Zeller, 2017a). Con estas salvedades, las mejores estimaciones de la literatura académica son que alrededor de la mitad de todas las emisiones de la pesca son producidas por solo cinco países: los EE. UU., China, Japón, Indonesia y Vietnam (Parker et al., 2018). Como tendencia general, se cree que las emisiones están aumentando, no solo por la mayor demanda de pescado, sino también porque los buques realizan viajes más largos al haber cambiado los hábitats de los peces debido al cambio climático (Madin & Macreadie, 2015). Las actividades de acuicultura también se están expandiendo a aguas más profundas (Gentry et al., 2017), una tendencia que puede aumentar el uso de energía y las emisiones generadas por las rutas de viaje más largas hacia y desde las operaciones de cultivo.

La pesca puede concebirse como una cadena de valor que comprende componentes tanto de captura silvestre como de acuicultura que suministran productos del mar a los mercados, con emisiones que surgen durante las siguientes etapas diferenciadas (i-v):

i. Aportes aguas arriba

Tanto en la captura silvestre como en la acuicultura se utilizan embarcaciones marinas de diversos tamaños, desde pequeñas embarcaciones interiores o litorales (costeras) de 4 o 5 metros de eslora hasta grandes buques industriales de más de 100 metros de eslora. China (41% - 45%), Corea del Sur (30%) y Japón (20%) son los mayores actores mundiales de la construcción naval (OECD, 2022b). Por peso, los buques fabricados en serie se componen principalmente de acero, aleaciones de aluminio y materiales compuestos de plástico (Chalmers, 1988; Molland, 2008). La fabricación de insumos de acero, aluminio y plástico utilizados en la construcción naval son procesos intensivos en emisiones que forman parte de la huella total de gases de efecto invernadero (GEI) del sector. La propia construcción naval también es una empresa intensiva en energía y emisiones que implica una importante labor metalúrgica (por ejemplo, corte por chorreado, soldadura, recubrimiento, pintura) y el traslado de componentes pesados a su lugar utilizando grúas y otros equipos especializados (Mandal, 2017; Vakili et al., 2021; Vakili, Schönborn, et al., 2022). La electricidad también suele utilizarse para producir grandes volúmenes de gases (como oxígeno y acetileno) para soldar directamente in situ (Hadžić et al., 2018). La acuicultura, a diferencia de la pesca de captura silvestre, utiliza piensos

⁴ Es posible que las emisiones indirectas de la pesca hagan que esta cifra sea muy superior. Algunos trabajos recientes sostienen que las alteraciones del fondo marino debidas a las actividades pesqueras que arrastran redes pesadas por el fondo oceánico (pesca de arrastre de fondo) provocan que el CO₂ que antes estaba retenido en el propio sedimento se disuelva en el agua y, a su vez, libere GEI a la atmósfera. Esto puede significar que las emisiones relacionadas con la pesca podrían situarse entre 600-1500 Mt CO₂e, siendo el extremo superior de este rango comparable a las emisiones generadas por todo el sector de la aviación mundial (E. Sala et al., 2021).

manufacturados como fuente de alimento para las especies objetivo que se capturan. Los peces y otros animales marinos (por ejemplo, los crustáceos) se alimentan con gránulos de alto contenido proteínico, a menudo llamados alimentos acuícolas, que se elaboran a partir de subproductos de la pesca de captura silvestre (harina de pescado y aceite de pescado), proteínas de origen vegetal (soja, maíz) o subproductos de la producción ganadera (carne, harina de huesos) (Hua et al., 2019). La producción agrícola, la fabricación y el transporte de gránulos de pienso para granjas de acuicultura son una fuente importante de GEI (Bujas et al., 2022); en el caso de muchas especies, estos procesos pueden representar entre el 57% y el 70% de la huella total de emisiones de los alimentos de origen marino (Gephart et al., 2021; M. J. MacLeod et al., 2020).

ii. Fases operativas

Tanto la pesca de captura silvestre como la acuicultura requieren que los buques marítimos viajen hacia y desde los lugares donde se van a capturar o recoger los peces. La pesca de captura silvestre suele ser la que implica más desplazamientos. Las investigaciones sugieren que el consumo de energía de los buques depende de una serie de factores, como la estructura y el tamaño del buque, el diseño y el estado del motor, el tipo de aparejos y equipos de pesca (como los sedales y las redes para capturar los peces), el patrón de movimiento del buque durante la pesca, la distancia recorrida y el tipo de especies y las rutas de migración de los peces objetivo (Basurko et al., 2013; Parker & Tyedmers, 2015; A. Sala et al., 2022). Las operaciones de pesca de captura silvestre suelen enviar sus capturas directamente a las instalaciones de procesamiento y envasado directamente desde el muelle de desembarque. Las operaciones de acuicultura presentan una serie de fuentes de emisiones adicionales además del transporte por barco de la vida marina hacia y desde el lugar de la explotación. Entre ellas se incluyen las emisiones procedentes de la energía utilizada para la iluminación, el aire acondicionado, las bombas de circulación de agua, los sistemas de aireación (para oxigenar el agua) y las máquinas de alimentación automática (Troell et al., 2004). La energía suministrada para los procesos de acuicultura suele proceder de la red eléctrica en el caso de las explotaciones terrestres y de la generación de diésel en las oceánicas, con aportaciones de hasta 3 kWh/kg de alimento producido (Vo et al., 2021).

iii. Tratamiento y envasado

A excepción de los “buques factoría” más grandes, que incorporan cierto grado de procesamiento del pescado durante las operaciones de captura silvestre (Kose, 2010), tanto la pesca de captura silvestre como la acuicultura suelen procesar y envasar sus productos en instalaciones terrestres. El procesamiento del pescado implica una secuencia de actividades como el aturdimiento, la clasificación, la eliminación del limo, el escamado, el lavado, el descabezado, el eviscerado, el corte de aletas, el corte en filetes, el fileteado y la separación de la carne de las espinas. Todas estas actividades requieren una serie de equipos especializados, por lo general eléctricos, aunque en ocasiones algunos pasos son realizados a mano por trabajadores manuales cualificados (Ghaly et al., 2013; Quijera et al., 2014; Thrane et al., 2009). Según el producto final, también puede ser necesario un proceso adicional de curado, secado, salado y ahumado (por lo general a temperaturas de entre 70 °C y 100 °C) (Horner, 1997). Los procesos de envasado incluyen el enlatado, el enfriamiento y la congelación, de acuerdo con el producto final (Hall, 2010a, 2010b). En esta fase de la cadena de valor, el consumo de energía es considerable debido a la alimentación de los equipos mecánicos, el accionamiento de bombas y motores, la generación de vapor, el calentamiento del agua, la producción de hielo y la refrigeración del producto

(Boziaris, 2013). La refrigeración representa casi el 70% de la demanda energética de una planta típica de procesamiento de pescado (Nordtvedt & Widell, 2020).

iv. Transporte al mercado

Tanto la pesca de captura silvestre como la acuicultura producen mariscos que deben procesarse y envasarse para su transporte a los mercados. Según el mercado de destino, los mariscos pueden viajar por carretera, ferrocarril, aire, mar o una combinación de estos medios. Se estima que el 40% de los productos del mar se comercializan en todo el mundo (Parker et al., 2018), recorriendo miles de kilómetros (Gephart et al., 2016; Watson et al., 2015, 2017). En base al producto (por ejemplo, seco, enlatado, refrigerado, congelado), es posible que los mariscos deban refrigerarse a diferentes temperaturas; el pescado fresco se suele almacenar a 0 °C - 4 °C, mientras que el congelado se suele almacenar a -18 °C (Alasalvar & Quantick, 1997). Las emisiones en esta etapa de la cadena de valor proceden de los combustibles utilizados para el transporte y de la energía empleada para la refrigeración y la congelación.

v. Desguace de buques

El desguace de buques implica el desmantelamiento de embarcaciones marítimas utilizadas para el transporte de carga o actividades pesqueras al final de su vida útil y la reutilización o reprocesamiento de sus materiales en formas útiles. El desmantelamiento de un buque es básicamente el proceso inverso a su construcción (cubierto en el primer punto (i) de esta lista), en gran parte con las mismas consideraciones directas de energía y emisiones. Las necesidades energéticas de la extracción de materias primas primarias en la construcción naval son casi las mismas que las del reprocesamiento para el desguace de buques. Los materiales de acero y aluminio utilizados para construir la mayoría de los buques son materiales con un excelente potencial de reciclado. En principio, tanto el aluminio como el acero se pueden reciclar por completo, pero en la práctica, sin embargo, la contaminación de los metales durante los procesos de clasificación y recuperación conduce a niveles de reciclado inferiores al 100%. No obstante, en teoría, es posible acercarse bastante al reciclado total. En el caso de los vehículos de carretera, los mercados de Japón y Estados Unidos demostraron que es posible recuperar entre el 91% y el 93% de estos metales y procesarlos para su reutilización (Kelly & Apelian, 2016; Ohno et al., 2015). A pesar de este potencial, más del 80% del material de transporte mundial (en peso) se desguaza en un año normal en India, Pakistán y Bangladesh, siendo Turquía y China otros actores mundiales importantes en el mercado del desguace (UNCTAD, 2021). Luego los materiales reciclados se utilizan en el país o se comercializan a escala mundial.

4.3 Opciones de descarbonización para la industria pesquera

Aquí se analizan las opciones para reducir la huella de emisiones de la automoción en cada una de las etapas (i-v) del ciclo de vida del producto:

i. Aportes aguas arriba

Tanto en la pesca de captura silvestre como en la acuicultura se utilizan buques. La descarbonización de los insumos de fabricación previos a la construcción naval requiere intervenciones específicas en la extracción de materias primas (Igogo et al., 2021), la fabricación de acero (Bataille, Stiebert, et al., 2021; IEA, 2020b, 2021f; Mission Possible Partnership, 2021; van Sluisveld et al., 2021; Yu et al., 2021), la producción de aluminio (Gomilšek et al., 2020; IEA, 2021a; Nature, 2018) y los plásticos (consulte el capítulo 1 para obtener más detalles). La energía para fabricar los componentes de los buques y ensamblarlos en buques acabados tendría que proceder de fuentes con cero emisiones de carbono para conseguir buques sin emisiones (Vakili, Ölçer, et al., 2022; Vakili, Schönborn, et al., 2022). Las emisiones agrícolas aguas arriba son otro factor importante que contribuye a la huella de GEI de las operaciones acuícolas. La descarbonización de la producción de piensos implicará cambios en los procesos agrícolas previos, como el uso de electricidad con cero emisiones para alimentar las explotaciones de las granjas y la utilización de otros sumideros de carbono para equilibrar las emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de fertilizantes nitrogenados (Hedayati et al., 2019; M. MacLeod et al., 2015). La acuicultura en sí tiene el potencial de proporcionar o contribuir a varios tipos de sumideros de carbono, como el uso de conchas de bivalvos cultivados (por ejemplo, almejas, ostras, mejillones) o algas marinas para secuestrar carbono, pero no son técnicas que necesariamente se hayan probado todavía a escala (Jones et al., 2022).

ii. Fases operativas

Varias intervenciones pueden reducir las emisiones durante las fases operativas de la pesca de captura silvestre y la recolección acuícola.

a) Cambios operativos

Las decisiones sobre qué especies capturar o cultivar son determinantes de la intensidad de las emisiones. Los requisitos fundamentales de nutrientes, los hábitats y los patrones de migración difieren según las especies. Tanto la pesca de captura silvestre como la acuicultura implican cierto grado de descartes y pérdidas, que en algunas pesquerías se estiman en hasta un 25% (Béné et al., 2015). La aplicación de las mejores prácticas para evitar que el pescado se pierda o se descarte y para reducir los residuos contribuiría a reducir las emisiones asociadas a la producción. En la pesca de captura silvestre, las emisiones pueden reducirse mediante cambios de comportamiento, como la reducción de la velocidad de los buques, la optimización de los lugares y los tiempos de pesca (Abernethy et al., 2010) y la selección del tipo correcto de aparejos de pesca (tipo de sedal y de red) para el tipo de pez que se pretende capturar (Basurko et al., 2013); tales medidas pueden marcar una gran diferencia en las emisiones (Bastardie et al., 2022).

b) Reacondicionamiento de los buques existentes

El rendimiento energético de los buques existentes puede mejorarse para hacer un adecuado uso de su combustible y reducir las emisiones por unidad de producción. Los buques existentes pueden

ser más eficientes mediante el uso de sistemas de gestión de la energía a bordo que optimicen, por ejemplo, la refrigeración y el rendimiento de los motores (Basurko et al., 2013).

c) Nuevos diseños de buques

A largo plazo, será necesario desarrollar buques con formas de casco mejoradas (Barreiro et al., 2022; Lindstad et al., 2022) y sistemas de propulsión que no dependan de los combustibles fósiles. Los sistemas de propulsión alternativos incluyen el uso de electricidad limpia a través de baterías (Jeong et al., 2020), velas de alta tecnología (Lindstad et al., 2022), pilas de combustible (Baldi et al., 2020; Horvath et al., 2018) o motores de combustión interna que funcionen con biocombustibles (Kesieme et al., 2019), metanol (Helgason et al., 2020; Korberg et al., 2021), hidrógeno (Atilhan et al., 2021; Bicer & Dincer, 2018), amoníaco (Al-Aboosi et al., 2021; Zincir, 2022) y combustibles híbridos (Karvounis et al., 2022; Mäkitie et al., 2022; Pan et al., 2014). El uso de gas natural licuado (GNL), que también es un combustible fósil, se estudió como una alternativa que podría generar niveles de emisiones más bajos que el diésel marino (Balcombe et al., 2021; Schinas & Butler, 2016; Sharafian et al., 2019), pero el GNL no es una solución con cero emisiones netas para el transporte marítimo (Balcombe et al., 2019; Fun-sang Cepeda et al., 2019).

d) Operaciones de acuicultura

Para reducir las emisiones en general, la acuicultura debe reducir las emisiones que se derivan tanto de la producción de piensos (discutido anteriormente en la sección 4.2 de este capítulo) como de los residuos de piensos. Una instalación acuícola típica produce una gran cantidad de residuos, ya que a menudo se liberan grandes cantidades de piensos, que no se consumen (Ballester-Moltó et al., 2017). Para optimizar la cantidad y el momento en que se libera el alimento y reducir los residuos, la industria puede emplear el monitoreo de precisión y la automatización con el uso de cámaras, sensores e inteligencia artificial (Føre et al., 2018). A largo plazo, se pueden conseguir ahorros adicionales mejorando la tasa de conversión de piensos para optimizar la cantidad de alimento necesaria por kilogramo de mariscos producidos cambiando la composición de los piensos (Hua et al., 2019) o utilizando la ingeniería genética (Besson et al., 2016).

e) Suministro de energía a la acuicultura

Las explotaciones acuícolas utilizan sobre todo electricidad de la red cuando están en el interior o cerca de la costa, y diésel cuando están en alta mar. La descarbonización a gran escala de la electricidad de la red y la sustitución de los combustibles diésel por alternativas de cero emisiones serán necesarias para que las operaciones acuícolas estén en línea con las aspiraciones de descarbonización. Diversos estudios analizaron la integración de las energías renovables en las actividades acuícolas (Bujas et al., 2022; Scroggins et al., 2022; Vo et al., 2021), incluidos los generadores flotantes de energía solar (Pringle et al., 2017) y undimotriz (Garavelli et al., 2022) para emplazamientos alejados de la costa. Los lugares muy remotos también pueden necesitar complementar sus sistemas de suministro de energía con baterías o una forma de suministro de combustible bajo en carbono, como el hidrógeno verde (Jebsen, 2021).

iii. Tratamiento y envasado

La mayoría de los procesos en una planta típica de procesamiento de pescado funcionan con electricidad o son aptos para la electrificación. En muchas plantas existentes, el calor para la generación de vapor (para la esterilización) y el secado a menudo se obtiene mediante la combustión de combustibles fósiles (Boziaris, 2013), pero las temperaturas implicadas son relativamente bajas y ahora se pueden obtener cómodamente con bombas de calor industriales disponibles en el mercado (Arpagaus et al., 2018) o con tecnologías como la energía solar térmica de alta temperatura (Quijera et al., 2014). Dependiendo de los recursos y las condiciones locales, la descarbonización del suministro eléctrico se puede lograr a través de la electricidad limpia suministrada por la red, energías renovables in situ, combustibles bajos en carbono o una combinación de todos estos (Alzahrani et al., 2019, 2020, 2022).

iv. Transporte al mercado

El transporte de productos del mar al mercado exigirá cambios tecnológicos para descarbonizar modos de carga, como el transporte de mercancías por carretera (Meyer, 2020), ferrocarril (IEA, 2019), avión (Bauen et al., 2020; IEA, 2021c; Viswanathan & Knapp, 2019) y transporte marítimo (Bouman et al., 2017; Mallouppas & Yfantis, 2021). Los buques marítimos gestionan el 80% del comercio mundial (en volumen) (Walsh et al., 2019). Las opciones tecnológicas para reducir las emisiones del transporte marítimo de larga distancia son similares a las de los buques pesqueros (analizadas en el punto ii) b) y ii) c)). Las opciones incluyen la optimización del diseño del casco y de los sistemas de potencia y propulsión; el uso de combustibles y fuentes de energía alternativos; y el cambio de las operaciones para maximizar la eficiencia (por ejemplo, adaptar la velocidad a las condiciones del mar) (Bouman et al., 2017; Jimenez et al., 2022).

v. Desguace de buques

Existe el potencial tecnológico para reciclar casi todo el acero y el aluminio utilizados en los buques. El reciclado de buques es una industria en la que los principales actores se comportan como clientes (que pujan y compran buques al final de su vida útil) y vendedores (que venden materiales y equipos desechados). Además, los principales actores de la industria naviera participan en industrias relacionadas, como la de la chatarra de acero. En un mercado abierto y global, el valor de la chatarra de acero es el principal impulsor de las actividades de reciclaje (Sornn-Friese et al., 2021). La reconfiguración del ecosistema empresarial de los buques para lograr una economía más circular probablemente requerirá un esfuerzo global para coordinar y regular las actividades bajo el paraguas de las principales sociedades de clasificación de buques (por ejemplo, Lloyd's Register, American Bureau of Shipping, Nippon Kaiji Kyokai) y tendrá que involucrar a los países donde se produce la mayor parte del desguace de buques (India, Pakistán, Bangladesh, Turquía y China) y la Organización Marítima Internacional (OMI) (Milios et al., 2019). Para avanzar será necesario apoyar la reutilización y refabricación de equipos y productos renovados, la creación de normas técnicas de rendimiento para que las piezas y equipos de segunda vida puedan optar a seguros de transporte marítimo, y la segmentación del mercado de la chatarra por aleaciones y niveles de contaminación para ayudar a disponer de distintos grados de acero reciclado para diferentes usos finales en la construcción naval.

4.4 Estrategia de aplicación

Lograr la creación de un sector pesquero con cero emisiones netas requiere intervenciones reguladoras y de mercado para incentivar el cambio tecnológico, tanto a nivel nacional (por ejemplo, para la pesca, las piscifactorías, la producción de piensos, el procesamiento del pescado, el suministro de energía y la cadena de frío/refrigeración) como a nivel internacional (por ejemplo, para las actividades pesqueras en aguas internacionales y el transporte de larga distancia). La larga vida útil de los activos de los buques y las infraestructuras portuarias (Bullock et al., 2022), que suele medirse en décadas, significa que la descarbonización a gran escala de los buques marítimos y pesqueros implica que la competencia de precios y la competencia tecnológica por sí solas pueden no ser adecuadas para lograr cambios lo suficientemente rápidos como para cumplir los objetivos del Acuerdo de París. A fin de incentivar cambios tecnológicos importantes, será necesaria la colaboración internacional entre las naciones que comercian, la regulación, las subvenciones y el uso de instrumentos basados en el mercado (por ejemplo, impuestos medioambientales, compensaciones de carbono, sistemas de comercio de créditos de carbono) (Cullinane & Yang, 2022; Lagouvardou et al., 2020; Psaraftis, 2012; Psaraftis & Kontovas, 2020). Las prácticas y los buques de transporte marítimo (tanto de productos del mar como de cualquier otro tipo de carga comercializada) están regulados básicamente a escala internacional a través de la OMI y de diversas sociedades nacionales de clasificación cuyos datos se utilizan como base para actividades críticas como la provisión de seguros marítimos. Los reglamentos y normas aplicables a los buques pesqueros y a la cría de marisco están controlados por cada país dentro de sus aguas territoriales y por diversos organismos regionales de gestión de la pesca en aguas internacionales.

El suministro a gran escala de electricidad descarbonizada y de combustibles sintéticos bajos en carbono (como el hidrógeno verde, el amoníaco o diésel sintético sin emisiones) será necesario para descarbonizar muchos aspectos clave de la industria: la producción de gránulos para piensos, la construcción naval, los buques pesqueros, las piscifactorías, las plantas de procesamiento de pescado, los buques de carga de larga distancia y los segmentos de reciclaje de buques de la cadena de valor de los productos del mar. Las tecnologías de suministro de energía para descarbonizar la mayor parte de la cadena de valor de la pesca ya existen, pero no los incentivos de mercado y normativos para desplegarlas a gran escala. Estos incentivos deberán incorporarse a las políticas. La electricidad limpia es un requisito previo para el suministro de energía, para la producción de gránulos para piensos, la construcción naval, el reciclaje de buques y el procesamiento de pescado; para descarbonizar los buques pesqueros, las piscifactorías y el transporte de carga se necesitarán infraestructuras que proporcionen tanto electricidad limpia como combustibles sintéticos de cero emisiones.

Se necesitan ejercicios nacionales de trazado de rutas para comprender la situación de partida de la flota pesquera y de los sectores de cría de marisco y para trazar un rumbo hacia las emisiones cero en consonancia con los planes nacionales de descarbonización. Los datos sobre las actividades pesqueras y acuícolas suelen ser escasos o estar muy agregados con otras actividades económicas, lo que puede dificultar el diseño de políticas. A nivel nacional, los departamentos gubernamentales y las asociaciones del sector deberán establecer primero un inventario de los activos existentes, como la extensión y la calidad de la flota pesquera. A continuación, se puede crear una transición gradual hacia una pesca sin emisiones de carbono, teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada país (tecnológicas, sociales, económicas y normativas) y las consideraciones específicas de cada especie. Entre las áreas que merecen ser exploradas se encuentran el impacto de las medidas no técnicas, como la elección intencionada de las especies que se van a cultivar o pescar; las perspectivas de modernización de las explotaciones y los buques

pesqueros existentes para reducir los residuos y utilizar las mejores prácticas y tecnologías disponibles; el uso de combustibles *drop-in* que puedan ofrecer reducciones incrementales de las emisiones y funcionar con los buques y la infraestructura portuaria existentes, como el biodiésel (Sevim & Zincir, 2022); y los plazos para introducir combustibles y diseños de buques alternativos. El hidrógeno y el amoníaco ecológicos se consideran los combustibles favoritos para sustituir al diésel marino, mientras que el GNL se considera una opción a corto plazo (Gray et al., 2021; Inal et al., 2022; McKinlay et al., 2021; Moshiul et al., 2022). En varios mercados, como Noruega, Francia y Corea del Sur, se están construyendo buques propulsados por hidrógeno, que pronto entrarán en servicio; por ejemplo, Hyundai está diseñando buques pesqueros propulsados por hidrógeno (Nazir et al., 2020). Se espera que los combustibles sintéticos fabricados a partir de electricidad renovable sean competitivos en costos con el diésel marino convencional en la década de 2030 (Horvath et al., 2018).

Lograr la pesca con cero emisiones netas exigirá la coordinación de las partes responsables de la política agrícola e industrial, de la navegación y las actividades marítimas y de la regulación del sector energético, así como un apoyo específico a las empresas. Los componentes energéticos y de emisiones de la cadena de valor de la pesca no suelen encajar bien en la estructura de los departamentos gubernamentales existentes. Por ejemplo, un departamento puede regular el diseño y la seguridad de los buques, otro puede ocuparse de la política y las normas agrícolas, otro puede gestionar los problemas medioambientales de los océanos y las costas, y otro puede establecer políticas energéticas. Por lo tanto, la coordinación y el acuerdo entre instituciones intergubernamentales serán fundamentales para establecer y mantener una combinación y dirección de políticas coherentes a lo largo del tiempo. Gran parte de la industria pesquera en muchos países suele contar con muchas pequeñas y medianas empresas que pueden carecer de recursos internos para planificar y emprender cambios a gran escala en las operaciones comerciales o invertir en la investigación y el desarrollo pertinentes; por lo tanto, es probable que estas empresas necesiten el apoyo del gobierno, tanto mediante el suministro de información como a través de la financiación. Por ejemplo, los estudios realizados en Noruega, una de las principales potencias pesqueras, sugiere que las empresas más grandes y consolidadas están intentando adoptar cuanto antes los combustibles bajos en carbono para el transporte marítimo, mientras que las empresas más jóvenes y pequeñas van a la zaga (Mäkitie et al., 2022).

La eliminación posterior de los buques pesqueros requiere la creación de una economía más circular, lo que exigirá una fuerte coordinación a nivel mundial debido a la naturaleza internacional de las operaciones de desguace y reciclaje de buques. Aportar una mayor circularidad a las cuestiones relacionadas con el final de la vida útil requerirá un esfuerzo coordinado a escala mundial entre la OMI y las sociedades nacionales de clasificación naviera. Los gobiernos de las principales naciones de desguace de buques (India, Pakistán, Bangladesh, Turquía y China) serán importantes para introducir estos cambios.

ANÁLISIS POR PAÍS

CAPÍTULO 5

COLOMBIA

5.1 Conclusiones principales

La descarbonización de los plásticos, los textiles, la fabricación de automóviles y la pesca en Colombia requiere una estrategia industrial global de descarbonización.

Punto neurálgico: para crear industrias con cero emisiones netas, será necesario crear una red eléctrica de cero emisiones y facilitar el acceso a combustibles sintéticos importados o de producción nacional, como el hidrógeno y el amoníaco ecológicos.

Punto neurálgico: la política y la dirección gubernamentales son casi con toda seguridad necesarias para proporcionar acceso a combustibles y fuentes de electricidad bajos en carbono para cumplir los compromisos y plazos del Acuerdo de París.

Oportunidad: Colombia presentó una estrategia de descarbonización a las Naciones Unidas y ya está alineando documentos clave de política económica, industrial y energética como el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, la Política de Reindustrialización y el Plan Energético Nacional (PEN) 2020-2050, dentro de este marco general. Como resultado, ya es posible iniciar el proceso de elaboración de hojas de ruta estratégicas de descarbonización para los distintos sectores industriales.

Oportunidad: Colombia comenzó a ampliar el acceso regional a la electricidad y a mejorar la transmisión de la red entre sus regiones para trasladar la electricidad de las zonas con abundantes recursos de energías renovables a las zonas que son centros de demanda.

Oportunidad: Colombia ya es un líder regional en el pensamiento sobre la economía circular y la producción nacional de combustible de hidrógeno verde a partir de recursos renovables, dos componentes clave de una hoja de ruta industrial con cero emisiones netas.

Oportunidad: Colombia podría explorar el concepto de crear clústeres industriales neutros en GEI para compartir infraestructuras críticas como la CAC, el hidrógeno y el amoníaco. Esta puede ser una oportunidad para crear oportunidades en regiones económicamente deprimidas del país.

5.2 Descripción general

El objetivo de esta sección es explorar opciones para situar a las industrias colombianas del plástico, textil, automovilística y pesquera en una trayectoria hacia una economía con cero emisiones netas. Las industrias del plástico, textil, de fabricación de automóviles y pesquera son una parte importante de la economía colombiana, y en conjunto son responsables del 8% de la actividad exportadora (OEC, 2022). Colombia reconoció las múltiples amenazas que surgen del cambio climático mediante el reconocimiento del Acuerdo de París en la legislación nacional (Congreso de la República de Colombia, 2017) y la presentación de objetivos a la CMNUCC como parte de la Contribución Nacionalmente Determinada (CND) oficial de Colombia, que señala la intención de lograr reducciones significativas en las emisiones para 2030 (República de Colombia, 2020) y objetivos de cero emisiones netas para 2050 (Gobierno de Colombia, 2021). Tanto el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (DNP, 2023) como la próxima Política de Reindustrialización (MIN-CIT, 2023) abogan explícitamente por la descarbonización industrial y una transición energética verde. Los riesgos climáticos para Colombia incluyen la pérdida de territorios costeros por la subida del nivel del mar (Nevermann et al., 2022), el aumento de la variabilidad de la energía hidroeléctrica y la vulnerabilidad del sistema eléctrico a los períodos secos (Arango-Aramburo et al., 2019; Restrepo-Trujillo et al., 2020), la escasez de agua (Molina & Bernhofer, 2019; Ríos Hernández et al., 2022) y la disminución de la productividad agrícola (Ospina Noreña et al., 2017; Quiroz et al., 2018).

Las cuestiones clave para el objetivo de Colombia de descarbonizar la actividad industrial se refieren a la disponibilidad de electricidad baja en carbono y al papel cambiante de la industria de los combustibles fósiles. La mayor parte de la electricidad de Colombia (70% - 86% durante el período 2016-2020) en los últimos años se generó a partir de 17 GW de energía hidroeléctrica instalada (UPME, 2020), pero se reconoció que el sistema es cada vez más vulnerable en años secos (Arango-Aramburo et al., 2019; Henao et al., 2020). En consecuencia, Colombia estableció planes para expandir y diversificar su sistema eléctrico utilizando energías renovables no hidroeléctricas en el último plan energético nacional (Plan Energético Nacional (PEN) 2020–2050) (UPME, 2019a).

Colombia es el mayor productor de carbón de América del Sur (EIA, 2022) y un importante productor de petróleo y gas, la extracción de recursos para la exportación contribuyó históricamente al desarrollo humano y económico del país (Strambo & González Espinosa, 2020; Viviana & Castillo, 2019). Por lo tanto, la política energética debe tener en cuenta el papel cambiante de los combustibles fósiles a nivel mundial y nacional. De hecho, el sector colombiano de los combustibles fósiles corre el riesgo de entrar en un período de declive. Una gran parte del gas natural colombiano ya se está reinyectando en yacimientos petrolíferos para aumentar la producción, y algunos estudios sugieren que los recursos nacionales tocaron techo, por lo que es probable que Colombia se convierta en un importador global neto de combustibles fósiles a finales de la década (Chavez-Rodriguez et al., 2018). En un futuro mundo con cero emisiones netas también es muy posible que la minería de carbón colombiana para la exportación se convierta en una propuesta comercial menos atractiva a medida que los mercados dejen de importar carbón (Oei & Mendelevitch, 2019; Weber & Cabras, 2021). Por ejemplo, en los principales mercados de exportación, como la UE, la búsqueda de una mayor seguridad energética a raíz de la guerra entre Rusia y Ucrania puede dar lugar a un aumento del uso del carbón a corto plazo, solo para ver la dependencia del carbón importado eliminado del sistema energético de la UE a largo plazo. La figura 5.1 muestra que el carbón y el coque representan actualmente alrededor del 15% de las exportaciones colombianas (\$4,8 mil millones), mientras que el crudo y los productos refinados del petróleo representan el 28% (\$9 mil millones) (OEC, 2022). Los principales mercados de exportación de los productos

colombianos (consulte la figura 5.2) son Estados Unidos (30%, \$9,6 mil millones), la UE (13%, \$4,1 mil millones) y China (9%, \$2,8 mil millones). Un futuro sin emisiones netas ofrece una serie de oportunidades a la industria colombiana de los combustibles fósiles para redistribuir su importante capital industrial y humano con el fin de proporcionar servicios y productos muy necesarios para la transición energética, como se analiza con más detalle en los capítulos 5.7 y 5.8.

Figura 5.1: exportaciones colombianas al resto del mundo, 2020, codificación HS4 (los colores corresponden a diferentes grupos de códigos comerciales HS4) (OEC, 2022)

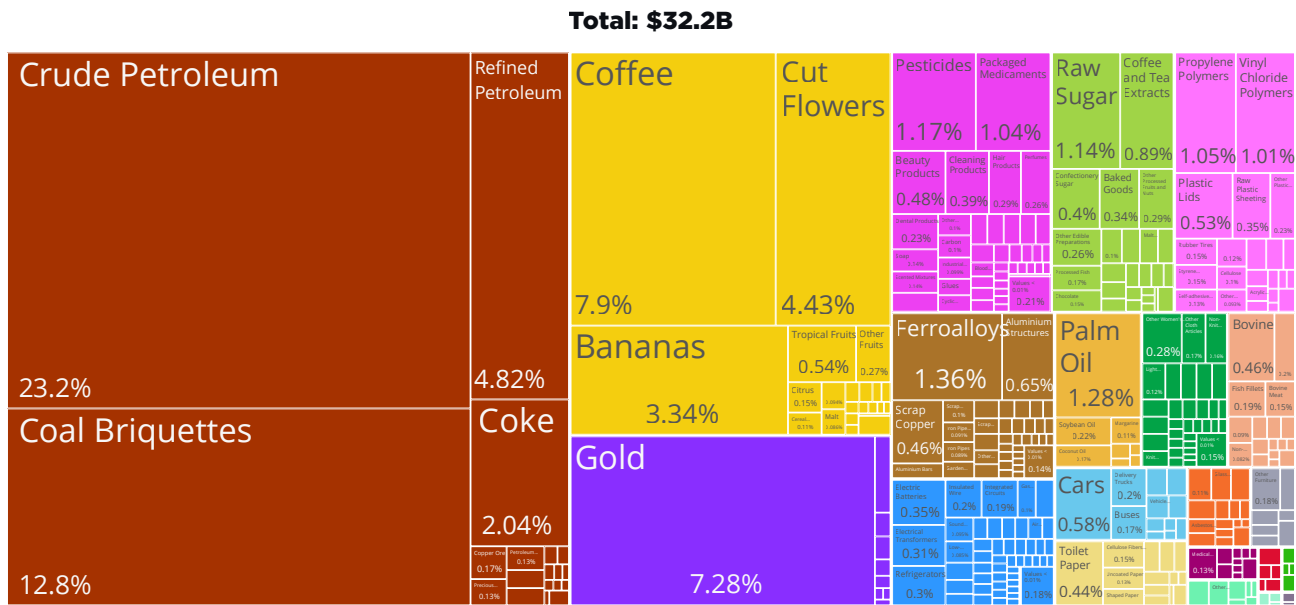
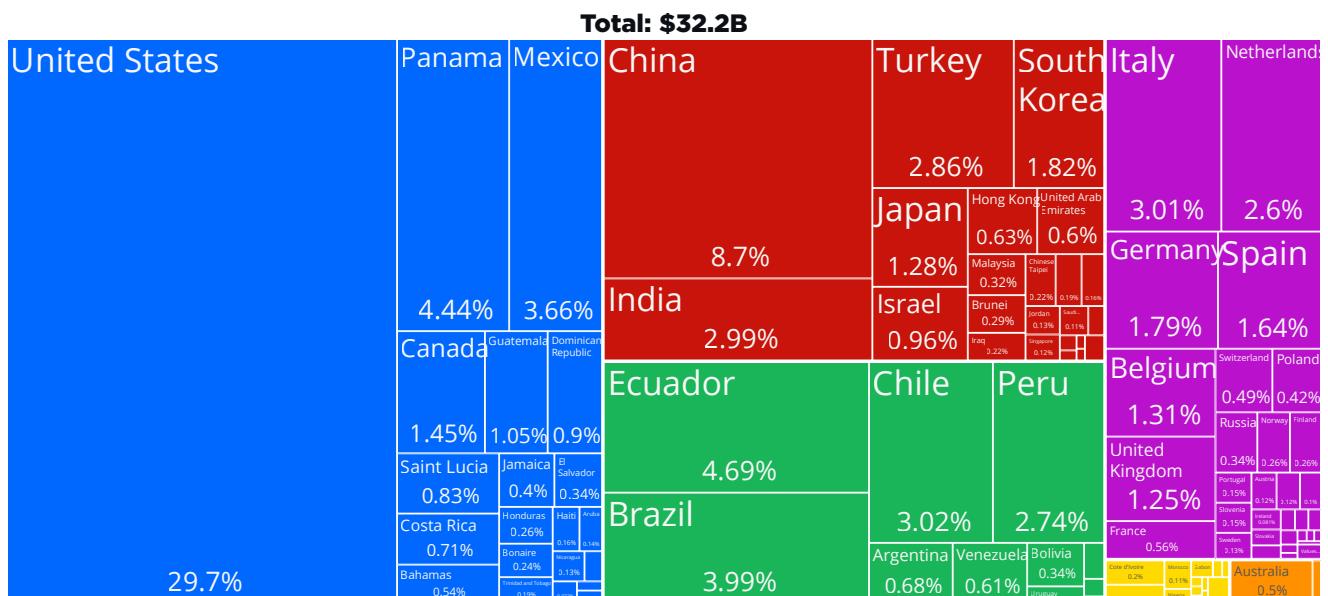


Figura 5.2: exportaciones colombianas al resto del mundo, 2020, porcentaje por país (OEC, 2022)



5.3 Descarbonización de la industria del plástico en Colombia

Resumen del mercado

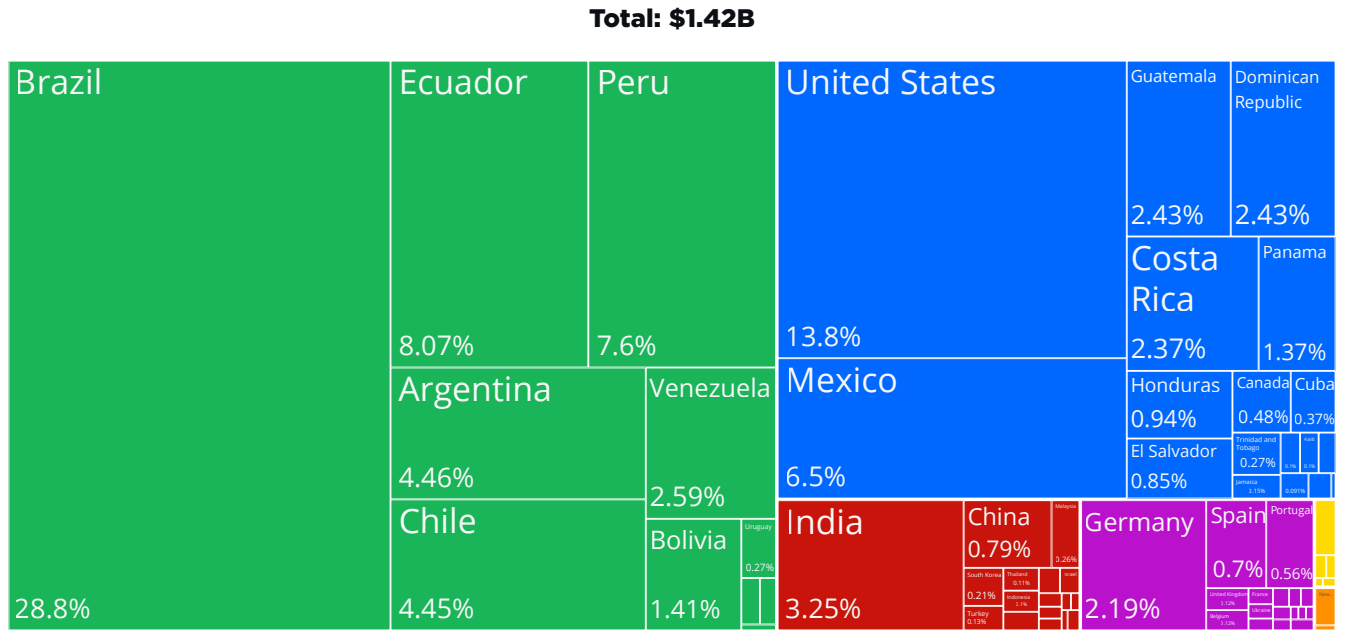
Los plásticos y cauchos sintéticos representaron \$1,42 mil millones de las exportaciones colombianas en 2020, es decir, cerca del 4,4% del total (OEC, 2022). Los polímeros a granel (propileno y cloruro de vinilo combinados) representan una gran fracción (47%) de las exportaciones totales; los productos plásticos acabados también son significativos, en particular las láminas de plástico (13%) y las tapas de plástico (8%) (consulte la figura 5.3). Casi todos los productos plásticos de Colombia (90%) se exportan a nivel regional a América del Sur y del Norte, y son pocos los que se envían a Europa o Asia. Brasil destaca por ser un mercado en especial importante para los plásticos colombianos; es el destino del 29% (\$409 millones) de las exportaciones de plásticos, la mayoría de los cuales son polímeros a granel (cloruro de vinilo, propileno y estireno) en bruto que probablemente se utilicen en las industrias brasileñas para fabricar productos acabados.

Figura 5.3: exportaciones colombianas de plásticos y cauchos, 2020, porcentaje por categoría HS4 (OEC, 2022)

Total: \$1.42B

Propylene Polymers 23.7%	Plastic Lids 12%	Rubber Tires	3.49%	Styrene Polymers	3.33%	Self-adhesive Plastics	2.9%
		Polyacetals	2.75%	Plastic Housewares	1.76%	Plastic Building Materials	1.18%
Vinyl Chloride Polymers 22.9%	Raw Plastic Sheeting 8.03%	Cellulose	2.28%	Rubber Apparel	1.09%	Acrylic Polymers	1%
		Other Plastic Products	0.66%	Amino-resins	0.71%		
	Other Plastic Sheetings 5.1%	Rubber	2.11%	Rubber	0.66%	Ethylene Polymers	0.47%
		Plastic Pipes	1.95%	Natural Polymers	0.3%		
		Other Rubber Products	0.51%	Other Rubber Products	0.18%		
				Other Vinyl Polymers	0.5%		

Figura 5.4: exportaciones colombianas de plásticos y cauchos, 2020, porcentaje por destino (OEC, 2022)



Oportunidades tecnológicas

Existen oportunidades para reducir las emisiones del sector de los plásticos a lo largo de toda la cadena de valor (consulte el capítulo 1 para obtener más detalles). A fin de abordar las emisiones procedentes de las materias primas, el enfoque clave para los plásticos es sustituir las materias primas basadas en combustibles fósiles por biomasa (Negri & Ligthart, 2021; Saygin & Gielen, 2021; Scott et al., 2020; Zheng & Suh, 2019), dióxido de carbono capturado en el aire (Lange, 2021; Palm et al., 2016; Palm & Svensson Myrin, 2018) o carbono reciclado procedente de residuos (Carus et al., 2020; Moretti et al., 2020). La fabricación de resinas y productos acabados requerirá un suministro de electricidad y calor a partir de fuentes libres de carbono, como una red eléctrica de cero emisiones (Tullo, 2021) y combustibles de bajas emisiones, como el hidrógeno o el amoníaco ecológicos (Arnaiz del Pozo & Cloete, 2022; C. Bauer, Treyer, et al., 2022). Descarbonizar el transporte de materias primas y productos acabados requeriría utilizar electricidad o combustibles sintéticos para el sector del transporte de mercancías (carretera (Meyer, 2020), ferrocarril (IEA, 2019; Rungskunroch et al., 2021), aviación (Bauen et al., 2020; IEA, 2021c; Schäfer et al., 2019) y transporte marítimo (Bouman et al., 2017; IEA, 2021e; Mallouppas & Yfantis, 2021)). La eliminación de los plásticos al final de su vida útil requerirá infraestructuras e incentivos adecuados para que todos los plásticos que permanezcan en uso puedan reciclarse. En última instancia, esto puede requerir nuevas químicas de polímeros (Gandini, 2008; Hatti-Kaul et al., 2020) y productos diseñados para el reciclado (K. Daehn et al., 2022); mientras tanto, la recolección y el procesamiento de los residuos plásticos existentes, muchos de los cuales se desechan en el medio ambiente, deben mejorar (CEIL, 2019; Lau et al., 2020).

Políticas existentes

En los últimos años, Colombia se centró en una serie de políticas para limitar los daños medioambientales de los residuos plásticos. Colombia implementó una directiva de gestión de residuos en 2018 destinada a evitar el vertido a cielo abierto de materiales de envasado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). Los productores deben presentar datos al departamento gubernamental responsable de las licencias ambientales, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), y someterse a auditorías periódicas. También se están realizando esfuerzos para reducir el uso de plásticos de un solo uso a través de diversas estructuras de incentivos/penalizaciones (DNP, 2018; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019) y para prohibir por completo los plásticos de un solo uso en las islas del Caribe colombiano (Congreso de la República de Colombia, 2019).

Colombia también es un líder regional en el pensamiento y las políticas de la economía circular, habiendo establecido una estrategia nacional de economía circular que crea una plataforma para que los productos industriales y de consumo avancen hacia circuitos cerrados de flujos de materiales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio, 2019). Un importante documento político relacionado con relevancia directa para el sector de los plásticos es el plan nacional colombiano para la gestión sostenible de plásticos de un solo uso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). El plan se basa en políticas anteriores, pero va más allá de la gestión de residuos y promueve principios de diseño ecológico para la reutilización y el reciclado de envases, la contratación pública sostenible y nuevos incentivos, como créditos fiscales, para facilitar y fomentar su adopción.

5.4 Descarbonización de la industria textil en Colombia

Resumen del mercado

En 2020, el valor de las exportaciones colombianas de textiles, calzado, sombrerería y pieles de animales ascendió a \$709 millones, lo que representa el 2,2% de todas las exportaciones (OEC, 2022). Estos bienes incluyen tanto productos acabados (por ejemplo, prendas de vestir, equipaje, muebles para el hogar y otros bienes blandos) como productos intermedios (por ejemplo, telas e hilos a granel) (consulte la figura 5.5). La mayor parte del comercio de exportación (88%) se realiza dentro del continente americano, siendo Estados Unidos el mercado más grande e importante (39%) (consulte la figura 5.6).

Figura 5.5: exportaciones colombianas de textiles, calzado y sombrerería, pieles de animales, 2020, por categoría HS4 (OEC, 2022)

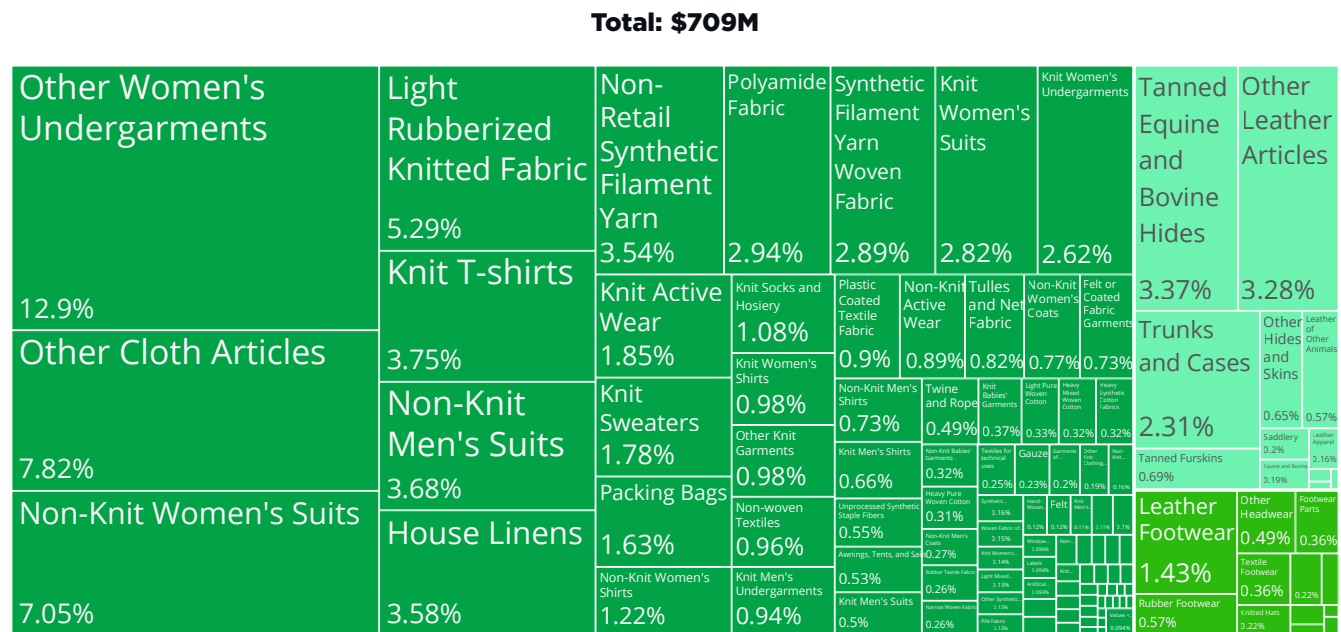
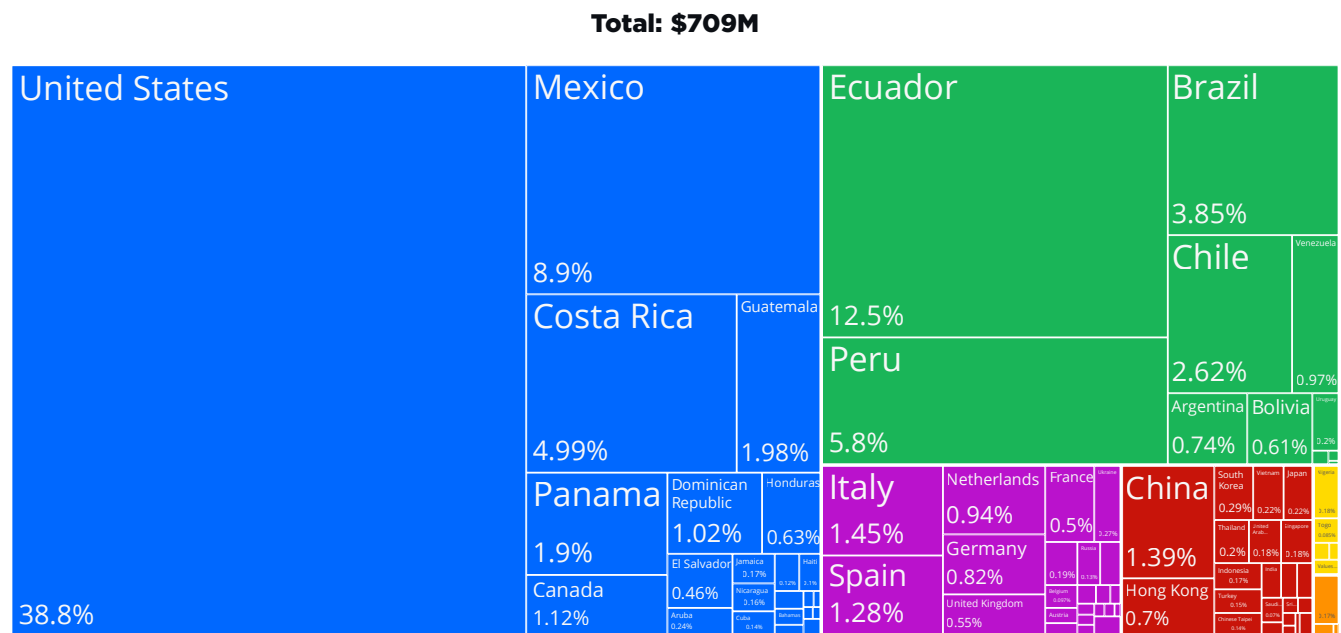


Figura 5.6: exportaciones colombianas de textiles, calzado, sombrerería y pieles de animales, 2020, porcentaje por destino (OEC, 2022)



Oportunidades tecnológicas

Existen oportunidades para reducir las emisiones de los textiles colombianos en toda la cadena de valor de los recursos aguas arriba, la fabricación de fibras y productos acabados, el transporte y las etapas de fin de vida (consulte el capítulo 2 para obtener más detalles). Como las fibras sintéticas son básicamente plásticos, el debate sobre las oportunidades tecnológicas para la descarbonización de los plásticos (consulte el capítulo 1) es relevante para los textiles. Para las fibras naturales, que son un componente importante de las exportaciones colombianas (fibras vegetales, algodón, pieles de animales), la descarbonización de las emisiones agrícolas es un aspecto importante. El uso directo de energía en vehículos agrícolas, bombas de riego y otros equipos de cosecha y procesamiento debe electrificarse con electricidad limpia o sustituirse por equipos que utilicen combustibles con cero emisiones de carbono en la mayor medida posible (Hedayati et al., 2019). Lo ideal sería que los fertilizantes de potasio y fósforo procedieran de explotaciones mineras con cero emisiones netas (Ouikhalfan et al., 2022); la producción cero neto de fertilizantes nitrogenados requiere amoníaco verde (Armijo & Philibert, 2020; Chehade & Dincer, 2021; IEA, 2021b). La descarbonización agrícola también requiere medidas para equilibrar las fuentes de emisiones y los sumideros de carbono mediante cambios en el uso de la tierra (Harwatt et al., 2020; Reay, 2020) o la captura y el almacenamiento de carbono (Hanna et al., 2021). Esto se debe a que las plantas no absorben el 100% del fertilizante aplicado, lo que genera emisiones de óxido nitroso, un potente gas de efecto invernadero (Gregorich et al., 2015).

Ya es tecnológicamente posible electrificar todos los procesos principales de la fabricación textil, incluido el calor a alta temperatura, hasta 160 °C (Arpagaus et al., 2018). Por lo tanto, la principal vía para alcanzar cero emisiones netas en esta parte de la cadena de valor será convertir los procesos para que utilicen electricidad, junto con la reducción a gran escala de las emisiones de la red eléctrica. El transporte de productos acabados al mercado también requerirá la descarbonización de los modos de transporte empleados (por ejemplo, transporte de mercancías por carretera, aviones, ferrocarriles, barcos) mediante el uso de electricidad o combustibles sintéticos con cero emisiones (Kaack et al., 2018). En la etapa de eliminación al final de la vida útil, las mismas estrategias discutidas para los plásticos (consulte el capítulo 1) son muy pertinentes para los textiles. Esto se debe a que dos tercios de los textiles son plásticos (Palacios-Mateo et al., 2021) y a que las mezclas de plástico y fibras naturales (por ejemplo, algodón y poliéster) son cada vez más comunes. La principal vía para lograr la eliminación limpia de los textiles al final de su vida útil será conseguir la circularidad de los materiales mediante la mejora del reciclado y la adopción de los principios de la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2017a; McKinsey & Company, 2022; Shirvanimoghaddam et al., 2020; Wojciechowska, 2021). También es fundamental fomentar un cambio en la producción de prendas de mayor calidad, con una vida útil más larga y una mayor durabilidad (Nature Climate Change, 2018; Niinimäki et al., 2020).

Políticas existentes

La reducción de las emisiones de la industria de la confección o el cierre de los bucles de materiales asociados no se abordan específicamente en la estrategia nacional de economía circular de Colombia, aun así, muchos de los principios transversales destacados en ese documento podrían aplicarse directamente a la producción textil (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio, 2019). La investigación primaria sobre la sostenibilidad en la industria textil colombiana continúa, ya que examina las preferencias de los consumidores (Mogollón Murcia & Parra Hermida, 2020), el diseño ecológico (Dotor Robayo,

2020) y los estudios de casos de empresas que aplican prácticas de economía circular (Arévalo Campos & Méndez Navarro, 2022). La mejora de la calidad general de los productos textiles colombianos, con los principios de sostenibilidad y moda lenta como principales factores de valor agregado, se considera una posible respuesta a la creciente competencia de Asia (Jarpa & Halog, 2021). Los investigadores señalaron que Colombia tiene tradiciones culturales y artesanales únicas que pueden encajar bien con un espíritu de moda lenta en la producción y exportación de prendas de vestir (Cordoba, 2018; Spehar, 2021).

5.5 Descarbonización de la industria automovilística en Colombia

Resumen del mercado

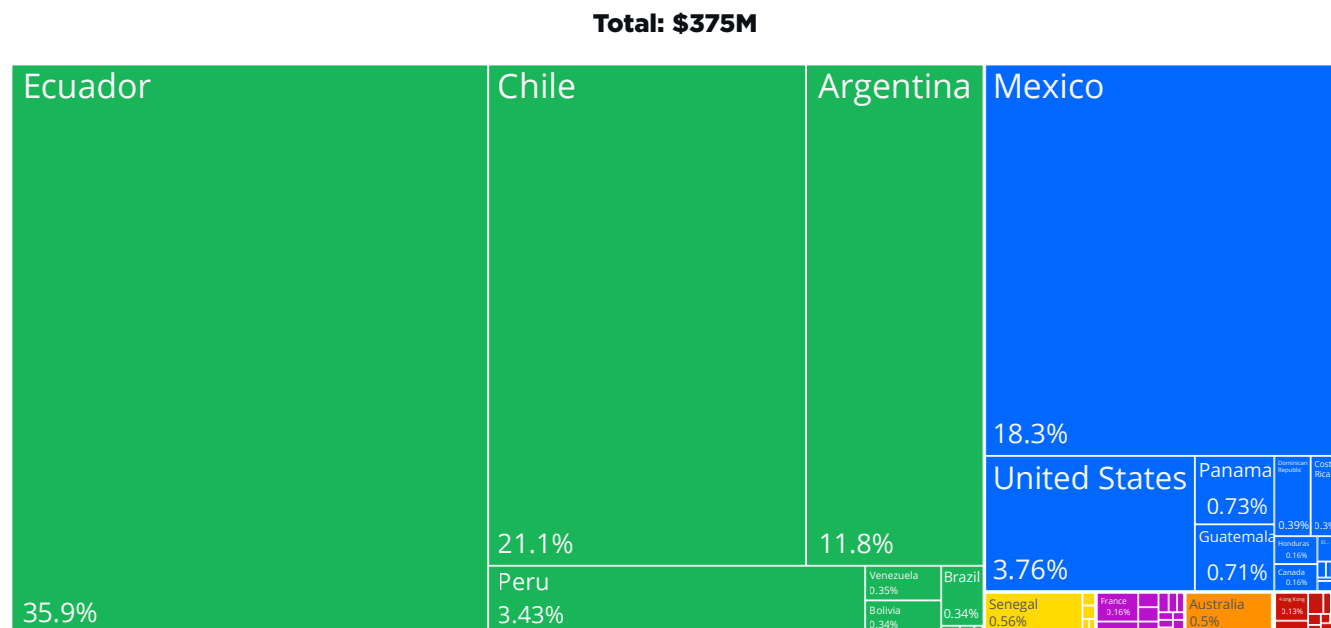
Las exportaciones de la industria automotriz en Colombia ascienden a \$345 millones, lo que representa alrededor del 1,1% del total de las exportaciones (OEC, 2022). Las exportaciones del sector del transporte en general (incluidas las aeronaves) están dominadas por la fabricación de automóviles (42%), autobuses (13%) y camiones de reparto (14%) (consulte la figura 5.7). Casi todas las exportaciones (98%) se dirigen a países de América del Norte y del Sur (consulte la figura 5.8), y las exportaciones de los países vecinos de América del Sur representan casi tres cuartas partes (73%) de todos los bienes exportados del sector. Ecuador (36%), Chile (21%) y México (18%) son los tres mercados de destino más importantes para la industria automotriz colombiana. Los camiones de reparto y los automóviles de fabricación colombiana son los principales componentes de las exportaciones a Ecuador. Chile importa principalmente autobuses de fabricación colombiana, y las importaciones de México son en su inmensa mayoría automóviles (>90%).

Figura 5.7: exportaciones colombianas de productos de transporte, 2020, por categoría HS4 (OEC, 2022)

Total: \$440M

Cars	Delivery Trucks	Motor vehicles; parts and accessories (8701 to 8705)	Trailers and semi-trailers, not mechanically propelled vehicles	Vehicle Bodies (including cabs) for the motor vehicles (8701 to 8705)
42.1%	14.4%	6.01%	5.71%	5.27%
	Buses	Aircraft Parts	Planes, Helicopters, and/or Spacecraft	Recreational Boats
	12.7%	4.47%	1.64%	1.53%
		Motorcycles and cycles	Bi-Wheel Vehicle Parts	Tractors, delivery vehicles, other tractors
		2.41%	1.19%	0.37%
			0.67%	0.29%
				0.25%
				0.15%
				0.12%
				0.16%
				0.16%
				0.16%
				0.16%

Figura 5.8: exportaciones colombianas de automóviles, camiones de reparto, camiones de trabajo, motocicletas, diversas categorías de piezas de vehículos, 2020, por destino (OEC, 2022)



Oportunidades tecnológicas

Alcanzar la fabricación de automóviles sin emisiones netas requiere cambios en toda la cadena de valor (consulte el capítulo 3 para obtener más detalles). Una amplia gama de insumos aguas arriba debe lograr la neutralidad de carbono; estos incluyen la minería (Igogo et al., 2021), el acero (Bataille, Stiebert, et al., 2021; IEA, 2020b, 2021f; Mission Possible Partnership, 2021; van Sluisveld et al., 2021; Yu et al., 2021), la producción de aluminio (Gomilšek et al., 2020; IEA, 2021a; Nature, 2018), la fabricación de vidrio (Furszyfer Del Rio et al., 2022; Griffin et al., 2021) y la producción de baterías (Aichberger & Jungmeier, 2020; Degen & Schütte, 2022). Lograr cero emisiones netas en la propia línea de producción de vehículos exigirá eficiencia energética, la electrificación de tantos procesos como sea posible con electricidad de red con cero emisiones de carbono y el uso de hidrógeno verde para el calor de procesos a alta temperatura (Bataille et al., 2018; Bataille, Nilsson, et al., 2021; Rissman et al., 2020). El cambio a vehículos más ligeros (Czerwinski, 2021; Kacar et al., 2018; Shaffer et al., 2021) y la producción de vehículos eléctricos en lugar de vehículos impulsados por combustibles fósiles (Crabtree, 2019; Kawamoto et al., 2019; Rietmann et al., 2020) son otras cuestiones importantes que deben abordarse para reducir las emisiones de los propios vehículos.

Los elementos de transporte de mercancías de la cadena de suministro de la automoción (tanto los productos acabados como los componentes intermedios) deben electrificarse o alimentarse con combustibles sintéticos líquidos o gaseosos sin emisiones para el transporte de mercancías por carretera (Meyer, 2020), ferrocarril (IEA, 2019), avión (Bauen et al., 2020; IEA, 2021c; Viswanathan & Knapp, 2019) y barco (Bouman et al., 2017; Mallouppas & Yfantis, 2021). La eliminación de los vehículos al final de su vida útil debe replantearse para avanzar hacia flujos de materiales circulares. En principio, casi todas las piezas de un vehículo se pueden reciclar, pero hay que armonizar el diseño de los vehículos, la infraestructura de reciclado y los incentivos de mercado adecuados. Los fabricantes pueden desempeñar un papel importante

en la mejora de la reciclabilidad de los vehículos durante el proceso de diseño, tanto mediante la selección de materiales que puedan reciclarse con facilidad como estructurando los componentes del vehículo de manera que puedan desmontarse fácilmente para su reutilización como piezas de repuesto, o separarse en flujos de reciclaje individuales (es decir, mediante los principios estándar de la economía circular (Aguilar Esteva et al., 2021; Baars et al., 2021; He et al., 2021)). Esto se aplica en especial a los paquetes de baterías, (C. Bauer, Burkhardt, et al., 2022; Harper et al., 2019) pero también a otros componentes estructurales, como los parabrisas y las llantas (McAuley, 2003; Nakano & Shibahara, 2017; Soo et al., 2017).

Políticas existentes

Colombia aún no cuenta con un programa político integrado que cubra la descarbonización de toda la cadena de suministro de la automoción y del sector automovilístico. Sin embargo, se está trabajando en varias áreas que podrían formar componentes clave de dicha estrategia. Por ejemplo, Colombia exploró una serie de escenarios de mitigación climática para los sectores energético y minero, y algunos ellos muestran el uso de energías renovables en las operaciones mineras (Ministerio de Minas y Energía, 2018a). La estrategia nacional de economía circular aborda directamente la reutilización y el reciclaje de las llantas de los vehículos como un importante flujo de materiales (Ministerio de Minas y Energía, 2018a).

5.6 Descarbonización de la industria pesquera en Colombia

Resumen del mercado

La industria colombiana de productos del mar representa una pequeña fracción de la economía; en 2020, el pescado y los crustáceos supusieron unos \$209 millones de exportaciones, aproximadamente el 0,7% de la actividad exportadora total. Los dos segmentos de mercado más importantes (consulte la figura 5.9) son los filetes de pescado preparados y otras formas de pescado procesado. Colombia exporta sus productos del mar principalmente a América del Norte, con Estados Unidos y Canadá acaparando casi la mitad de todo el comercio en 2020 (consulte la figura 5.10), y con el comercio restante dividido casi por igual entre la UE y los países vecinos de América del Sur (Chile, Ecuador, Bolivia, Perú).

Figura 5.9: exportaciones colombianas de productos animales y alimenticios, 2020, por categoría HS4 (OEC, 2022)

Total: \$1.92B

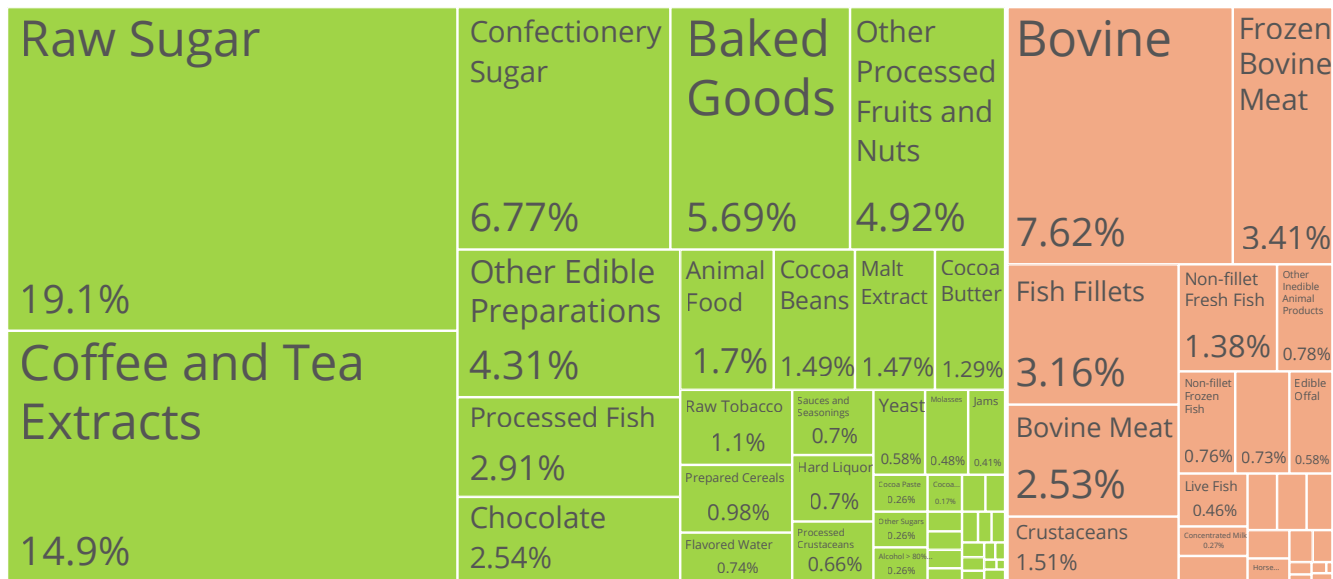
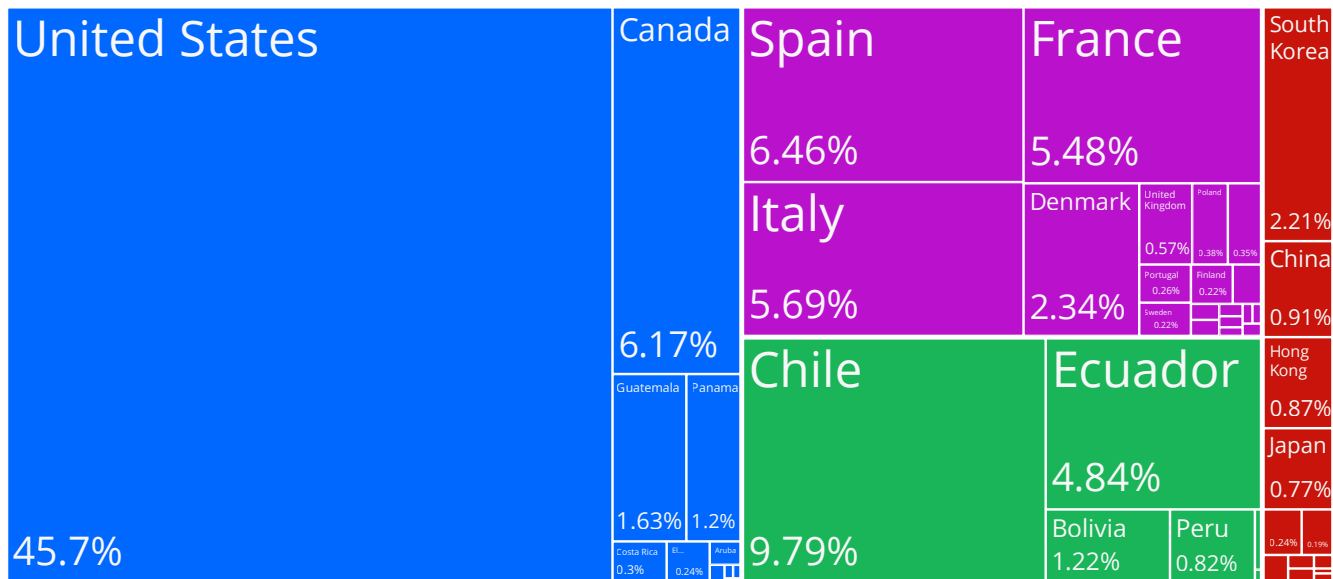


Figura 5.10: exportaciones colombianas de pescado vivo, pescado fresco no fileteado, pescado congelado no fileteado, filetes de pescado, pescado seco salado ahumado y salmuera, crustáceos, moluscos, pescado procesado y crustáceos procesados, 2020, por destino (OEC, 2022)

Total: \$209M



Oportunidades tecnológicas

Lograr la descarbonización en este sector exige la neutralidad de carbono en toda su cadena de valor: desde la energía utilizada en la producción de materias primas aguas arriba para embarcaciones y piensos, el uso de buques marítimos, el transporte de productos al mercado y el reciclaje de buques al final de su vida útil (consulte el capítulo 4 para obtener más detalles) (Mallouppas & Yfantis, 2021; Vakili, Ölçer, et al., 2022). La neutralidad de carbono es necesaria en la cadena de insumos agrícolas que produce los piensos para las granjas de marisco (Jones et al., 2022), para los combustibles y la electricidad que alimentan el procesado y envasado del marisco (Alzahrani et al., 2020; Scroggins et al., 2022), y para el transporte de los productos acabados al mercado (Psarftis & Kontovas, 2020). Dado que los buques y las infraestructuras portuarias tienen una larga vida útil, medida en décadas (Bullock et al., 2022), existe una inercia considerable en el sistema establecido, que depende en gran medida de los combustibles fósiles. Es casi seguro que la competencia de precios y la innovación por sí solas no lograrán los amplios cambios necesarios a tiempo para cumplir los objetivos del Acuerdo de París (es decir, para 2050 y 2070); será necesaria la creación deliberada de mercados y normativas para incentivar y ordenar el cambio tecnológico (Cullinane & Yang, 2022; Lagouvardou et al., 2020).

La descarbonización de la industria pesquera requerirá una planificación política a largo plazo e inversiones en innovación para identificar la composición y la condición de las flotas pesqueras nacionales y los sectores de cría de mariscos asociados, y para trazar un rumbo hacia las emisiones cero en consonancia con los objetivos nacionales de descarbonización. La planificación de los cambios necesarios en este sector no puede llevarse a cabo de forma aislada del resto de la economía. El apoyo de otros sectores como la agricultura, la electricidad y el suministro de combustible, es fundamental para descarbonizar la pesca. Por lo tanto, para avanzar se necesitará de una profunda coordinación entre los organismos nacionales responsables de la agricultura y la acuicultura (es decir, la cría de mariscos), la legislación marítima, la gestión de los ecosistemas y los reglamentos técnicos que rigen las embarcaciones marítimas. Debido a que la pesca y el transporte de productos del mar cruzan fronteras internacionales, la coordinación de las actividades nacionales de descarbonización también tendrá que alinearse con organismos internacionales como las sociedades de certificación navieras (por ejemplo, Lloyd's Register, American Bureau of Shipping, Nippon Kaiji Kyokai), que aseguran los buques de carga mientras viajan a través de las fronteras, y la Organización Marítima Internacional (OMI) (Milios et al., 2019). Casi toda la deconstrucción y el reciclado de buques del mundo se produce en sólo cinco mercados: India, Pakistán, Bangladesh, Turquía y China (UNCTAD, 2021); por tanto, será necesaria la implicación directa de los gobiernos de esos países para hacer posible una economía más circular para los buques de transporte marítimo.

Políticas existentes

Un conjunto de leyes colombianas que se refuerzan mutuamente rigen los principios que subyacen a la conservación y el uso sostenible de los recursos acuáticos, el registro y el funcionamiento de las explotaciones acuícolas y los requisitos técnicos y administrativos para operar buques pesqueros en aguas colombianas. Las responsabilidades se reparten entre varios organismos gubernamentales: el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), que integra la política agrícola (incluida la pesquera) y de desarrollo económico con los objetivos nacionales; el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), que dirige la política de uso de la tierra y los recursos para ordenar y equilibrar espacialmente las actividades extractivas y de conservación; y la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP), que lleva a cabo la

investigación primaria y gestiona las licencias y permisos de pesca con vistas a garantizar el mantenimiento de poblaciones de peces sostenibles. La fragmentación interinstitucional y los conflictos de intereses provocaron en ocasiones una falta de coherencia en ámbitos clave de la política pesquera (OECD, 2016). En el momento de redactar el presente documento (principios de 2023), no existe en Colombia ninguna política o normativa específica dirigida a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la industria pesquera o de la acuicultura.

5.7 Hacia una industria de plásticos, textil, automovilística y pesquera con cero emisiones netas en Colombia

Las opciones tecnológicas para reducir las emisiones de los sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero en Colombia comparten una serie de elementos estratégicos comunes. Las estrategias transversales para la descarbonización industrial que son consistentes en toda la literatura (Bataille et al., 2018; Bataille, Nilsson, et al., 2021; Lechtenböhrmer et al., 2016; Rissman et al., 2020; Thiel & Stark, 2021) incluyen:

- i.** Eficiencia de los materiales y procesos energéticamente eficientes.
- ii.** Electrificación de la energía de proceso siempre que sea posible.
- iii.** Cambio a combustibles sintéticos de bajas emisiones cuando no sea posible la electrificación.
- iv.** Captura y almacenamiento de carbono cuando sea necesario.
- v.** Circularidad y reciclaje de los materiales.
- vi.** Eliminación del dióxido de carbono.

Eficiencia de los materiales y procesos energéticamente eficientes

La eficiencia energética y la eficiencia de los materiales son componentes importantes de una hoja de ruta industrial global con cero emisiones netas; dichos componentes garantizan que se minimicen los residuos en el procesamiento de los insumos materiales. La eliminación de residuos abarata el cambio de los procesos de producción para utilizar fuentes de energía limpias y, por tanto, facilita su consecución. Esto será así en toda una serie de industrias, incluidos los sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero, en los que se centra este informe. La eficiencia energética industrial en Colombia se aborda directamente en un programa de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía de Colombia; su Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE) se actualiza aproximadamente cada cinco años y establece objetivos y acciones sectoriales específicos. Por ejemplo, el plan 2010-2015 pretendía ahorrar el 11% del consumo final de energía en la industria mediante acciones como la sustitución de motores eléctricos ineficientes, la optimización de los ciclos de funcionamiento de las calderas y la promoción de la iluminación de bajo consumo (Ministerio de Minas y Energía, 2010). El plan 2017-2022 identificó áreas de mejora significativa a nivel nacional en todas las industrias; estas incluyeron la mejora de la calidad de la energía y las mejores prácticas en calefacción eléctrica directa, la optimización de la refrigeración a través de una mejor adecuación de los equipos a las cargas, los controles automáticos de iluminación y la mejora de la iluminación natural, y la sustitución de motores eléctricos ineficientes y parcialmente cargados (UPME, 2016). Además, el plan exploraba medidas para mejorar la eficiencia de las industrias que dependían de la calefacción a alta temperatura (por ejemplo, para vidrio, cemento, cerámica y metales); las medidas incluían la recuperación de calor, la mejora de las operaciones y el mantenimiento, y cambios en los procesos, como pasar de calderas convencionales a calderas de lecho fluidizado o precalentar el agua con energía solar (UPME, 2016). El último plan 2022-2030 se basa en los dos documentos estratégicos anteriores, con recomendaciones similares, y agrega medidas como el reemplazo inmediato de refrigerantes con alto potencial de calentamiento global, la recuperación de calor en los sistemas de refrigeración, controles más inteligentes para todos los sistemas de calefacción y refrigeración, y la medición y submedición de la demanda de energía de uso final en toda la cadena de producción (UPME, 2022).

Electrificación

La electrificación de la industria con una red en gran medida libre de combustibles fósiles desempeña un papel en casi todos los escenarios de descarbonización profunda, y Colombia no es una excepción (Bataille et al., 2020). Los principios generales para la descarbonización del suministro eléctrico incluyen la planificación de una electrificación limpia a largo plazo; la creación de hojas de ruta; la disponibilidad de financiación a bajo costo para la generación, transmisión y distribución; el establecimiento de estándares de rendimiento (por ejemplo, para la intensidad de los GEI); la aceleración de los permisos y aprobaciones para la construcción de infraestructuras energéticas; y la puesta en marcha de un proceso gestionado de eliminación progresiva de la generación residual de combustibles fósiles (Fazekas et al., 2022). Los ejercicios de modelación de trayectorias de descarbonización para Colombia muestran que la intensidad de carbono de la generación de energía para abastecer la red debe reducirse en un 98% para 2050, y que la energía solar, la hidroeléctrica y el gas natural con captura y almacenamiento de carbono pueden desempeñar un papel importante (Delgado et al., 2020). Para que la industria colombiana (incluidos los sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero) alcance un nivel cero, casi el 100% de la electricidad suministrada para la producción debería proceder de fuentes de energía no fósiles.

Colombia ya cuenta con importantes recursos de energía renovable en forma de energía hidroeléctrica (UPME, 2020); el potencial de las energías renovables no hidroeléctricas, como la eólica y la solar, también es importante (Galvís-Villamizar et al., 2022; Henao et al., 2020; Moreno Rocha et al., 2022; Rueda-Bayona et al., 2019). Colombia ya tiene planes en marcha (Plan Energético Nacional (PEN) 2020–2050) para diversificar la combinación de fuentes de energía y dejar de depender excesivamente de la energía hidroeléctrica mediante el uso de otros recursos renovables, un enfoque que se adapta tanto a la resiliencia como a las perspectivas de mitigación del cambio climático (UPME, 2019a). En la actualidad, sin embargo, la mayoría de los generadores renovables no hidroeléctricos existentes se encuentran en partes del sistema eléctrico colombiano que no están interconectadas con la red nacional de transmisión, como es el caso de las islas del Caribe (Rodríguez-Urrego & Rodríguez-Urrego, 2018). El despliegue a gran escala de las energías renovables no hidroeléctricas en el continente principal aún se encuentra todavía en las primeras etapas, ya que los primeros contratos a largo plazo de energías renovables se subastaron en 2019 (Moreno & Larrahondo, 2020). Se necesita una mejor infraestructura de transmisión para que las regiones con mayor potencial de suministro de energía renovable (como la Península de la Guajira) puedan abastecer adecuadamente a los principales centros de demanda, como Bogotá, Medellín y Cali. La mejora de la infraestructura de transmisión y distribución se convirtió en una prioridad (UPME, 2021), junto con los esfuerzos para proporcionar acceso universal a la electricidad (UPME, 2019b).

Combustibles sintéticos con bajo contenido de GEI

En el momento de escribir estas líneas (principios de 2023), no todos los procesos industriales de la fabricación de plásticos y automóviles son fáciles de electrificar. Si bien las bombas de calor ya pueden suministrar temperaturas de 150 °C a partir de productos comerciales ampliamente disponibles (Arpagaus et al., 2018), es probable que para superar esta temperatura se necesiten tecnologías que se espera que estén a escala de laboratorio o de prototipo inicial para el resto de la década de 2020; llegar a temperaturas superiores, por ejemplo, a 1000 °C, puede no ser práctico solo con electricidad. Esto significa que la industria con cero emisiones netas de gases de efecto invernadero necesitará combustibles sintéticos sin GEI que puedan quemarse para proporcionar calor a alta temperatura.

Las políticas colombianas anteriores destinadas a estimular la producción de combustibles no fósiles exploraron el potencial de una industria nacional de biocombustibles (Castiblanco et al., 2015; Colmenares-Quintero et al., 2020). La bioenergía tiene el potencial de contribuir al logro de los objetivos climáticos nacionales en Colombia (OECD, 2022a; Younis et al., 2021), pero puede resultar difícil de ampliar. La creación de oportunidades de mercado para la exportación de biocombustibles puede resultar difícil. La fuerte expansión de la política de biocombustibles en Colombia también puede ser una apuesta política (Palacio-Ciro & Vasco-Correa, 2020) debido a las sensibilidades en torno a la seguridad alimentaria (Martínez-Jaramillo et al., 2019), la competencia con la tierra para la producción de alimentos y una percepción pública a menudo negativa de la propiedad de la tierra a gran escala por la agroindustria (Potter, 2020; Valbuena Latorre & Badillo Sarmiento, 2022).

El hidrógeno y el amoníaco son los principales candidatos a sustituir a los combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural, en los procesos industriales de alta temperatura. Ambos podrían producirse en el extranjero e importarse a Colombia, pero también podrían producirse en el país. Colombia tiene la geografía y la base industrial para producir electricidad de bajo costo a partir de energías renovables, un insumo clave para el llamado hidrógeno y amoníaco verdes (Muñoz-Fernández et al., 2022; Ullman & Kittner, 2022), y también podría producir el llamado hidrógeno azul a partir de la industria del carbón si

existiera una infraestructura adecuada de captura de carbono (Domínguez et al., 2022).⁵ Colombia ya cuenta con una industria petroquímica madura con la mano de obra y los conocimientos locales necesarios para producir y exportar combustibles líquidos. Un cambio de la producción de combustibles fósiles a la producción de combustibles sintéticos ecológicos podría brindar una excelente oportunidad para que la industria se reinvente a medida que las reservas nacionales de petróleo y gas disminuyen hacia finales de esta década (Chavez-Rodriguez et al., 2018). Las futuras aplicaciones del hidrógeno y el amoníaco verdes en los mercados de exportación incluyen la calefacción industrial (Philibert, 2017; Saygin & Gielen, 2021), los combustibles para el transporte marítimo (Al-Aboosi et al., 2021; McKinlay et al., 2021; Zincir, 2022), la producción de fertilizantes (Faria, 2021) y la generación de energía (Cesaro et al., 2021; Valera-Medina et al., 2018). Colombia ya puso en marcha una hoja de ruta nacional del hidrógeno, que pretende sentar las bases tanto para el uso doméstico como para las oportunidades de exportación, y tiene el objetivo a corto plazo de instalar entre 1-3 GW de capacidad de electrolizadores para 2030 (Ministerio de Minas y Energía, 2021a).

Captura y almacenamiento de carbono

Los escenarios de descarbonización profunda para Colombia incluyeron el uso teórico de la captura y almacenamiento de carbono (CAC) como medio no solo de compensar la fracción de emisiones restantes que no se pueden eliminar fácilmente (por ejemplo, las emisiones agrícolas asociadas a los fertilizantes nitrogenados), sino también como medio para crear emisiones netas negativas en general (Bataille et al., 2020; Calderón et al., 2016; Delgado et al., 2020; Younis et al., 2021). Las aplicaciones directas en los sectores colombianos de plásticos, textiles, automoción y pesca no son un requisito previo para alcanzar cero emisiones netas, pero la CAC puede desempeñar un papel importante en la mitigación de las emisiones aguas arriba de la agricultura y la minería (Igogo et al., 2021). La tecnología CAC se exploró en el escenario de mitigación más reciente y ambicioso del Ministerio de Minas y Energía de Colombia para los sectores minero y energético (Ministerio de Minas y Energía, 2018b, 2021b). En varias regiones existe una geología favorable para el almacenamiento subterráneo de CO₂ a largo plazo, como en la cuenca de los Llanos y a lo largo del valle del río Magdalena (de Carvalho Nunes & de Medeiros Costa, 2021; Mariño-Martínez & Moreno-Reyes, 2018), y se están llevando a cabo investigaciones para relacionar geográficamente a los posibles usuarios de la CAC con los emplazamientos de almacenamiento de CAC e identificar así agrupaciones espaciales para el desarrollo futuro (Duarte et al., 2022; E. Yáñez et al., 2020; É. Yáñez et al., 2022).

Circularidad y reciclaje de los materiales

Tal y como se explica en las secciones dedicadas a los sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero, la mejora de la circularidad de los materiales es fundamental para lograr cero emisiones netas derivadas de la eliminación al final de la vida útil. Ya se escribió mucho sobre los principios de la economía circular en relación con varios de estos sectores; por ejemplo, se trabajó sobre los plásticos (Barrowclough & Birkbeck, 2022; Ellen MacArthur Foundation, 2017b; Lange, 2021; World Economic Forum et al., 2016), los textiles (Ellen MacArthur Foundation, 2017a; McKinsey & Company, 2022; Shirvanimoghaddam et al., 2020; Wojciechowska, 2021) y la fabricación de automóviles (Czerwinski, 2021; He et al., 2021; Khodier

⁵ Los colores se utilizan para distinguir los diferentes impactos de la producción y las emisiones de hidrógeno. El hidrógeno verde se refiere a las tecnologías para dividir el agua por electrólisis, alimentadas por electricidad renovable, produciendo solo hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno azul se refiere a las tecnologías para dividir el gas natural en hidrógeno y dióxido de carbono que se captura y almacena (Noussan et al., 2020).

et al., 2018). En términos generales, la aplicación requiere mejoras a gran escala en la provisión de infraestructuras para recolectar y procesar los productos al final de su vida útil, la creación de fuertes incentivos para desalentar el envío de desechos a los vertederos y el vertido de residuos en el medio natural; y cambios aguas arriba en el diseño y los materiales de los productos, ya sea a través de la regulación o en consulta con la industria, para evitar la creación de productos que no puedan reciclarse.

Como se señaló en secciones anteriores, Colombia es un líder regional en el pensamiento y el desarrollo de políticas de economía circular (Calderón Márquez & Rutkowski, 2020; van Hoof & Saer, 2022). La estrategia nacional de economía circular identifica los materiales industriales y productos de consumo como una categoría prioritaria de flujo de materiales con su propio conjunto de indicadores y objetivos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio, 2019). La estrategia también se utilizó como trampolín para documentos dirigidos a sectores y productos concretos, como los plásticos de un solo uso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). Con este historial, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible tiene la oportunidad de utilizar su capacidad intelectual para abordar otros productos y sectores (como el textil y el de la automoción) con el mismo nivel de cuidado y atención al detalle. La comunidad investigadora también tiene un papel que desempeñar. La investigación identificó sectores empresariales y empresas en los que ya existen procesos circulares en la economía colombiana; entre estas áreas estudiadas se incluyen las estructuras de aluminio y acero (Torres-Guevara et al., 2021) y el hormigón (Maury-Ramírez et al., 2022) en el sector de la construcción. Es probable que ya existan redes formales o informales para tratar productos automotrices y textiles en su fase final de vida. Por lo tanto, un punto de partida sería mapear y analizar estos procesos para cuantificar sus flujos y evaluar el potencial de las intervenciones políticas.

Eliminación del dióxido de carbono (CDR)

Incluso con reducciones muy profundas de las emisiones, es probable que haya emisiones residuales en Colombia que no se puedan reducir fácilmente de forma directa, como las emisiones de óxido nitroso procedentes del uso de fertilizantes nitrogenados en la producción agrícola (Lim et al., 2021), ya sea para cultivos alimentarios o energéticos, o para cultivos textiles como el algodón. Por ejemplo, los trabajos existentes sobre vías de descarbonización muy profundas para Colombia consideraron una reducción del 90% en las emisiones; el 10% aún restante debe manejarse para alcanzar cero emisiones netas. Las soluciones basadas en la naturaleza buscan eliminar las emisiones residuales mediante la ampliación de los sumideros naturales de carbono, como los bosques (Busch et al., 2019), mientras que las soluciones técnicas incluyen la depuración directa del dióxido de carbono del aire, aunque se trata de una tecnología que aún está en vías de desarrollo (Erans et al., 2022; Hanna et al., 2021; McQueen et al., 2021). La reducción de las emisiones derivadas de la deforestación es un componente importante de la estrategia nacional de Colombia para cumplir su objetivo de mitigación del cambio climático (Gobierno de Colombia, 2021; IDEAM et al., 2021; Samaniego et al., 2021).

5.8 Conclusiones

En el momento de redactar este documento (principios de 2023), los esfuerzos por descarbonizar las cadenas de valor de la industria del plástico, textil, automotriz y pesquera en Colombia se encontraban en sus primeras etapas. Lograr una producción industrial con cero emisiones netas requerirá decisiones políticas y de inversión a gran escala, a niveles muy superiores a los que están bajo el control de las empresas individuales, los centros de fabricación y los sectores industriales. La creación de una red eléctrica de bajas emisiones y la capacidad de importar o crear combustibles sintéticos de baja emisión de GEI, como el hidrógeno y el amoníaco verdes, son requisitos indispensables para la industria descarbonizada. La dirección estratégica para alcanzar los objetivos de descarbonización se estableció gracias a la legislación de alto nivel del Congreso (Congreso de la República de Colombia, 2017) y la planificación de los principales departamentos gubernamentales (DNP, 2023; MINCIT, 2023; UPME, 2019a).

Colombia ya está desarrollando los elementos básicos en términos políticos para una base industrial con cero emisiones netas, y es un pionero regional en el pensamiento de la circularidad de los materiales y en la puesta en marcha de una hoja de ruta para la estrategia nacional del hidrógeno. Asimismo, Colombia ya presentó una estrategia de descarbonización de largo plazo a las Naciones Unidas y, dentro de este marco general, es posible desarrollar hojas de ruta de descarbonización para sectores individuales. Se trata de unos primeros pasos alentadores, que proporcionan el marco general en el que construir una estrategia colombiana para lograr una producción industrial con cero emisiones netas. Existe la posibilidad de acelerar el desarrollo de políticas en este ámbito con una mayor colaboración entre tres ministerios clave: el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinComercio), el Ministerio de Minas y Energía (MinMinas) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente).

Colombia también cuenta con una industria petrolera y de gas bien desarrollada que probablemente disponga del capital humano y los conocimientos institucionales para pivotar hacia la producción de combustibles sintéticos de bajo contenido de GEI o desempeñar un papel en el suministro de infraestructuras para la captura y el almacenamiento de carbono para otras industrias; este sector podría incorporarse a la conversación en las primeras etapas del desarrollo de políticas.

Un elemento clave a tener en cuenta es la espacialidad. Dado que existen sinergias entre la producción de combustibles sintéticos, el acceso a los oleoductos de captura de carbono y las economías de escala asociadas al uso compartido de tales infraestructuras, la ubicación espacial conjunta de las industrias ecológicas se considera a menudo una estrategia clave en las hojas de ruta hacia el desarrollo de la industria descarbonizada. Por ejemplo, las agrupaciones industriales son fundamentales para las estrategias de descarbonización industrial de la UE y el Reino Unido (BEIS, 2021; Merten et al., 2020). Este tipo de agrupación puede reforzar las desigualdades regionales existentes si todas las mejores infraestructuras y oportunidades se concentran en regiones ya existentes, altamente desarrolladas y prósperas, pero este enfoque también podría verse como una oportunidad para distribuir la riqueza nacional de manera más uniforme por todo el país mediante la creación de nuevos polos industriales.

Ahora es el momento de que Colombia adopte la innovación y la previsión para construir sobre sus encomiables cimientos en materia de política energética y medioambiental. Al intensificar la colaboración intersectorial, asignar los recursos con sensatez y cultivar estrategias de crecimiento inclusivo, Colombia puede emerger como líder en la carrera global hacia las industrias limpias, garantizando un futuro sostenible y próspero para sus ciudadanos.

CAPÍTULO 6

ECUADOR

6.1 Conclusiones principales

La descarbonización de la industria del plástico, textil, automotriz y pesquera en Ecuador es un concepto que se encuentra en una fase muy temprana de desarrollo.

Punto neurálgico: lograr una producción industrial con cero emisiones netas requiere que el gobierno nacional tome decisiones sobre políticas e inversiones relativas a la infraestructura estratégica nacional.

Punto neurálgico: se requieren infraestructuras de apoyo críticas para la actividad industrial sin emisiones netas. El país debe construir una red eléctrica de muy bajas emisiones y proporcionar infraestructuras para la producción o importación de combustibles sintéticos de baja emisión de GEI, como el hidrógeno y el amoníaco verdes.

Punto neurálgico: Ecuador presentó propuestas de descarbonización a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), pero aún no fijó un objetivo de cero emisiones netas ni trazó una hoja de ruta nacional para alcanzarlo y consagrarlo en la legislación; estos pasos son requisitos previos para crear las condiciones necesarias para una transición hacia una industria con cero emisiones netas.

Oportunidad: Ecuador ya cuenta con un sólido conjunto de políticas energéticas y medioambientales que dieron sus frutos en la construcción de grandes proyectos de infraestructuras transformadoras (por ejemplo, el desarrollo de la energía hidroeléctrica). Podría decirse que ya existe el marco institucional para desarrollar una estrategia industrial descarbonizada.

Oportunidad: Ecuador se encuentra en una posición privilegiada para desarrollar una red eléctrica de bajas emisiones para la industria gracias a sus abundantes recursos de energías renovables.

Oportunidad: Ecuador cuenta con un amplio sector petrolero y de gas que probablemente disponga del capital humano y los conocimientos institucionales necesarios para pivotar hacia la producción de combustibles sintéticos de bajo contenido de GEI para la industria o desempeñar un papel en el suministro de infraestructuras para la captura y el almacenamiento de carbono (CAC) para otras industrias.

Oportunidad: es posible que Ecuador desee explorar el concepto de crear agrupaciones industriales neutras en GEI para compartir infraestructuras críticas como la CAC, el hidrógeno y el amoníaco verdes.

6.2 Descripción general

Este informe estudia cómo las industrias ecuatorianas del plástico, textil, automovilística y pesquera pueden encaminarse hacia la consecución de cero emisiones netas. Ecuador cuenta con un amplio marco de políticas energéticas, con múltiples políticas superpuestas destinadas a garantizar el acceso a la energía y aprovechar los abundantes recursos hidroeléctricos y fósiles del país para el desarrollo económico. Ecuador también cuenta con impulsores de alto nivel para la mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo, que sirven de telón de fondo para esta actividad. En el ámbito internacional, Ecuador se involucró en el proceso del Acuerdo de París y es un participante activo en el proceso de la CMNUCC, al presentar su Contribución Nacionalmente Determinada (CND) original en 2019 (República del Ecuador, 2019). En el momento de redactar este informe (principios de 2023), Ecuador aún no había presentado a la CMNUCC una estrategia actualizada de mitigación del cambio climático alineada con el objetivo de llegar a cero emisiones netas. Una estrategia industrial con cero emisiones netas se alinearía bien con la dirección general de la política de mitigación del cambio climático de Ecuador.

Alcanzar la descarbonización mediante una transición del sistema energético que lo aleje del uso de combustibles fósiles es el principal medio para evitar futuros daños climáticos (IPCC, 2022). Los riesgos futuros del cambio climático para Ecuador son potencialmente graves y desestabilizadores, sobre todo en lo que respecta a los impactos de los patrones de precipitaciones y los recursos y suministros de agua. Los riesgos incluyen cambios en los patrones de precipitaciones (Chimborazo & Vuille, 2021), inundaciones y sequías más intensas (Campozano et al., 2020), inestabilidad de los recursos hídricos (por ejemplo, en Quito) (Chevallier et al., 2011). Si tales riesgos se materializan, es casi seguro que tendrían consecuencias negativas sobre los rendimientos agrícolas (Macías Barberán et al., 2019; Ovalle-Rivera et al., 2015; Quiroz et al., 2018; Ray et al., 2019), la seguridad alimentaria y la biodiversidad natural (Báez et al., 2016; Eguiguren-Velepucha et al., 2016; Iturralde-Pólit et al., 2017). Los cambios en la cantidad y variabilidad de las precipitaciones podrían tener un impacto negativo en el sistema eléctrico nacional de Ecuador si el diseño de las presas hidrológicas existentes resulta inadecuado para las nuevas condiciones (Herbozo et al., 2022); esto podría conducir a una menor generación de energía hidroeléctrica en los años secos (Carvajal & Li, 2019). Las olas de calor, en especial en las regiones costera y amazónica (Montenegro et al., 2022), supondrán riesgos para la salud de los trabajadores agrícolas y de otros sectores al aire libre (Harari Arjona et al., 2016) y podrían obligar a replantearse el diseño de las construcciones (Palme & Lobato, 2017).

Las exportaciones ecuatorianas en 2020 ascendieron a cerca de \$21 mil millones, siendo la categoría más importante el petróleo crudo (24%, \$4,94 mil millones), el banano (19%, \$3,83 mil millones), los crustáceos (19%, \$3,83 mil millones), el pescado procesado (6%, \$1,19 mil millones) y las flores cortadas (4%, \$835 millones). La figura 6.1 presenta un desglose detallado de las exportaciones ecuatorianas por tipo. La figura 6.2 muestra los destinos de las exportaciones ecuatorianas. Las principales relaciones de exportación son con Estados Unidos (23%, \$4,6 mil millones), la UE (17%, \$3,49 mil millones) y China (14%, \$2,94 mil millones). En conjunto, las industrias del plástico, textil, automovilística y pesquera en Ecuador representan una parte significativa de la actividad industrial (62% del valor de las exportaciones) y abarcan una serie de materias primas, vectores energéticos y rutas de comercialización. La exploración de vías para llevar los plásticos, los textiles, la fabricación de automóviles y la pesca con cero emisiones netas también puede ofrecer información valiosa sobre los esfuerzos para descarbonizar las industrias ecuatorianas en un sentido más general de una manera que se alinee con los objetivos del Acuerdo de París.

6.3 Descarbonización de la industria del plástico en Ecuador

Resumen del mercado

Los plásticos y cauchos sintéticos representaron algo más del 0,75% de las exportaciones ecuatorianas en 2020, con un valor total de \$161 millones (OEC, 2022). Las principales categorías de productos exportados (consulte la figura 6.3) son las láminas de plástico en bruto (26%), los neumáticos de caucho (26%), las tapas de plástico (13%) y los poliacetales (12%), un tipo de polímero a granel utilizado en productos de ingeniería que necesitan un alto nivel de rigidez y dureza (por ejemplo, para automóviles y piezas de máquinas) (Fan & Njuguna, 2016). Los tres principales mercados de exportación de plásticos y cauchos de producción nacional (consulte la figura 6.4) son los vecinos inmediatos de Ecuador, Colombia (27%), Perú (15%) y Estados Unidos (20%). La gran mayoría de las exportaciones (más del 90%) se dirigen a países de América del Norte y del Sur.

Figura 6.3: exportaciones ecuatorianas de plásticos y cauchos, 2020, porcentaje por categoría HS4 (OEC, 2022)

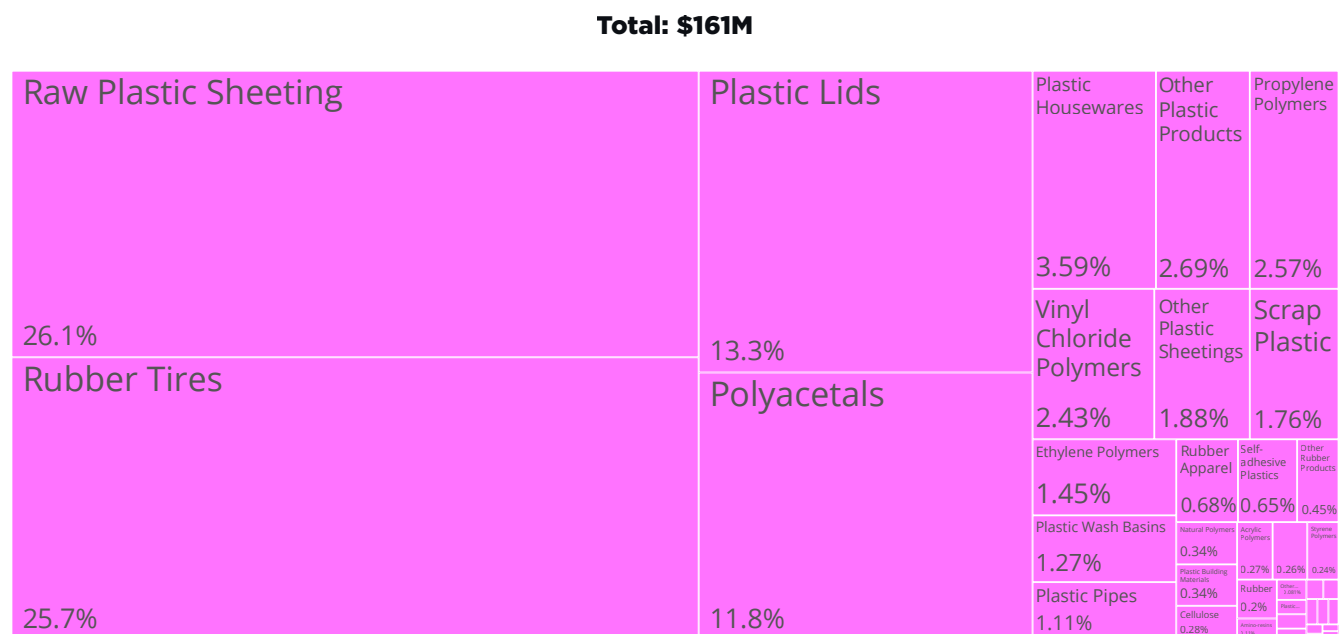
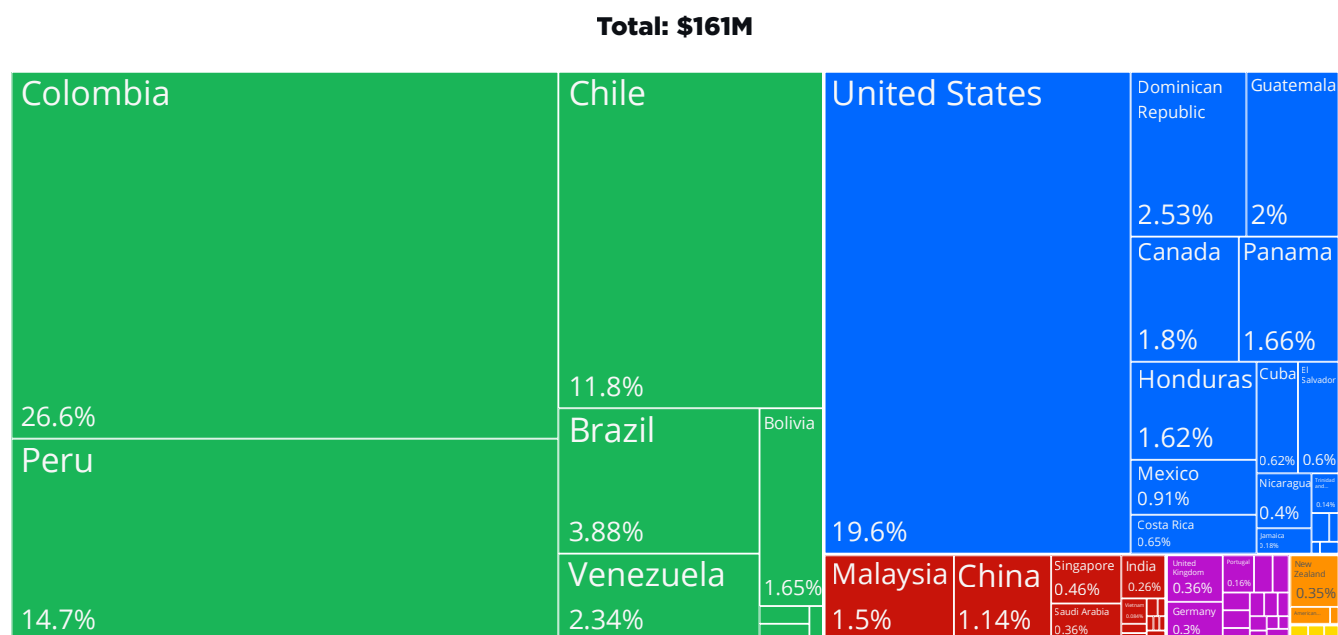


Figura 6.4: exportaciones ecuatorianas de plásticos y cauchos, 2020, porcentaje por destino (OEC, 2022)



Oportunidades tecnológicas

Existen oportunidades para reducir las emisiones del sector del plástico a lo largo de toda la cadena de valor (para una descripción detallada, consulte el capítulo 1). El enfoque clave para que los plásticos aborden las emisiones procedentes de las materias primas es explorar la posibilidad de sustituir las materias primas basadas en combustibles fósiles por biomasa (Negri & Lighthart, 2021; Saygin & Gielen, 2021; Scott et al., 2020; Zheng & Suh, 2019), dióxido de carbono capturado en el aire (Lange, 2021; Palm et al., 2016; Palm & Svensson Myrin, 2018) o carbono reciclado procedente de residuos (Carus et al., 2020; Moretti et al., 2020). Para abordar los problemas de la fabricación de resinas y productos acabados es necesario suministrar electricidad y calor a partir de fuentes libres de carbono; esto requiere una red eléctrica de cero emisiones (Tullo, 2021) y combustibles de bajas emisiones, como el hidrógeno o el amoníaco ecológicos (Arnaiz del Pozo & Cloete, 2022; C. Bauer, Treyer, et al., 2022). El transporte de materias primas y productos acabados también requiere un sector de transporte de mercancías descarbonizado (carretera (Meyer, 2020), ferrocarril (IEA, 2019; Rungskunroch et al., 2021), aviación (Bauen et al., 2020; IEA, 2021c; Schäfer et al., 2019) y transporte marítimo (Bouman et al., 2017; IEA, 2021e; Mallouppas & Yfantis, 2021)). La eliminación de los plásticos al final de su vida útil requerirá infraestructuras e incentivos adecuados para que todos los plásticos que permanezcan en uso puedan reciclarse. En última instancia, esto puede requerir nuevas químicas de polímeros (Gandini, 2008; Hatti-Kaul et al., 2020) y productos diseñados para el reciclado (K. Daehn et al., 2022); mientras tanto, se necesita mucho trabajo para recolectar y procesar los residuos plásticos existentes, la mayoría de los cuales simplemente se desechan (CEIL, 2019; Lau et al., 2020).

Políticas existentes

Las políticas ecuatorianas existentes se centraron en la concienciación sobre la importancia de evitar el vertido incontrolado de residuos plásticos en el medio ambiente natural (por ejemplo, la campaña “Plásticos en el mar... NO MÁS!” (*Plastics in the Sea... NO MORE!*) (IPIAP, 2018)) y en la imposición de prohibiciones selectivas de plásticos de un solo uso donde existan alternativas disponibles (por ejemplo, en Galápagos y Quito (MAATE, 2018)). El gobierno ecuatoriano también implementó con éxito un esquema de reembolso para las botellas de plástico PET que dio lugar a una de las tasas de reciclaje de PET más altas de América Latina y el Caribe (Brooks et al., 2020). El gobierno ecuatoriano no solo está luchando contra la contaminación por plásticos, sino que también demostró su voluntad de contemplar políticas que conduzcan a la sustitución de los plásticos por otros materiales cuando sea factible. Este enfoque abriría la puerta a políticas que fomenten flujos de materiales más circulares. Los conceptos de economía circular ya tienen cierto impulso en Ecuador, y la actividad de colaboración con la UE está investigando de forma activa ámbitos como la sustitución progresiva de los plásticos (EEAS, 2021). Ecuador también aprobó una nueva legislación sobre economía circular (la Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva (Asamblea Nacional, 2021)), que sienta las bases para permitir la reutilización y recuperación prioritarias de diferentes categorías de residuos; la legislación incluye medidas para crear un registro de proveedores de gestión de residuos, establecer un sistema de certificación de proveedores y establecer requisitos de recopilación de datos y presentación de informes. En conjunto, estas políticas existentes podrían servir como punto de partida para un diálogo nacional más amplio sobre la ecologización de la cadena de valor de los plásticos en Ecuador, al abordar la fabricación y el transporte de plásticos aguas arriba y las prácticas de eliminación al final de su vida útil, incluido el vertido de residuos plásticos en el medio natural (Brooks et al., 2020; Kaza et al., 2018; Zambrano-Monserrate & Alejandra Ruano, 2020). Queda un largo camino por recorrer para convertir las aspiraciones políticas en realidad.

6.4 Descarbonización de la industria textil en Ecuador

Resumen del mercado

En 2020, las exportaciones de textiles, calzado, sombreros y pieles de animales ecuatorianos representaron \$152 millones en ingresos, lo que representa el 0,72% de los ingresos totales de exportación (OEC, 2022). Los segmentos clave del mercado (consulte la figura 6.5) que representan más de la mitad de todas las exportaciones en estas categorías son fibras de coco y vegetales (22%), calzado impermeable (11%), algodón tejido (10%), bolsas de embalaje (10%) y pieles de animales curtidas (8%). Al mismo tiempo, Ecuador importa bienes por valor de \$814 millones en estas mismas categorías (OEC, 2022), con un saldo sesgado hacia productos más sintéticos y acabados. Ecuador exporta sus textiles y productos textiles a una amplia gama de mercados (consulte la figura 6.6), con un 47% a América del Sur, un 24% a Asia, un 16% a América del Norte y un 12% a Europa. China y Hong Kong son los mayores mercados de pieles de animales ecuatorianos (80%). Colombia y Perú son los mayores mercados de calzado y sombrerería (61%).

Oportunidades tecnológicas

Existen oportunidades para reducir las emisiones de los textiles ecuatorianos en todas las etapas, desde la adquisición de recursos hasta la eliminación al final de su vida útil (consulte el capítulo 2 para obtener más detalles sobre los textiles y el capítulo 1 para conocer más detalles sobre la descarbonización de los plásticos, que se aplica a los tejidos sintéticos, que están hechos de plásticos). En el caso de las fibras naturales, que son un componente importante de las exportaciones ecuatorianas (fibras vegetales, algodón y pieles de animales), para llegar a cero emisiones netas es necesario descarbonizar los procesos agrícolas asociados. Los vehículos agrícolas, las bombas de riego y otros equipos de cosecha y procesamiento deben funcionar con electricidad o combustibles sin emisiones netas en la mayor medida posible (Hedayati et al., 2019). Lo ideal sería que los fertilizantes de potasio y fósforo procedieran de explotaciones mineras con cero emisiones netas (Ouikhalfan et al., 2022); la producción sin emisiones de fertilizantes nitrogenados requiere amoníaco verde (Armijo & Philibert, 2020; Chehade & Dincer, 2021; IEA, 2021b). La descarbonización agrícola también requiere una estrategia para equilibrar las fuentes de emisiones y los sumideros de carbono mediante, por ejemplo, el cambio del uso de la tierra (Harwatt et al., 2020; Reay, 2020) o la captura y el almacenamiento de carbono (Hanna et al., 2021). Este enfoque es necesario porque no todos los fertilizantes aplicados a las plantas se absorben al 100% durante el cultivo, y el nitrógeno no absorbido genera emisiones de óxido nitroso, otro potente gas de efecto invernadero (Gregorich et al., 2015).

La transformación de materias primas en fibras y productos acabados es un aspecto importante del sector textil ecuatoriano. Ya es tecnológicamente posible electrificar directamente por vía electrotérmica, o indirectamente con una bomba de calor industrial, todos los procesos importantes de la fabricación textil (incluido el calor a alta temperatura de hasta 160 °C (Arpagaus et al., 2018)). Por lo tanto, la principal vía para alcanzar cero emisiones netas en esta parte de la cadena de valor será convertir los procesos que actualmente queman combustibles fósiles de forma directa (por ejemplo, el suministro de calor para la tinción) para que utilicen electricidad y reducir las emisiones de la propia red eléctrica. El transporte de productos acabados al mercado también requerirá la descarbonización de los modos de transporte (por ejemplo, transporte de mercancías por carretera, aviones, ferrocarriles, barcos) mediante el uso de electricidad o combustibles sintéticos con cero emisiones (Kaack et al., 2018). Dado que dos tercios de los textiles están hechos de plástico (Palacios-Mateo et al., 2021) y las mezclas de plástico y fibras naturales (por ejemplo, algodón y poliéster) son cada vez más comunes, las estrategias de eliminación al final de su vida útil son similares a las de la industria del plástico (consulte el capítulo 1). La principal vía para lograr la eliminación de los textiles al final de su vida útil será conseguir la circularidad de los materiales mediante la mejora del reciclado y la adopción de los principios de la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2017a; McKinsey & Company, 2022; Shirvanimoghaddam et al., 2020; Wojciechowska, 2021). También es fundamental un cambio en la producción hacia prendas de mayor calidad, con una vida útil más larga y una mayor durabilidad (Nature Climate Change, 2018; Niinimäki et al., 2020); este cambio comenzó en algunas operaciones textiles en Ecuador (por ejemplo, la empresa ecuatoriana de moda lenta Remu Apparel (Pohlmann & Muñoz-Valencia, 2021)).

Políticas existentes

En Ecuador aún no se adoptaron medidas políticas a gran escala para situar la industria textil nacional en la senda de producción descarbonizada; sin embargo, las asociaciones empresariales y el gobierno están debatiendo temas relacionados, como la producción más limpia. En 2019, el principal organismo de asociación de la industria textil, la Asociación de Industriales Textiles del Ecuador (AITE), comenzó a debatir sobre planes para crear un Centro de Producción Limpia que brindaría tanto asesoramiento como financiación sobre eficiencia energética en la fabricación de textiles (AITE, 2019). Recientemente, la industria textil y de la moda también participó en un esfuerzo por identificar a los actores clave y trazar un mapa de oportunidades en el sector a través del programa Iniciativas de Clústeres del Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca (MPCEIP). Dado que la gran mayoría (85%) de las empresas textiles ecuatorianas tienen menos de 200 empleados y un volumen de ventas anual inferior a \$5 millones, las estrategias (Sigcha et al., 2021) viables deben abordar la pequeña escala y la naturaleza dispersa de los actores del sector; es probable que se necesiten diferentes políticas para abordar tanto a las grandes como a las pequeñas empresas. Las tecnologías digitales y las políticas de transformación digital pueden ayudar a las empresas a recopilar los datos necesarios y cumplir con los requisitos de presentación de informes; las pequeñas empresas pueden tener recursos adicionales limitados para dedicar a estas tareas.

6.5 Descarbonización de la industria automovilística en Ecuador

Resumen del mercado

El mercado automotriz ecuatoriano está muy protegido, con altos aranceles de importación para muchos tipos de vehículos. La planta de fabricación de automóviles más grande de Ecuador es la fábrica Ómnibus BB (OBB) Transportes S.A. en Quito, que produce camiones y automóviles de pasajeros bajo licencia de General Motors. Ecuador importa bastantes más vehículos de los que exporta (\$1,14 mil millones de importaciones frente a \$29 millones de exportaciones) (OEC, 2022). Los camiones de reparto, automóviles, camiones de trabajo, motocicletas y diversas piezas de vehículos representan solo el 0,14% del total de las exportaciones. La categoría de productos de exportación más importante son los camiones de reparto (consulte la figura 6.7), y el principal mercado de exportación de vehículos de carretera en general es Colombia, que representa el 93% de las exportaciones (consulte la figura 6.8).

Figura 6.7: exportaciones ecuatorianas de productos de transporte, 2020, por categoría HS4 (OEC, 2022)

Total: \$54.9M

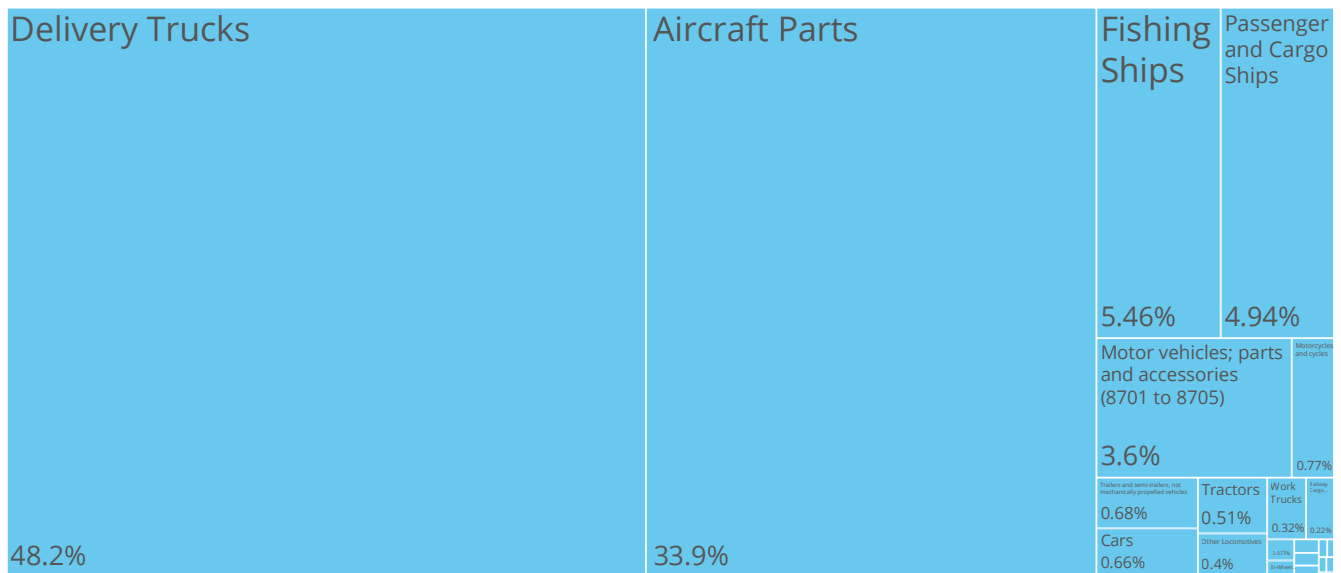


Figura 6.8: exportaciones ecuatorianas de automóviles, camiones de reparto, camiones de trabajo, motocicletas, diversas categorías de piezas de vehículos, 2020, por destino (OEC, 2022)

Total: \$29.5M



Oportunidades tecnológicas

Alcanzar cero emisiones netas en la fabricación de automóviles requiere que la amplia gama de insumos utilizados también alcance cero emisiones netas (consulte el capítulo 3 para obtener más detalles). Esto significa una transformación de las operaciones mineras (Igogo et al., 2021) y los procesos de fabricación de acero (Bataille, Stiebert, et al., 2021; IEA, 2020b, 2021f; Mission Possible Partnership, 2021; van Sluisveld et al., 2021; Yu et al., 2021), aluminio (Gomilšek et al., 2020; IEA, 2021a; Nature, 2018), vidrio (Furszyfer Del Rio et al., 2022; Griffin et al., 2021) y baterías (Aichberger & Jungmeier, 2020; Degen & Schütte, 2022). Descarbonizar la cadena de producción de vehículos exigirá eficiencia energética, la electrificación del mayor número posible de procesos mediante el uso de electricidad de una red con cero emisiones de carbono e hidrógeno para el calor de proceso a alta temperatura (Bataille et al., 2018; Bataille, Nilsson, et al., 2021; Rissman et al., 2020). El cambio a vehículos más ligeros (Czerwinski, 2021; Kacar et al., 2018; Shaffer et al., 2021) y la producción de vehículos eléctricos en lugar de vehículos impulsados por combustibles fósiles (Crabtree, 2019; Kawamoto et al., 2019; Rietmann et al., 2020) son otras oportunidades importantes para reducir las emisiones.

Los elementos de transporte de mercancías de la cadena de suministro de la automoción (tanto los productos acabados como los componentes intermedios) deben electrificarse o alimentarse con combustibles sintéticos líquidos o gaseosos sin emisiones netas para su transporte por carretera (Meyer, 2020), ferrocarril (IEA, 2019), avión (Bauen et al., 2020; IEA, 2021c; Viswanathan & Knapp, 2019) y barco (Bouman et al., 2017; Mallouppas & Yfantis, 2021). Por último, debe replantearse la eliminación de los vehículos al final de su vida útil para avanzar hacia flujos de materiales circulares. En principio, casi todas las piezas de un vehículo se pueden reciclar, pero habría que armonizar el diseño de los vehículos, la infraestructura de reciclado y los incentivos de mercado adecuados. Los fabricantes pueden desempeñar un papel importante en la mejora de la reciclabilidad de los vehículos durante el proceso de diseño, tanto mediante la selección de materiales que puedan reciclarse fácilmente como la estructuración de los componentes del vehículo de manera que puedan desmontarse con facilidad para su reutilización como piezas de reemplazo, o separarse en flujos de reciclaje individuales (es decir, utilizando los principios estándar de la economía circular (Aguilar Esteva et al., 2021; Baars et al., 2021; He et al., 2021)). Esto se aplica en especial a los paquetes de baterías (C. Bauer, Burkhardt, et al., 2022; Harper et al., 2019) y otros componentes estructurales, como los parabrisas y las llantas (McAuley, 2003; Nakano & Shibahara, 2017; Soo et al., 2017).

Políticas existentes

La estrategia nacional de electromovilidad de Ecuador tiene objetivos progresivos en cuanto al número de vehículos eléctricos en circulación para 2025, 2030 y 2040 (Hinicio et al., 2021). La legislación vigente sobre eficiencia energética también obliga a que los nuevos vehículos utilizados para el transporte público en el Ecuador continental sean eléctricos a partir de 2025 (Asamblea Nacional, 2019), Galápagos se estudia caso por caso. Como mínimo, debería fomentarse una industria local de mantenimiento, reutilización de baterías y reciclaje de todos los componentes posibles para ayudar a construir la cuota de Ecuador en la cadena de valor mundial de los vehículos eléctricos.

6.6 Descarbonización de la industria pesquera en Ecuador

Resumen del mercado

La industria pesquera ecuatoriana representa una gran fracción de la economía y es varios órdenes de magnitud mayor que el tamaño de las industrias del plástico, textil y del automóvil juntas. El pescado, los crustáceos y los moluscos (frescos o preparados) representaron algo más de \$5,3 mil millones en exportaciones en 2020, lo que representa alrededor del 26% de la actividad exportadora total. Dos segmentos clave del mercado: crustáceos frescos (55%) y pescado procesado (17%), representan más de la mitad de todas las exportaciones en la categoría general de productos animales y alimenticios (consulte la figura 6.9). Ecuador exporta sus productos del mar a un amplio abanico de mercados, siendo los mayores destinos por volumen China (~36%), la UE (~32%) y Estados Unidos (~20%) (consulte la figura 6.10).

Figura 6.9: exportaciones ecuatorianas de productos animales y alimenticios, 2020, por categoría HS4 (OEC, 2022)

Total: \$6.99B

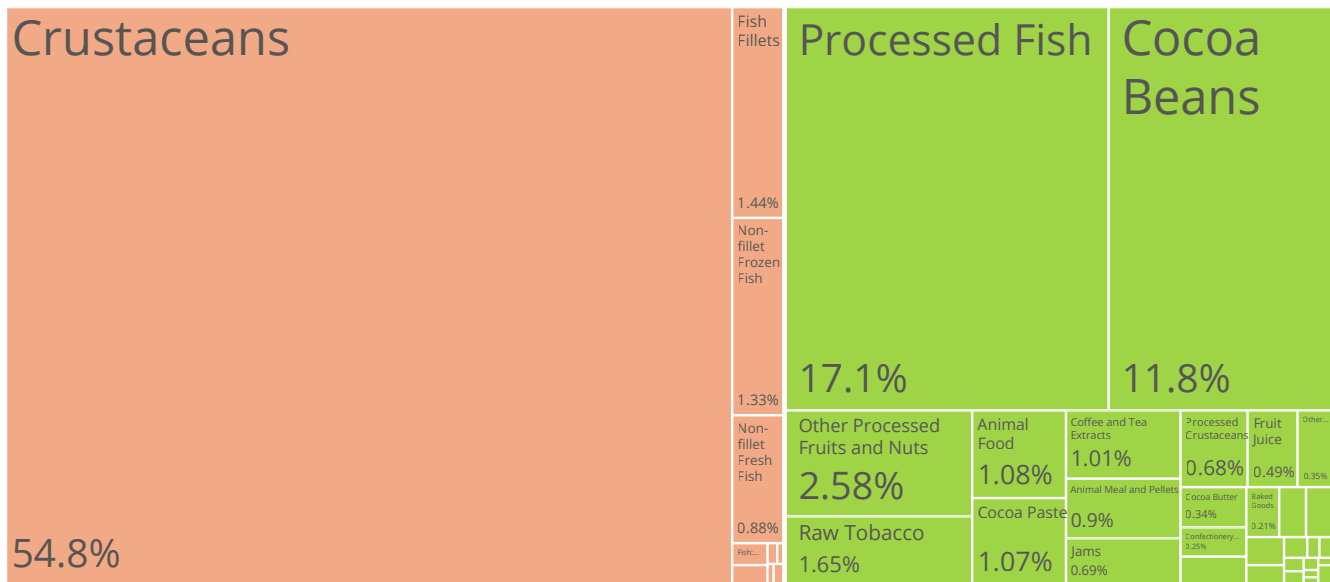
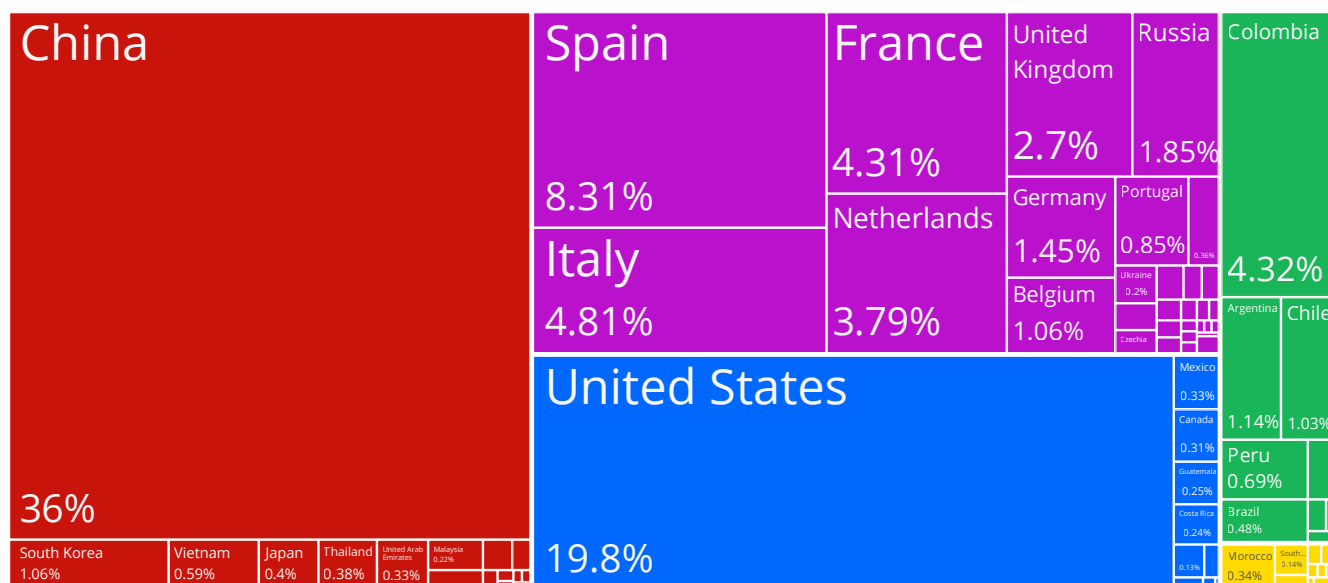


Figura 6.10: exportaciones ecuatorianas de pescado vivo, pescado fresco no fileteado, pescado congelado no fileteado, filetes de pescado, pescado seco salado ahumado y en salmuera, crustáceos, moluscos, pescado procesado y crustáceos procesados, 2020, por destino (OEC, 2022)

Total: \$5.34B



Oportunidades tecnológicas

Lograr la descarbonización de la pesca exige alcanzar la neutralidad de carbono en toda la cadena de valor del sector (consulte el capítulo 4 para obtener más detalles). Esto incluye abordar los procesos de materias primas aguas arriba y los insumos energéticos para la construcción de buques, reducir las emisiones de los buques marinos utilizados en la pesca y el transporte de carga, y luego reciclar las piezas componentes de los buques cuando lleguen al final de su vida útil (Mallouppas & Yfantis, 2021; Vakili, Ölçer, et al., 2022). La neutralidad de carbono también es necesaria en la cadena de insumos agrícolas que produce piensos para las granjas de marisco (Jones et al., 2022), para los combustibles y la electricidad que alimentan el procesamiento y envasado del marisco (Alzahrani et al., 2020; Scroggins et al., 2022), y para el transporte de los productos acabados al mercado (Psaraftis & Kontovas, 2020). Dado que los buques y las infraestructuras portuarias tienen una larga vida útil, medida en décadas (Bullock et al., 2022), existe una inercia considerable en el sistema establecido, que depende en gran medida de los combustibles fósiles. Es poco probable que esto cambie en un plazo que permita cumplir los objetivos del Acuerdo de París únicamente a través de la competencia de precios y la innovación, y casi con toda seguridad requerirá la creación deliberada de mercados y normativas que propicien el cambio tecnológico (Cullinane & Yang, 2022; Lagouvardou et al., 2020).

La descarbonización de la industria pesquera requerirá una planificación política a largo plazo e inversiones en innovación para identificar la composición y la condición de las flotas pesqueras nacionales y los sectores de cría de mariscos asociados, y para trazar un rumbo hacia las emisiones cero en consonancia con los objetivos nacionales de descarbonización. La planificación de este sector no puede

llevarse a cabo de forma aislada del resto de la economía, porque el cambio para la pesca depende de los cambios en las fuentes de electricidad, los tipos y el uso de combustibles y los procesos agrícolas. Será necesaria una profunda coordinación entre los organismos nacionales responsables de la agricultura y la acuicultura (es decir, la cría de mariscos), la legislación marítima, la gestión de los ecosistemas y los reglamentos técnicos que rigen las embarcaciones marítimas. Dado que la pesca y el transporte de productos del mar cruzan fronteras internacionales, la coordinación de las actividades nacionales de descarbonización también tendrá que alinearse con organismos internacionales como las sociedades de certificación navieras que aseguran a los buques de carga cuando viajan a través de las fronteras (por ejemplo, Lloyd's Register, American Bureau of Shipping, Nippon Kaiji Kyokai) y la Organización Marítima Internacional (OMI) (Milios et al., 2019). Casi toda la deconstrucción y el reciclado de buques del mundo se produce en solo cinco mercados: India, Pakistán, Bangladesh, Turquía y China (UNCTAD, 2021); por lo tanto, es necesaria la implicación directa con los gobiernos de esas naciones para hacer posible una economía más circular para los buques de transporte marítimo.

Políticas existentes

El marco normativo vigente para la pesca en Ecuador se centra principalmente en la gestión y conservación de los recursos acuáticos del país (es decir, para prevenir la sobrepesca y la degradación de los ecosistemas). En el momento de redactar el presente documento (principios de 2023), Ecuador aún no se centra en la descarbonización del sector pesquero en consonancia con un plan nacional de acción climática general; no obstante, podría decirse que existen las instituciones y la arquitectura normativa necesarias para iniciar dicho proceso. Por ejemplo, Ecuador cuenta con una agencia ejecutiva impulsada por la investigación y dedicada a la gestión de la pesca y la transferencia de tecnología, el Instituto Nacional de Pesca (INP). El INP está estrechamente vinculado con el Ministerio de Producción Comercio Exterior, Inversiones y Pesca (MPCEIP), que mantiene una base de datos completa de licencias y registros de la flota pesquera ecuatoriana. Esta base de datos se puede utilizar para conocer la antigüedad y el estado de los buques. Además, el Ministerio tiene la misión de promover y desarrollar la industria pesquera de manera sostenible.

6.7 Hacia una industria de plásticos, textil, automovilística y pesquera con cero emisiones netas en Ecuador

Las vías de descarbonización para los sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero de Ecuador comparten una serie de elementos estratégicos comunes, que también son importantes para lograr cero emisiones netas en otras industrias. Las estrategias transversales para la descarbonización industrial que son consistentes en toda la literatura (Bataille et al., 2018; Bataille, Nilsson, et al., 2021; Lechtenböhmer et al., 2016; Rissman et al., 2020) incluyen:

- i. Eficiencia de los materiales y procesos energéticamente eficientes.
- ii. Electrificación de la energía de proceso siempre que sea posible.
- iii. Cambio a combustibles sintéticos de bajas emisiones cuando no sea posible la electrificación.
- iv. Captura y almacenamiento de carbono cuando sea necesario.
- v. Circularidad y reciclaje de los materiales.
- vi. Eliminación del dióxido de carbono.

Eficiencia de los materiales y procesos energéticamente eficientes

La eficiencia de los materiales y la eficiencia energética desempeñan un papel importante en la industria con cero emisiones netas, ya que reducen los requisitos energéticos totales para crear los mismos productos. Esto, a su vez, facilita el logro de todas las partes posteriores de la transición. Unos procesos más eficientes tienen el potencial de propiciar grandes reducciones de emisiones. Por ejemplo, se estima que el 26% del acero y el 41% del aluminio se convierten en chatarra durante la fabricación de productos a partir de los materiales básicos (Milford et al., 2011). Aunque la chatarra se desvía y se vuelve a fundir para convertirla finalmente en productos útiles, la propia refundición es un importante sumidero de energía. Se calcula que el uso de energía podría reducirse entre un 6% y un 17% mediante técnicas para reducir la chatarra de proceso en estas industrias. La optimización del diseño de los productos tiene un potencial similar para un gran ahorro de material. Por ejemplo, los análisis demostraron que muchos productos metálicos podrían hacerse un 30% más ligeros sin sacrificar el rendimiento (Carruth et al., 2011).

La eficiencia energética en la industria se aborda específicamente en el Plan Nacional de Eficiencia Energética de Ecuador (PLANEE) (MEER, 2017). Los principales medidas del plan son el fomento de los sistemas de cogeneración (es decir, la producción combinada de calor y electricidad), la identificación y sustitución de equipos ineficientes (por ejemplo, bombas, motores, calderas) y el desarrollo de empresas de servicios energéticos que puedan participar en un mercado de servicios de eficiencia. Un estudio sugiere que la cogeneración podría mejorar la eficiencia energética de las industrias ecuatorianas hasta en un 40% (Pelaez-Samaniego et al., 2020). Hasta la fecha, la aplicación de estas medidas solo tuvo un éxito parcial. Los principales obstáculos a la eficiencia energética industrial en Ecuador son las subvenciones a los precios de la electricidad (que debilitan las medidas de eficiencia, ya que los precios de la energía están

artificialmente bajos), y las dificultades para obtener financiación, derivadas de los complejos procesos de adquisición y la falta de confianza en que algunos contratos se cumplan (USAID, 2020, 2021).

Electrificación

Una estrategia fundamental para reducir las emisiones y alcanzar cero emisiones netas para prácticamente todas las industrias de Ecuador es la electrificación de los procesos de producción, siempre que sea posible, mediante la electricidad descarbonizada. Ecuador cuenta con abundantes recursos energéticos renovables, la energía hidroeléctrica es la más desarrollada. La energía hidroeléctrica se expandió significativamente desde 2007 (Ponce-Jara et al., 2018). La energía hidroeléctrica es ahora el mayor componente de la capacidad de generación de energía de Ecuador, con un 62%, con centrales eléctricas fósiles en un 36%, y el resto es una mezcla de energías renovables no hidroeléctricas (MERNNR, 2020).

Para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas en el sector industrial será necesario que Ecuador genere casi toda la energía a partir de fuentes libres de combustibles fósiles. Hasta la fecha, Ecuador desplegó con éxito la energía hidroeléctrica a gran escala, pero hasta ahora tuvo algunas dificultades para atraer inversiones internacionales para la construcción de centrales eólicas y solares (USAID, 2020). Los obstáculos futuros a superar incluyen la mejora de la capacidad de transmisión para manejar el aumento de los flujos de energía en el sistema, en especial cuando se integran fuentes variables de energía renovable, y la diversificación de la mezcla de generación fuera de la energía hidroeléctrica, al tiempo que se reducen las emisiones de la red a niveles muy bajos. Reducir la dependencia de la energía hidroeléctrica ayudaría a protegerse contra el riesgo planteado por los patrones de precipitaciones altamente variables previstos en futuros escenarios climáticos, que podrían reducir la generación de energía hidroeléctrica (Carvajal et al., 2019; Carvajal & Li, 2019; Ramirez et al., 2020).

Se podría decir que Ecuador se encuentra en una posición privilegiada para cumplir con una estrategia que requiere la electrificación de los procesos industriales. En resumen, el Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables (MERNNR⁶) supervisa el sistema energético ecuatoriano. La Agencia de Regulación y Control de la Electricidad (ARCONEL) es el regulador estatal de la electricidad. El Centro Nacional de Control de Energía de la República del Ecuador (CENACE) opera el sistema de transmisión y el mercado mayorista de electricidad. Estos tres organismos tienen competencias que se derivan de la última revisión de la Constitución ecuatoriana (Asamblea Constituyente, 2008), que incluye cláusulas específicas que establecen la propiedad estatal y la responsabilidad del suministro de electricidad a los ciudadanos (artículo 314), las energías renovables y la eficiencia energética (artículo 413), y la adopción de medidas de mitigación del cambio climático (artículo 414). El último Plan Maestro de Electricidad (PME) nacional (MERNNR, 2020) tiene como objetivo agregar unos 7 GW adicionales de capacidad de generación para 2027, con las correspondientes mejoras del sistema de transmisión.

Un informe del Banco Interamericano de Desarrollo de 2022, "Prosperidad libre de carbono: cómo los gobiernos pueden habilitar 15 transformaciones esenciales" (Fazekas et al., 2022), ofrece detalles sobre las medidas gubernamentales necesarias para eliminar barreras a nivel sectorial y seguir vías para reducir las emisiones en toda la economía. A fin de descarbonizar y aumentar el suministro de electricidad, sugiere cinco pasos clave: i) trabajar con las empresas de servicios públicos para establecer planes de descarbonización y crecimiento del sistema eléctrico que apoyen la electrificación limpia; ii) ayudar a las empresas de servicios públicos a adquirir y desplegar capital de bajo costo para pagar la generación de

6 Antiguo Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER).

energía limpia y la transmisión necesaria; iii) ampliar la generación de energía limpia estableciendo normas para las carteras renovables y la intensidad de los GEI de la red mediante subastas inversas o tarifas de alimentación; iv) facilitar las aprobaciones de emplazamiento, en especial para la transmisión; y v) eliminar de forma gradual las centrales eléctricas de carbón, petróleo pesado y, finalmente, de gas natural. La eliminación progresiva de estos combustibles fósiles requerirá una cuidadosa consideración de la fuerza laboral local y de los planes de transición de la comunidad, y se necesitará apoyo para las comunidades cuyas economías dependen de la minería y la producción de combustibles fósiles.

Combustibles sintéticos con bajo contenido de GEI

Las innovaciones de la última década en la tecnología de bombas de calor (Arpagaus et al., 2018) para suministrar calor a temperaturas muy altas (hasta 150 °C comercialmente, y potencialmente más altas) ahora significan que la descarbonización de los textiles probablemente se pueda lograr con electricidad. Sin embargo, es probable que la fabricación de plásticos (por ejemplo, el craqueo térmico y el moldeo por inyección) y los insumos aguas arriba para la fabricación de automóviles (por ejemplo, acero, vidrio, etcétera.) requieran aportes de calor que solo pueden conseguirse mediante la combustión de combustibles o equipos electrotérmicos que someten a la faja a una carga instantánea demasiado elevada. Esto no significa que esos combustibles deban ser fósiles. El hidrógeno verde es uno de los principales candidatos a sustituir la energía fósil en el suministro de calor industrial, y aunque este combustible podría importarse en el futuro, el potencial de producción local también es importante. Esto se debe a que Ecuador cuenta con importantes recursos de energías renovables que pueden proporcionar electricidad a bajo costo, un insumo fundamental para la producción de hidrógeno y amoníaco verdes (es decir, de baja emisión de GEI). Además, la madura industria nacional de petróleo y gas del Ecuador cuenta con la base tecnológica, el capital humano y los conocimientos institucionales necesarios para producir y exportar combustibles líquidos. Las previsiones apuntan a que la disminución de las reservas de petróleo llevará a Ecuador a convertirse en importador neto de petróleo a finales de la década de 2020 (Chavez-Rodriguez et al., 2018; Espinoza et al., 2019), por lo que un giro de la industria local del petróleo y el gas hacia la producción de combustibles sintéticos renovables podría resultar especialmente atractivo y estratégico.

Aunque la principal literatura política del gobierno ecuatoriano se centró principalmente en el suministro de electricidad y no en los combustibles sintéticos, los estudios regionales de la comunidad investigadora ecuatoriana comenzaron a explorar el tema. Las evaluaciones del potencial de los biocombustibles en Ecuador fueron en su mayoría negativas, debido a las perspectivas de competencia entre los biocombustibles y otros usos importantes de la tierra (Ortega-Pacheco et al., 2019), en especial el cultivo de alimentos (Arcentales & Silva, 2019; Pazmiño & Arranz, 2015). El hidrógeno se evaluó de forma más prometedora. Los análisis a escala nacional estiman que el hidrógeno electrolítico (es decir, verde) de bajo costo a partir de energía hidroeléctrica renovable debería ser posible en Ecuador a un costo inferior de \$2-3/kg (Pelaez-Samaniego et al., 2014; Posso et al., 2015). Las vías también examinaron el potencial de producción de hidrógeno a partir de residuos agrícolas y forestales (Posso et al., 2020). Otros estudios consideraron el hidrógeno para los sectores del transporte y la construcción (Posso et al., 2016; Posso Rivera & Sánchez Quezada, 2014), pero no para fines industriales. Sugerimos que se siga investigando en este ámbito. Por ejemplo, la estrategia del gobierno alemán (BMW, 2020) puede ofrecer ideas útiles para explorar cómo lograr la descarbonización industrial del calor de alta temperatura con hidrógeno. En el momento de redactar este documento (principios de 2023), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) financió un

proyecto en curso que explora el desarrollo de una hoja de ruta del hidrógeno verde para Ecuador, (IDB, 2021) pero aún no se publicó en su totalidad.

Captura y almacenamiento de carbono

No se prevé que la descarbonización en los sectores textil, del plástico, de la fabricación de automóviles y de la pesca requiera la captura de carbono a gran escala en las fases de fabricación de productos de la cadena de valor. La captura y almacenamiento de carbono pueden tener sentido en ciertas aplicaciones; por ejemplo, puede ser útil para la producción de plástico de etileno, que a menudo implica la separación de CO₂. La captura y el almacenamiento de carbono pueden desempeñar un papel en la extracción de materias primas aguas arriba en la minería (Igogo et al., 2021) y en la producción de acero (Fischedick et al., 2014), pero los avances y las inversiones actuales en la reducción del hidrógeno hacen que las aplicaciones en la producción de acero sean menos probables en la actualidad (Vogl et al., 2021). La captura y almacenamiento de carbono a escala requerirían una inversión a gran escala en tuberías de CO₂ y sitios de almacenamiento geológico adecuados (como yacimientos petrolíferos agotados o acuíferos salinos) para el secuestro subterráneo a largo plazo del CO₂. Un ejemplo de un proyecto de infraestructura de captura de carbono a gran escala proporcionado por el gobierno para permitir el crecimiento industrial bajo en carbono es la Línea Troncal de Carbono de Alberta (ACTL), un oleoducto de 240 kilómetros en Canadá que conecta las principales instalaciones industriales con los emplazamientos de almacenamiento de carbono (Cole & Itani, 2013). Como resultado de estas inversiones, la región se está convirtiendo en un centro para la fabricación de combustibles con bajas emisiones de carbono (amoníaco azul, hidrógeno azul) tanto para uso doméstico como para la exportación a Asia (Air Products, 2021; Itochu, 2022). Los recientes análisis ecuatorianos sobre las vías para lograr una descarbonización profunda mostraron el potencial de las tecnologías de captura de carbono para desempeñar un papel importante para su uso directo en la industria y como medio para descarbonizar el sector eléctrico o lograr emisiones negativas (Villamar et al., 2021). Por lo tanto, puede haber motivos para explorar el papel futuro del sector petrolero y del gas de Ecuador como actor importante en el desarrollo de la captura y el almacenamiento de carbono. Esto podría ofrecer una forma de ayudar al país a desarrollar una industria de este tipo y ayudar al sector a encontrar nuevas vías factibles; se espera que el propio sector comience a declinar a finales de esta década, como se señala en Chávez-Rodríguez et al. (Chavez-Rodríguez et al., 2018) y Espinoza et al. (Espinoza et al., 2019).

Circularidad y reciclaje de los materiales

La mejora de la circularidad de los materiales es la principal vía para descarbonizar la fase de eliminación al final de la vida útil de los productos plásticos, textiles y automotrices (incluidos los buques y equipos utilizados en la pesca). Se escribió mucho sobre los principios de la economía circular en relación con varios de estos sectores (por ejemplo, los plásticos (Barrowclough & Birkbeck, 2022; Ellen MacArthur Foundation, 2017b; Lange, 2021; World Economic Forum et al., 2016), los textiles (Ellen MacArthur Foundation, 2017a; McKinsey & Company, 2022; Shirvanimoghaddam et al., 2020; Wojciechowska, 2021) y la fabricación de automóviles (Czerwinski, 2021; He et al., 2021; Khodier et al., 2018). En términos generales, la aplicación requiere mejoras a gran escala en la provisión de infraestructuras para recolectar y procesar los productos al final de su vida útil, la creación de fuertes incentivos para desalentar el envío de desechos a los vertederos y el vertido de residuos en el medio natural; y cambios aguas arriba en el diseño y los materiales de los productos, ya sea a través de la regulación o en consulta con la industria, para evitar la creación de productos que no puedan reciclarse.

Eliminación del dióxido de carbono (CDR)

Es probable que una descarbonización muy profunda de la economía ecuatoriana siga dando lugar a un grado de emisiones residuales que no podrán eliminarse directamente ni mediante cambios tecnológicos en los procesos industriales ni mediante la provisión de infraestructuras de energía limpia a gran escala. Un ejemplo es la producción de emisiones de óxido nitroso derivadas del uso de fertilizantes nitrogenados en la producción agrícola (Lim et al., 2021). El análisis sobre las vías de descarbonización profunda para Ecuador hasta la fecha consideró una serie de escenarios, siendo el más ambiciosos el que explora cómo las emisiones pueden reducirse en torno al 75% respecto a los niveles de 2015 para 2050 (Villamar et al., 2021). Alcanzar cero emisiones netas significa que todavía se deberá abordar el 25% restante de las emisiones que quedan, incluso en este escenario más ambicioso. Una vía para lograrlo sería recurrir a soluciones basadas en la naturaleza, que buscan eliminar las emisiones residuales mediante la ampliación de los sumideros naturales de carbono, como los bosques (Busch et al., 2019). Tal planteamiento enlaza con la estrategia que Ecuador propuso para reducir las emisiones a través de las NDC presentadas a la CMNUCC (República del Ecuador, 2019); esta correspondencia destacó la reducción de las emisiones derivadas de la deforestación como una parte clave de su estrategia más amplia. También se propusieron medidas técnicas, como la depuración directa del dióxido de carbono del aire mediante tecnologías de captura directa en el aire, como alternativas a los sumideros naturales de carbono, pero se trata de tecnologías que aún se encuentran en las primeras etapas de desarrollo (Erans et al., 2022; Hanna et al., 2021; McQueen et al., 2021).

6.8 Conclusiones

Se necesita una enorme transformación de prácticamente todos los sectores de la economía y de muchos comportamientos individuales para crear las condiciones de apoyo para el desarrollo humano en un estado de mayor equilibrio con el mundo natural, conceptos que son fundamentales en la Constitución ecuatoriana (Asamblea Constituyente, 2008). En el momento de redactar este documento (principios de 2023), Ecuador presentó propuestas de descarbonización a la CMNUCC, pero aún no estableció un objetivo de carbono-neutralidad, ni trazó una hoja de ruta nacional para alcanzar cero emisiones netas a través de sus políticas y leyes. Estos pasos son requisitos previos para crear las condiciones de una transición hacia una industria con cero emisiones netas.

Los esfuerzos por descarbonizar las cadenas de valor del plástico, el textil, la fabricación de automóviles y la pesca en Ecuador se encuentran en una fase incipiente de desarrollo conceptual. Lograr una producción industrial con cero emisiones netas en estas y prácticamente todas las industrias de Ecuador requerirá decisiones políticas y de inversión a gran escala que van más allá del alcance de cualquier planta de fabricación individual o de cualquier sector industrial individual. Los requisitos indispensables para descarbonizar la industria son una red eléctrica de bajas emisiones y la capacidad de importar o crear combustibles sintéticos de baja emisión de GEI, como el hidrógeno y el amoníaco verdes. Se podría decir que Ecuador tiene un sólido historial de cumplimiento de grandes proyectos de infraestructuras (sobre todo hidroeléctricos, como se describe en Ponce-Jara et al. (Ponce-Jara et al., 2018).

Los abundantes recursos de energías renovables de Ecuador lo sitúan en una posición privilegiada para continuar desarrollando una red eléctrica de bajas emisiones para la industria. Sin embargo, hasta la fecha, Ecuador tuvo dificultades para atraer inversiones extranjeras para proyectos de energía eólica y solar (USAID, 2020, 2021). Ecuador cuenta con un amplio sector del petróleo y el gas, que probablemente disponga del capital humano y los conocimientos institucionales necesarios para pivotar hacia la producción de combustibles sintéticos de bajo contenido de GEI para la industria o para desempeñar un papel en el suministro de infraestructuras para la captura y el almacenamiento de carbono para otras industrias. Los conocimientos fundamentales y las habilidades tecnológicas necesarias para la extracción, el refinado, la manipulación segura y el transporte de productos petroquímicos se traducen muy bien en los procesos necesarios para producir y utilizar combustibles sintéticos bajos en carbono, como el biodiésel, el amoníaco verde y el hidrógeno verde. La ubicación espacial conjunta de las industrias ecológicas se considera a menudo una estrategia clave en las hojas de ruta para desarrollar la industria descarbonizada, debido a las sinergias entre la producción de combustibles sintéticos, el acceso a los oleoductos de captura de carbono y las economías de escala asociadas al uso compartido de tales infraestructuras. Las agrupaciones industriales son, por ejemplo, fundamentales para las estrategias de descarbonización industrial de la UE y el Reino Unido (BEIS, 2021; Merten et al., 2020).

Es imperativo que los líderes de Ecuador demuestren un liderazgo visionario y un compromiso proactivo en la formulación e implementación de estrategias integrales para la descarbonización industrial. A medida que la comunidad global acelera hacia un futuro sin emisiones netas, Ecuador debe aprovechar este momento crucial para aprovechar sus recursos y capacidades innatos, contribuyendo así a la transformación mundial y beneficiándose de ella, en lugar de quedar relegado al margen del progreso.

CAPÍTULO 7

PERÚ

7.1 Conclusiones principales

Perú se encuentra en las primeras etapas de desarrollo de una estrategia de transición hacia una economía con cero emisiones netas.

Punto neurálgico: Perú presentó propuestas de descarbonización a la CMNUCC, pero aún no tiene un objetivo de descarbonización ni una hoja de ruta nacional para alcanzar la neutralidad de carbono. Lograr la neutralidad de carbono requiere cambios transformadores en la red eléctrica para suministrar y transportar fuentes de electricidad limpia para el país; por lo tanto, se requerirá un impulso político integrado para establecer y perseguir objetivos de descarbonización en todo el país y legislar objetivos y plazos a fin de sentar las bases para planificar una transición hacia una industria sin emisiones.

Punto neurálgico: incluso sin la estrategia de descarbonización, es evidente que los esfuerzos peruanos en la descarbonización del suministro de energía requerirán casi con toda seguridad una estrategia energética nacional actualizada del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), lo que puede requerir una mayor coordinación con el Ministerio de Medio Ambiente (MINAM). Es posible que el plan nacional de energía existente, que cubre el período 2014-2025, deba considerar explícitamente los nuevos desafíos que surgieron desde que se redactó para abordar la escasez de energía y recursos a corto plazo y las consecuencias económicas nacionales de la pandemia COVID-19.

Punto neurálgico: cualquier política de descarbonización industrial para los sectores del plástico, el textil, la fabricación de automóviles y la pesca tendría que integrarse de forma cohesionada con la estrategia general de descarbonización para el país.

Punto neurálgico: lograr la circularidad material en Perú parece ser todo un desafío. Las medidas más importantes a corto plazo en este ámbito son la formalización de la recolección de residuos y la prevención de su eliminación incontrolada en vertederos abiertos.

Punto neurálgico: se requerirá la intervención del Estado para desarrollar los recursos energéticos verdes de manera oportuna, y será necesaria la intervención del Estado para adaptar la estructura existente del mercado eléctrico.

Oportunidad: Perú cuenta con abundantes recursos de energías renovables para abastecer una actividad industrial baja en carbono.

Oportunidad: Perú ya inició el proceso de establecimiento de un marco para la construcción de proyectos de hidrógeno verde en el país. Se trata de un elemento potencial y crítico de un sistema industrial sin emisiones.

7.2 Descripción general

Este informe explora el potencial de Perú para situar sus sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero en la senda de las emisiones neutras en carbono en el contexto del actual marco de política climática del país. Perú se enfrenta a una serie de riesgos climáticos, y la amplitud y el alcance de la respuesta nacional comenzó a reflejarlo. Los riesgos incluyen la interrupción de actividades económicas clave como la minería de cobre, oro y zinc debido a períodos de lluvias intensas (Gonzalez et al., 2019), y los impactos negativos en la producción agrícola debido a períodos de escasez de agua, el aumento de la variabilidad de los recursos hídricos y el aumento de las temperaturas (Ovalle-Rivera et al., 2015; Quiroz et al., 2018; Tabet & Stopnitzky, 2021). Los pronósticos indican que es probable que Perú experimente más inundaciones (Bergmann, 2021), ya que el retroceso de los glaciares podría aumentar el riesgo de inundaciones debido al deshielo (Huggel et al., 2020) y reducir la disponibilidad de recursos hídricos debido a la contracción a largo plazo (Chevallier et al., 2011; Mark et al., 2017; Oesterling, 2015). Las elevadas temperaturas previstas plantean retos para la salud humana de todos los peruanos, que pueden enfrentarse a mayores riesgos de inseguridad alimentaria, estrés térmico y exposición a enfermedades infecciosas (Carrillo-Larco et al., 2022; Nicholas et al., 2021; USAID, 2017).

Perú reconoció estas amenazas paralelas a la seguridad y la prosperidad, y respondió iniciando el desarrollo de un marco integrado de política climática con el objetivo de crear consenso entre los departamentos gubernamentales y los principales grupos de la sociedad civil. En 2018, Perú aprobó la que hasta la fecha es su legislación climática más importante: la Ley Marco de Cambio Climático (MINAM, 2018). El marco tiene como objetivo alinear la política climática de Perú con los objetivos económicos y de desarrollo social, compromete la participación peruana en los procesos de la CMNUCC (es decir, el Acuerdo de París) y designa al Ministerio del Medio Ambiente (MINAM) como la principal autoridad nacional en materia de política climática. La Contribución Nacionalmente Determinada (CND) oficial del Perú al Acuerdo de París apunta a una reducción del 30% de las emisiones para 2030, pero también señala que Perú está en proceso de desarrollar una estrategia climática nacional integral con un horizonte temporal de 2050 (Gobierno del Perú, 2020a) y actualizará la CND para incluir las acciones necesarias para lograr la neutralidad de carbono. En el momento de redactar este documento (principios de 2023), el MINAM⁷ estaba elaborando la estrategia nacional de descarbonización para Perú con la participación interdepartamental de los principales ministerios gubernamentales y una amplia gama de grupos de la sociedad civil a través del CNCC.⁸ Una evaluación independiente de las perspectivas de Perú para alcanzar cero emisiones netas en 2050 realizada por el Banco Interamericano de Desarrollo (Quirós-Tortós et al., 2021) concluyó que dicha transformación no solo es posible, sino que también es probable que sea una excelente inversión para

7 Esto se titula provisionalmente “Estrategia Nacional ante el Cambio Climático al 2050 (ENCC)”, (consulte: <https://www.gob.pe/institucion/minam/campa%C3%B1as/3453-estrategia-nacional-ante-el-cambio-climatico-al-2050>)

8 Comisión Nacional sobre el Cambio Climático (CNCC), (consulte: <https://www.gob.pe/institucion/minam/campa%C3%B1as/5064-comision-nacional-sobre-el-cambio-climatico>)

Perú, ya que ofrece al país la oportunidad de alcanzar los objetivos de mitigación del cambio climático y adaptación al mismo, al tiempo que mejora la productividad, los ingresos y la salud humana.

La disponibilidad de electricidad renovable y el futuro papel de los combustibles fósiles serán cuestiones importantes que Perú deberá tener en cuenta como parte de cualquier decisión sobre la descarbonización de la industria. La energía hidroeléctrica (55,2%) y el gas natural (36,9%) son las dos principales fuentes de electricidad, mientras que la eólica (3%) y la solar (1,5%) tienen un papel relativamente menor (MINEM, 2019). La electrificación es baja en la mayoría de los sectores y usos finales (residencial, 21,8%; industrial, 26,5%; transporte, 0,1%). Esto implica la necesidad de ampliar a gran escala el suministro de energías renovables. Perú manifestó su ambición de aumentar progresivamente el porcentaje de electricidad renovable en el sistema y mejorar el acceso a la energía.

Perú tiene especialidades económicas en la minería, la industria manufacturera y la producción agrícola. Las exportaciones totales de Perú en 2020 se valoraron en \$40,5 mil millones; los principales productos son el mineral de cobre en bruto (23%, \$9,23 mil millones), el oro (16%, \$6,4 mil millones), el cobre refinado (4%, \$1,8 mil millones), el gas de petróleo (3,5%, \$1,41 mil millones) y piensos (3%, \$1,19 mil millones) (consulte la figura 7.1). Los principales destinos de las exportaciones (por valor de las exportaciones a un destino determinado) son China (28%, \$11,3 mil millones), Estados Unidos (16%, \$6,4 mil millones), la UE (13%, \$5,2 mil millones), Corea del Sur (7%, \$2,7 mil millones), Canadá (6%, \$2,4 mil millones) y Japón (5%, \$1,9 mil millones) (consulte la figura 7.2). En conjunto, los sectores del plástico, el textil, la fabricación de automóviles y la pesca generan el 8% de la actividad exportadora (OEC, 2022).

Figura 7.1: exportaciones peruanas al resto del mundo, 2020, codificación HS4 (los colores corresponden a diferentes grupos de códigos comerciales HS4) (OEC, 2022)

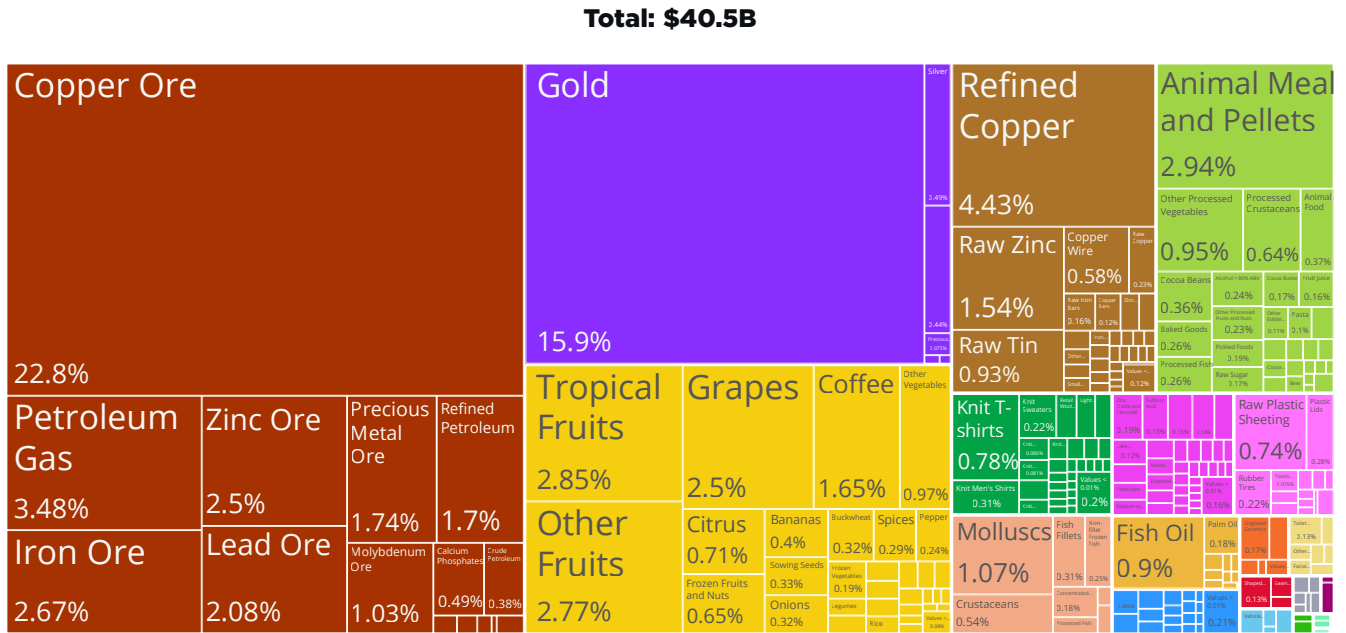
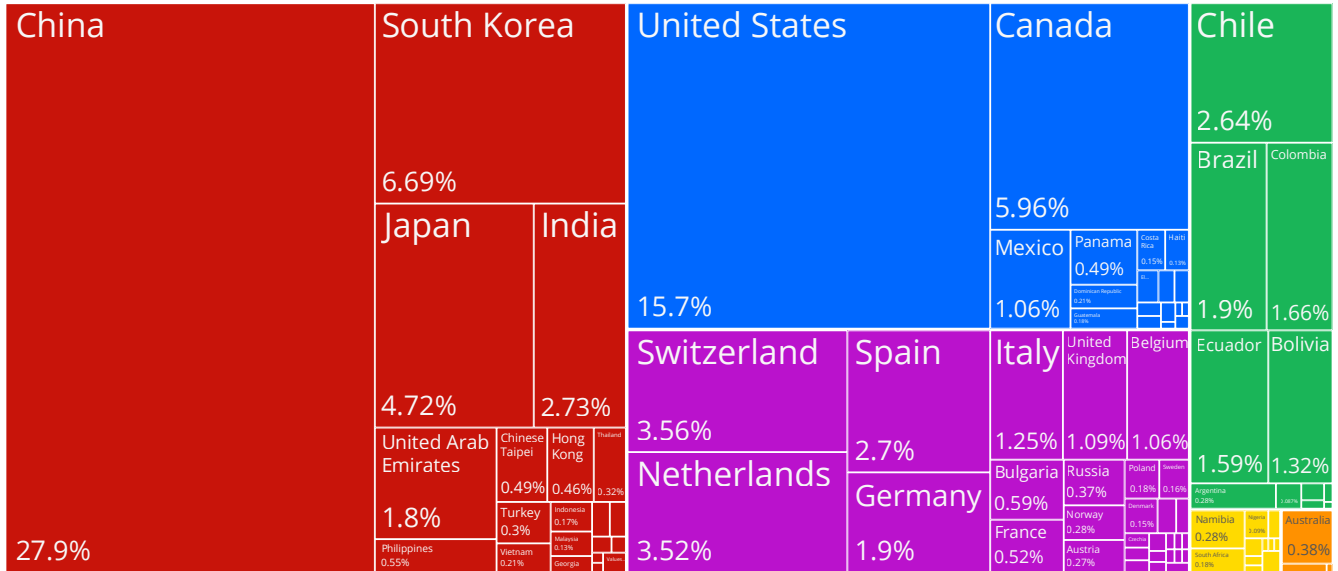


Figura 7.2: exportaciones peruanas al resto del mundo, 2020, porcentaje por país (OEC, 2022)

Total: \$40.5B



7.3 Descarbonización de la industria del plástico en Perú

Resumen del mercado

En 2020, las exportaciones de plásticos y cauchos sintéticos se valoraron en \$656 millones, alrededor del 1,6% del total de las exportaciones (OEC, 2022). Los productos acabados, en particular las láminas de plástico (46%), las tapas de plástico (17%) y los neumáticos de caucho (13%) son los principales artículos de exportación (consulte la figura 7.3). Casi todas las exportaciones (96%) se dirigen a América del Norte y del Sur, siendo Estados Unidos, México, Chile y Colombia los mercados más importantes (consulte la figura 7.4).

Figura 7.3: exportaciones peruanas de plásticos y cauchos, 2020, porcentaje por categoría HS4 (OEC, 2022)

Total: \$656M

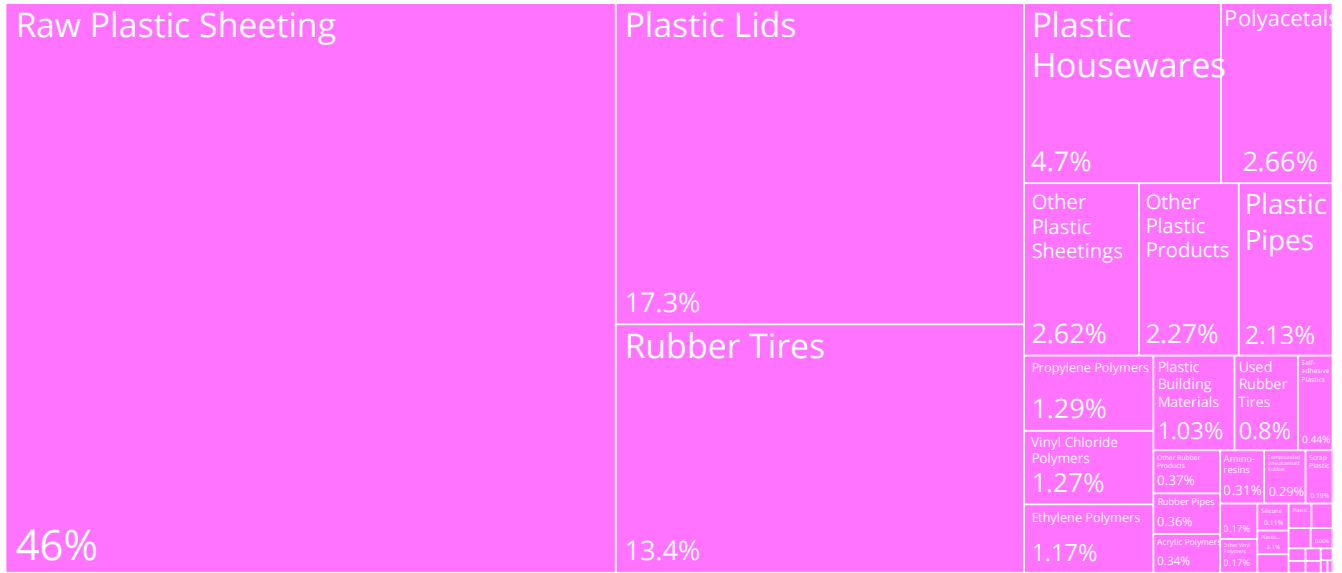
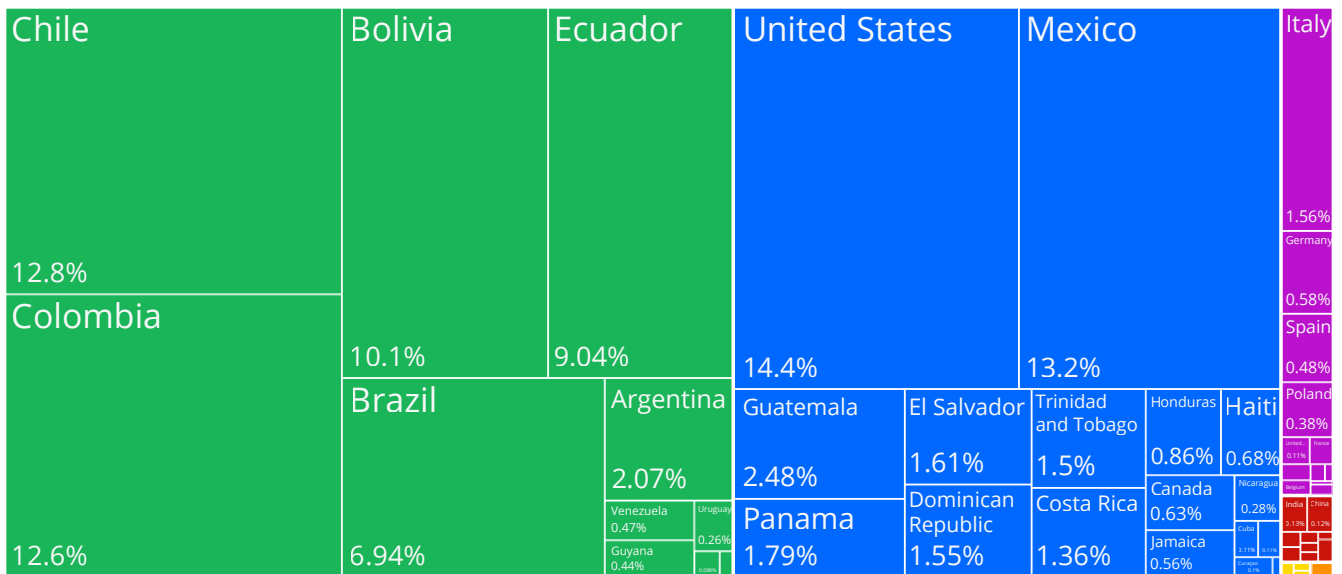


Figura 7.4: exportaciones peruanas de plásticos y cauchos, 2020, porcentaje por destino (OEC, 2022)

Total: \$656M



Oportunidades tecnológicas

En el capítulo 1 se ofrece una descripción detallada de las opciones de descarbonización para el sector del plástico. Existen oportunidades para reducir las emisiones del sector del plástico en toda la cadena de valor. Desde la perspectiva de las materias primas, el enfoque clave para los plásticos es explorar la sustitución de las materias primas de combustibles fósiles por biomasa (Negri & Lighthart, 2021; Saygin & Gielen, 2021; Scott et al., 2020; Zheng & Suh, 2019), dióxido de carbono capturado en el aire (Lange, 2021; Palm et al., 2016; Palm & Svensson Myrin, 2018) o carbono reciclado procedente de residuos (Carus et al., 2020; Moretti et al., 2020). Desde la perspectiva de la fabricación de resinas y productos acabados, la electricidad y el calor deben proceder de fuentes libres de carbono, como una red eléctrica con cero emisiones (Tullo, 2021) y combustibles de bajas emisiones, como el hidrógeno o el amoníaco (Arnaiz del Pozo & Cloete, 2022; C. Bauer, Treyer, et al., 2022). Para el transporte de materias primas y productos acabados sería necesario que el sector del transporte de mercancías también se descarbonizara con electricidad o combustibles sintéticos (carretera (Meyer, 2020), ferrocarril (IEA, 2019; Rungskunroch et al., 2021), aviación (Bauen et al., 2020; IEA, 2021c; Schäfer et al., 2019), transporte marítimo (Bouman et al., 2017; IEA, 2021e; Mallouppas & Yfantis, 2021)). Por último, la eliminación de los plásticos al final de su vida útil requerirá infraestructuras e incentivos adecuados para que todos los plásticos que permanezcan en uso puedan reciclarse. En última instancia, esto puede requerir nuevas químicas de polímeros (Gandini, 2008; Hatti-Kaul et al., 2020) y el diseño de productos para el reciclado (K. Daehn et al., 2022), pero mientras tanto hay mucho trabajo por hacer para recoger y procesar los residuos plásticos existentes, muchos de los cuales ya se desechan en el medio ambiente (CEIL, 2019; Lau et al., 2020).

Políticas existentes

Perú comenzó recientemente a promulgar políticas para limitar el impacto medioambiental de los residuos plásticos, como la prohibición efectiva o la imposición de costos adicionales por el uso de ciertos artículos de plástico de un solo uso (Alvarez-Risco et al., 2020; Congreso de la República, 2018; MINAM, 2019a, 2019b) y la imposición de multas a las empresas que no cumplan la normativa (Rondon-Jara et al., 2021). Se trata de las primeras medidas positivas. Las investigaciones sugieren la posibilidad de introducir importantes mejoras en la gestión de la eliminación de los plásticos al final de su vida útil en general en Perú y la necesidad de reestructurar las regulaciones técnicas y legales para incentivar económicamente el reciclaje en general (Torres & Cornejo, 2016). Perú señaló la intención de avanzar hacia una economía más circular en publicaciones recientes como la Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en el Sector Industrial⁹ (Gobierno del Perú, 2020b) y el Plan Nacional de Competitividad y Productividad¹⁰ (MEF, 2019). El primero prevé que el MINAM explore la adaptación tecnológica para encontrar materiales sustitutos de los plásticos desechables, pero está claro que los detalles exactos se completarán en el horizonte de implementación de cinco años.

9 En "Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en el Sector Industria"

10 En "Plan Nacional de Competitividad y Productividad (PNCP)"

7.4 Descarbonización de la industria textil en Perú

Resumen del mercado

En 2020, las exportaciones peruanas de textiles, calzado, sombrerería y pieles de animales representaron el 2,7% de las exportaciones, con un valor de \$1,08 millones (OEC, 2022). Las prendas de vestir acabadas, como camisetitas, camisas, suéteres, etc., representan más de la mitad de este comercio, en el que también son significativos las telas y los hilos a granel (consulte la figura 7.5). El principal destino de las exportaciones textiles peruanas es Estados Unidos (51%), siendo la UE (10%) el segundo mercado (consulte la figura 7.6).

Figura 7.5: exportaciones peruanas de textiles, calzado, sombrerería y pieles de animales, 2020, porcentaje por categoría HS4 (OEC, 2022)

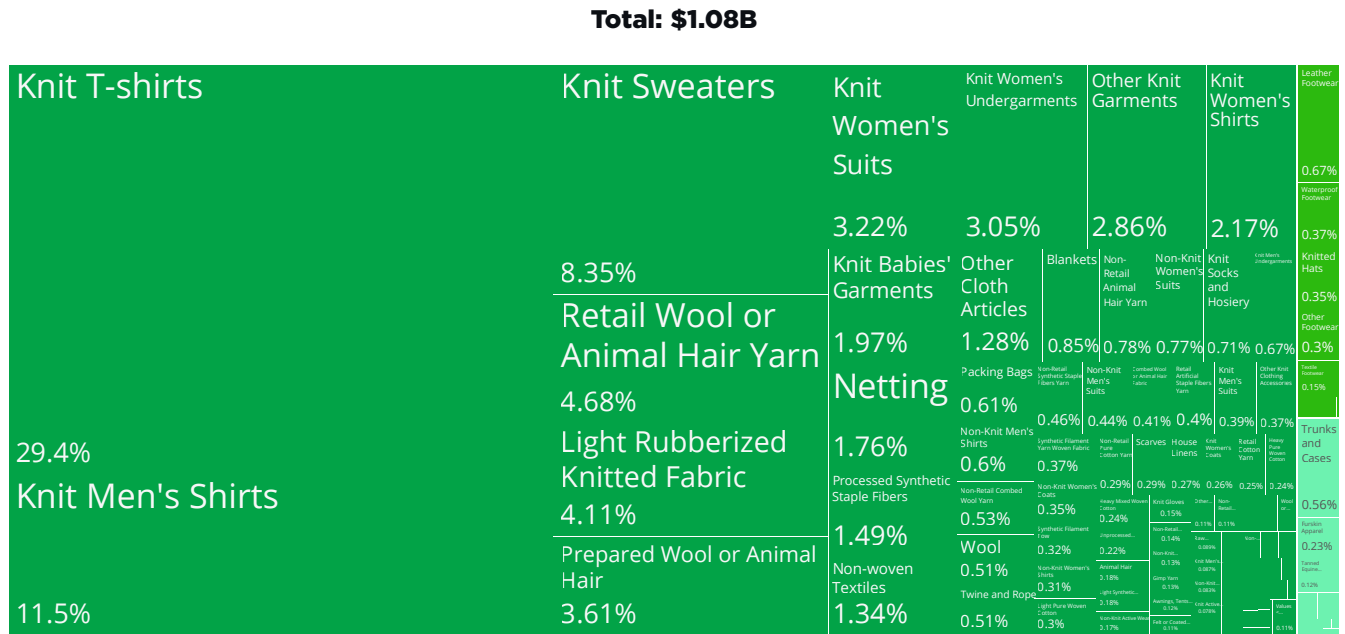
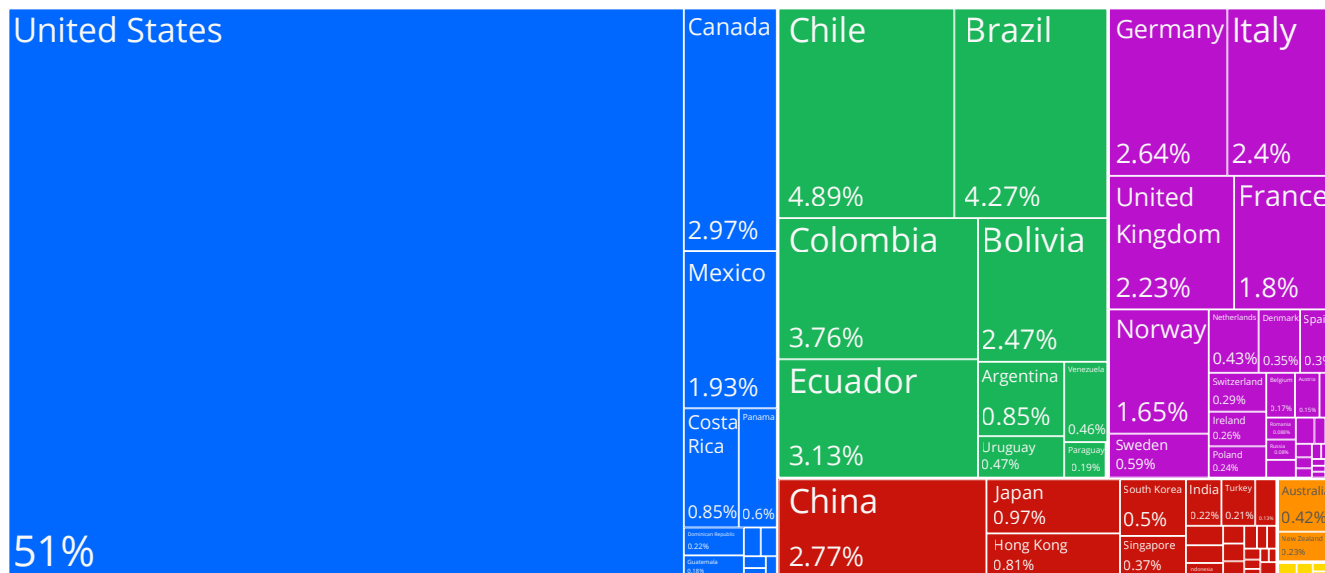


Figura 7.6: exportaciones peruanas de textiles, calzado, sombrerería y pieles de animales, 2020, porcentaje por destino (OEC, 2022)

Total: \$1.08B



Oportunidades tecnológicas

La reducción de las emisiones de los textiles peruanos implicará abordar las emisiones a lo largo del ciclo de vida de la industria, en los recursos aguas arriba, la fabricación de fibras y productos acabados, el transporte y el final de la vida útil (consulte el capítulo 2 para obtener más detalles). Dado que las fibras sintéticas son básicamente plásticos, el debate sobre la descarbonización de los plásticos (consulte el capítulo 1) es relevante para los textiles. En el caso de las fibras naturales (por ejemplo, fibras vegetales, algodón y pieles de animales), que son un componente importante de las exportaciones peruanas, la descarbonización requerirá la reducción de las emisiones agrícolas. El uso directo de energía por parte de vehículos agrícolas, bombas de riego y equipos de cosecha y procesamiento debería electrificarse con electricidad limpia o sustituirse por combustibles de carbono cero en la mayor medida posible (Hedayati et al., 2019). Lo ideal sería que los fertilizantes de potasio y fósforo procedieran de explotaciones mineras sin emisiones (Ouikhalfan et al., 2022). La producción descarbonizada de fertilizantes nitrogenados requiere amoníaco verde (Armijo & Philibert, 2020; Chehade & Dincer, 2021; IEA, 2021b). La descarbonización agrícola también requiere equilibrar las fuentes de emisión y los sumideros de carbono mediante cambios en el uso de la tierra (Harwatt et al., 2020; Reay, 2020) o la captura y el almacenamiento de carbono (Hanna et al., 2021). Es necesario actuar porque los fertilizantes aplicados a las plantas no se absorben completamente, lo que genera emisiones de óxido nitroso, que a su vez es un potente gas de efecto invernadero (Grogovich et al., 2015).

Ya es tecnológicamente posible electrificar todos los procesos principales de la fabricación textil, incluido el calor a alta temperatura, hasta 160 °C (Arpagaus et al., 2018); por lo tanto, la principal vía para alcanzar cero emisiones netas en esta parte de la cadena de valor será convertir los procesos para que utilicen electricidad procedente de una red eléctrica con cero emisiones. El transporte de los productos acabados al mercado también requerirá que los modos de transporte empleados (por ejemplo, transporte

por carretera, aviones, ferrocarriles, barcos) se descarbonicen utilizando electricidad o combustibles sintéticos con cero emisiones (Kaack et al., 2018). En la etapa de eliminación al final de la vida útil, las mismas estrategias analizadas para los plásticos (consulte el capítulo 1) son muy pertinentes para los textiles ya que dos tercios de los textiles son plásticos (Palacios-Mateo et al., 2021), y las mezclas de plástico y fibras naturales (por ejemplo, algodón y poliéster) son cada vez más comunes. La principal vía para lograr la eliminación de los textiles al final de su vida útil será conseguir la circularidad de los materiales mediante la mejora del reciclado y la adopción de los principios de la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2017a; McKinsey & Company, 2022; Shirvanimoghaddam et al., 2020; Wojciechowska, 2021). También es fundamental fomentar un cambio hacia la producción de prendas de mayor calidad, con una vida útil más larga y una mayor durabilidad (Nature Climate Change, 2018; Niinimäki et al., 2020).

Políticas existentes

El objetivo de reducir las emisiones de las industrias textiles y de producción de prendas de vestir aún no aparece específicamente en el trabajo actual del gobierno peruano sobre su estrategia de economía circular (que no sea como parte de la fabricación en general). Es probable que la estrategia se encuentre en las primeras etapas de desarrollo y que deba identificar acciones y objetivos específicos del sector en el futuro. La mejora de la calidad general de los productos textiles peruanos, con los principios de sostenibilidad y moda lenta como principales factores de valor agregado, se considera una posible respuesta a la creciente competencia de Asia (Jarpa & Halog, 2021).

7.5 Descarbonización de la industria automovilística en Perú

Resumen del mercado

Las exportaciones de la industria automotriz en Perú ascienden a \$60 millones, lo que representa el 0,15% del total de las exportaciones (OEC, 2022). Las exportaciones de productos de transporte están dominadas por los vehículos automotores terrestres, pero también incluyen aeronaves y embarcaciones marítimas (consulte la figura 7.7). Las categorías de exportación más importantes de vehículos terrestres son las piezas y accesorios de vehículos de motor (45%), de los cuales el 75% se envía a los Estados Unidos; los autobuses (17%), que se envían principalmente a Chile, Ecuador y Bolivia; y los vehículos de motor y automóviles para fines especiales (12%), que se destinan principalmente a Chile.

Figura 7.7: exportaciones peruanas de productos de transporte, 2020, por categoría HS4 (OEC, 2022)

Total: \$71.2M

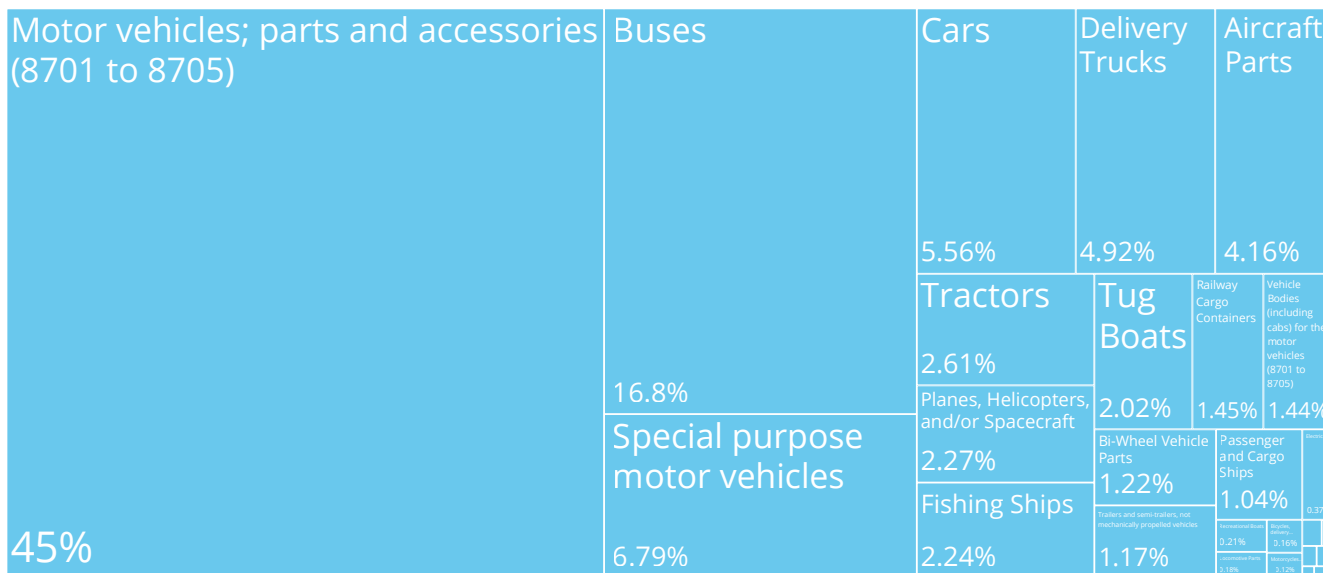
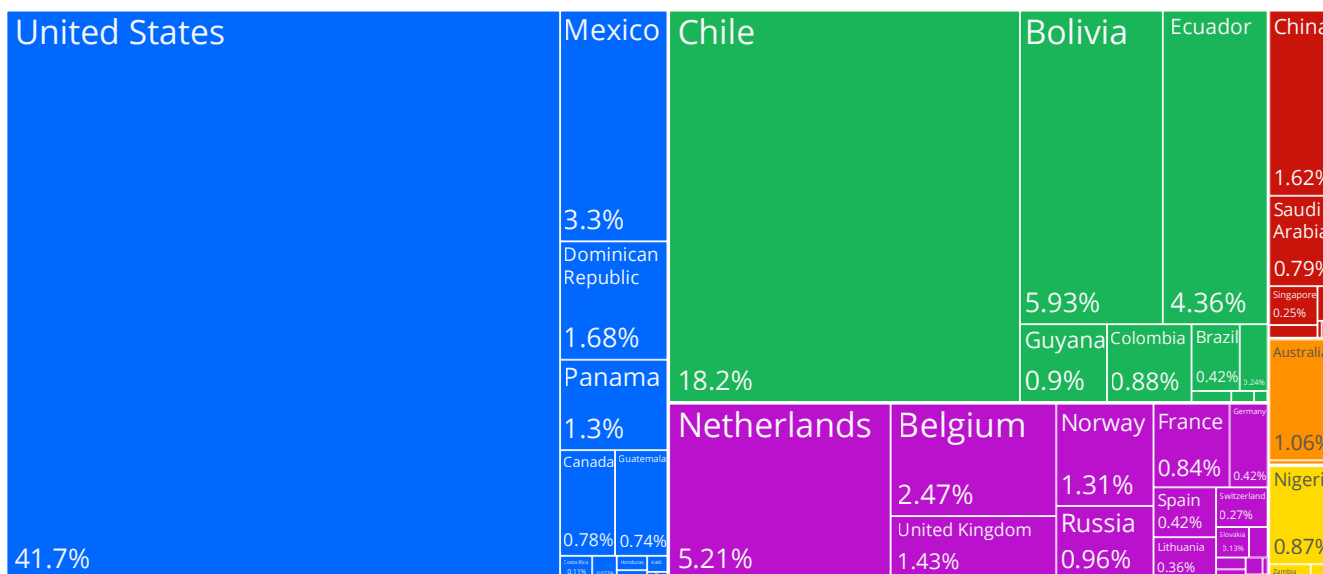


Figura 7.8: exportaciones peruana de automóviles, camiones de reparto, camiones de trabajo, motocicletas, diversas categorías de piezas de vehículos, 2020, por destino (OEC, 2022)

Total: \$60.1M



Oportunidades tecnológicas

A fin de alcanzar cero emisiones netas en la industria automotriz será necesario abordar las emisiones que se producen a lo largo de la cadena de suministro y la vida útil de los vehículos, incluida la producción de los materiales de entrada aguas arriba y los componentes, la fabricación de los vehículos, la conducción de los vehículos y la eliminación de los componentes al final del ciclo de vida del vehículo (consulte el capítulo 3 para obtener más detalles). Las emisiones deben reducirse para los pasos aguas arriba, incluida la minería (Igogo et al., 2021); y para la producción de acero (Bataille, Stiebert, et al., 2021; IEA, 2020b, 2021f; Mission Possible Partnership, 2021; van Sluisveld et al., 2021; Yu et al., 2021), aluminio (Gomilšek et al., 2020; IEA, 2021a; Nature, 2018), vidrio (Furszyfer Del Rio et al., 2022; Griffin et al., 2021) y baterías (Aichberger & Jungmeier, 2020; Degen & Schütte, 2022). A fin de alcanzar cero emisiones netas en la cadena de producción de vehículos se requiere eficiencia energética, la electrificación del mayor número posible de procesos con electricidad de red con cero emisiones de carbono y el uso de hidrógeno verde para el calor de procesos a alta temperatura (Bataille et al., 2018; Bataille, Nilsson, et al., 2021; Rissman et al., 2020). El cambio a vehículos más ligeros (Czerwinski, 2021; Kacar et al., 2018; Shaffer et al., 2021) y la producción de vehículos eléctricos en lugar de vehículos propulsados por combustibles fósiles (Crabtree, 2019; Kawamoto et al., 2019; Rietmann et al., 2020) son otras oportunidades importantes para reducir las emisiones.

Los elementos de transporte de mercancías de la cadena de suministro de la automoción (tanto los productos acabados como los componentes intermedios) deben electrificarse o alimentarse con combustibles sintéticos líquidos o gaseosos sin emisiones para el transporte de mercancías por carretera (Meyer, 2020), ferrocarril (IEA, 2019), avión (Bauen et al., 2020; IEA, 2021c; Viswanathan & Knapp, 2019) y barco (Bouman et al., 2017; Mallouppas & Yfantis, 2021). Debe replantearse la eliminación de los vehículos al final de su vida útil para avanzar hacia flujos de materiales circulares. En principio, casi todas las piezas de un vehículo se pueden reciclar, pero para que esto suceda en la práctica es necesario armonizar el diseño del vehículo, la infraestructura de reciclado y los incentivos de mercado adecuados. Los fabricantes pueden desempeñar un papel importante en la mejora de la reciclabilidad de los vehículos durante el proceso de diseño, tanto mediante la selección de materiales que puedan reciclarse fácilmente como estructurando los componentes del vehículo de manera que puedan desmontarse fácilmente para su reutilización como piezas de repuesto, o separarse en flujos de reciclaje individuales (es decir, utilizando los principios estándar de la economía circular (Aguilar Esteva et al., 2021; Baars et al., 2021; He et al., 2021)). Esto se aplica en especial a los paquetes de baterías, (C. Bauer, Burkhardt, et al., 2022; Harper et al., 2019) pero también a otros componentes estructurales, como los parabrisas y las llantas (McAuley, 2003; Nakano & Shibahara, 2017; Soo et al., 2017).

Políticas existentes

La política industrial peruana aún no se centra en la descarbonización de la fabricación de automóviles, presumiblemente porque aporta una pequeña parte a la economía nacional. Sin embargo, la minería es una de las industrias más críticas del Perú, tanto en términos de producción como de fuente de ingresos fiscales para el Estado; la minería es una actividad clave aguas arriba que se alimenta de la producción mundial de productos automotrices y embarcaciones marinas (por ejemplo, a través del suministro de minerales de hierro y cobre para la fabricación de acero y cableado). La descarbonización progresiva del sector minero deberá convertirse en una posición política explícita y duradera a largo plazo si Perú quiere alcanzar sus ambiciones climáticas declaradas de convertirse en una economía descarbonizada para la década de 2050.

7.6 Descarbonización de la industria pesquera en Perú

Resumen del mercado

La industria pesquera peruana representa una pequeña fracción de la economía. En 2020, las exportaciones de crustáceos y moluscos (frescos o preparados) representaron algo más de \$1,3 millones, lo que equivale a alrededor del 3% de la actividad exportadora total. Los mayores segmentos de exportación de productos del mar (consulte la figura 7.9) son los crustáceos (~11%, si se agregan los productos frescos y procesados), los moluscos (10%) y el pescado (~9% en todas las categorías de productos frescos/preparados). Perú exporta sus productos del mar a todos los continentes (consulte la figura 7.10), siendo los mayores destinos por volumen la UE, seguida de EE. UU. y Corea del Sur.

Figura 7.9: exportaciones peruanas de productos animales y alimenticios, 2020, por categoría HS4 (OEC, 2022)

Total: \$4.16B

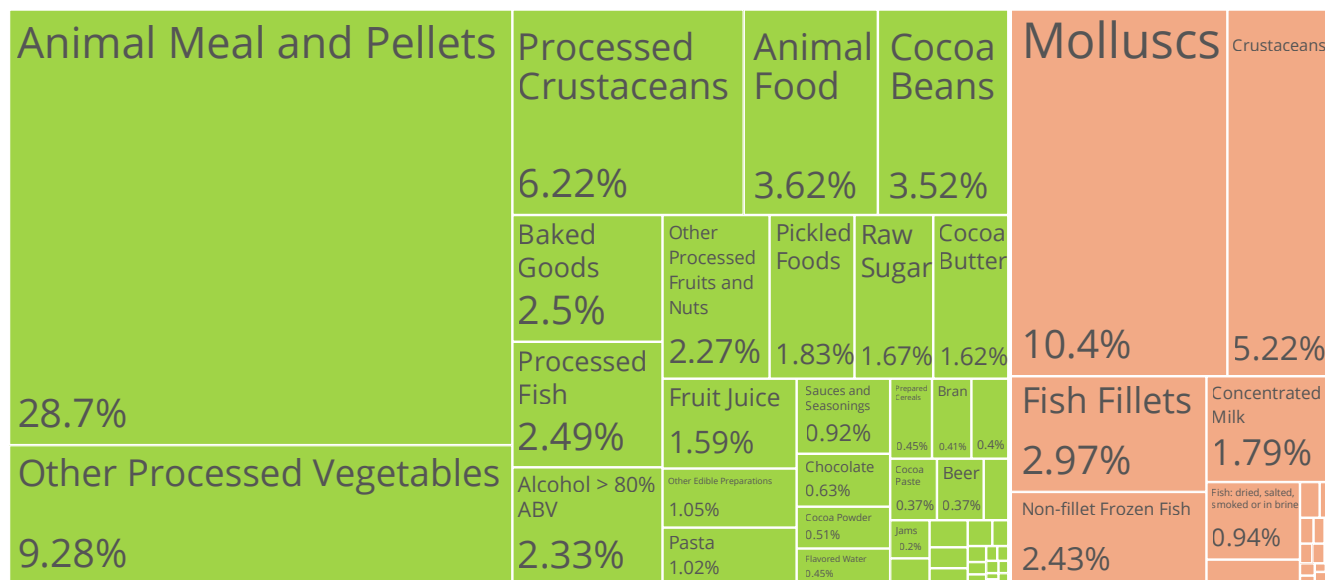
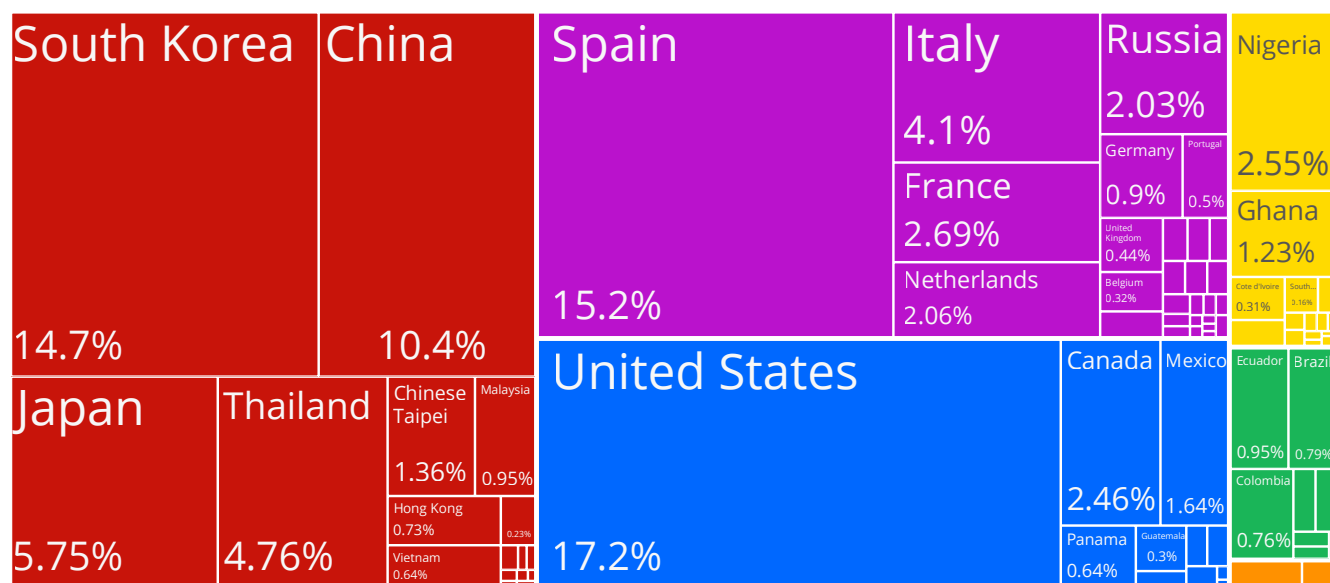


Figura 7.10: exportaciones peruanas de pescado vivo, pescado fresco no fileteado, pescado congelado no fileteado, filetes de pescado, pescado seco salado ahumado y en salmuera, crustáceos, moluscos, pescado procesado y crustáceos procesados, 2020, por destino (OEC, 2022)

Total: \$1.29B



Oportunidades tecnológicas

La descarbonización del sector pesquero requiere que la neutralidad de carbono se dé en toda la cadena de valor del sector. Deben reducirse las emisiones en la producción aguas arriba, los insumos y los piensos para los buques y los peces de piscifactoría; en la explotación de los buques pesqueros, el transporte de los productos y el tratamiento de los buques marítimos al final de su vida útil (Mallouppas & Yfantis, 2021; Vakili, Ölçer, et al., 2022). La neutralidad de carbono es necesaria en la cadena de insumos agrícolas que produce piensos para las granjas de marisco (Jones et al., 2022), para los combustibles y la electricidad que alimentan el procesamiento y envasado del marisco (Alzahrani et al., 2020; Scroggins et al., 2022), y para el transporte de los productos acabados al mercado (Psaraftis & Kontovas, 2020). Dado que los buques y las infraestructuras portuarias tienen una larga vida útil, medida en décadas (Bullock et al., 2022), existe una inercia considerable en el sistema establecido, que depende en gran medida de los combustibles fósiles. Es poco probable que la competencia de precios y la innovación por sí solas conduzcan a los cambios transformadores necesarios para ayudar a cumplir los objetivos del Acuerdo de París para 2050 y 2070. Es casi seguro que será necesaria la creación deliberada de mercados y normativas para incentivar y exigir el cambio tecnológico (Cullinane & Yang, 2022; Lagouvardou et al., 2020).

La descarbonización de la industria pesquera requerirá una planificación política a largo plazo e inversiones en innovación para identificar la composición y la condición de las flotas pesqueras nacionales y los sectores de cría de mariscos asociados, y para trazar un rumbo hacia las emisiones cero en consonancia con los objetivos nacionales de descarbonización. Es fundamental el apoyo de otros sectores como la agricultura, la electricidad y el suministro de combustible para descarbonizar la pesca. Por lo tanto, la planificación de este sector no puede llevarse a cabo de forma aislada del resto de la economía. Será necesaria una

profunda coordinación entre los organismos nacionales responsables de la agricultura y la acuicultura (es decir, la cría de mariscos), la legislación marítima, la gestión de los ecosistemas y los reglamentos técnicos que rigen las embarcaciones marítimas. Dado que la pesca y el transporte de productos del mar cruzan fronteras internacionales, la coordinación de las actividades nacionales de descarbonización también tendrá que alinearse con organismos internacionales como las sociedades de certificación navieras (por ejemplo, Lloyd's Register, American Bureau of Shipping, Nippon Kaiji Kyokai), que aseguran a los buques de carga en sus viajes transfronterizos, y con la Organización Marítima Internacional (OMI) (Miliós et al., 2019). Casi toda la deconstrucción y el reciclado de buques del mundo se produce en solo cinco mercados: India, Pakistán, Bangladesh, Turquía y China (UNCTAD, 2021); se necesita una implicación directa con los gobiernos de esos países para hacer posible una economía más circular para los buques de transporte marítimo.

Políticas existentes

La principal legislación que aborda la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la pesca de captura silvestre y la acuicultura en Perú es el Decreto Supremo N° 02-2019-PRODUCE (Gobierno del Perú, 2019). Esto requiere que todos los titulares de licencias de pesca y acuicultura silvestres desarrollen planes de gestión ambiental que incluyan medidas para abordar las emisiones de GEI. En el momento de redactar este documento (principios de 2023), no existe ninguna institución en Perú que sea responsable de la regulación, gestión y transformación global de los sectores de la pesca y la acuicultura en consonancia con las metas u objetivos nacionales. Por ejemplo, el Ministerio de la Producción (PRODUCE) gestiona las poblaciones de peces, inspecciona y emite licencias a la flota pesquera comercial; y el Ministerio del Ambiente (MINAM) tiene la responsabilidad general de la protección de los ecosistemas marinos y de agua dulce y el desarrollo sostenible de los recursos naturales del país. Podría decirse que la política pesquera peruana adolece de fragmentación institucional. Existen no menos de ocho organismos gubernamentales diferentes, cada uno con sus propias políticas y procesos independientes de planificación estratégica plurianual. Tanto para las aguas marinas como para las continentales, existe una falta general de coordinación o de elaboración de políticas que tengan en cuenta los objetivos económicos, sociales y medioambientales nacionales o regionales (OECD, 2017). Esto dificultó mucho la toma de decisiones conjunta en este sector. Se requieren reformas para que un organismo o conjunto de organismos con legitimidad institucional creen y pongan en marcha un marco político integrado para la descarbonización de la pesca y la acuicultura.

7.7 Hacia una industria de plásticos, textil, automovilística y pesquera con cero emisiones netas en Perú

Las opciones tecnológicas para reducir las emisiones de los sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero en Perú comparten una serie de elementos estratégicos comunes. Las estrategias transversales para la descarbonización industrial que son consistentes en toda la literatura (Bataille et al., 2018; Bataille, Nilsson, et al., 2021; Lechtenböhmer et al., 2016; Rissman et al., 2020; Thiel & Stark, 2021) incluyen:

- i. Eficiencia de los materiales y procesos energéticamente eficientes.
- ii. Electrificación de la energía de proceso siempre que sea posible.

- iii. Cambio a combustibles sintéticos de bajas emisiones cuando no sea posible la electrificación.
- iv. Captura y almacenamiento de carbono cuando sea necesario.
- v. Circularidad y reciclaje de los materiales.
- vi. Eliminación del dióxido de carbono.

Eficiencia de los materiales y procesos energéticamente eficientes

El uso eficiente de los recursos energéticos y materiales disponibles es un punto de partida fundamental para una estrategia industrial descarbonizada. Minimizar los residuos durante la producción hace menos costosa la tarea de proporcionar infraestructuras para descarbonizar los insumos energéticos y materiales. La eficiencia energética industrial en Perú es abordada por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) en su estrategia de uso de energía de 2009 (MINEM, 2009). El principal objetivo para la industria en este documento era modernizar el 60% de las calderas industriales. No está claro si se logró este objetivo o si se está elaborando un documento estratégico de sustitución. Los objetivos y metas de eficiencia energética para los sectores de demanda de uso final (que englobarían a la industria) están notablemente ausentes del plan energético nacional del MINEM (MINEM, 2014), y cualquier revisión futura debería incluir idealmente objetivos específicos, medibles y procesables. Una evaluación del panorama político peruano llevada a cabo por el Centro de Investigación Energética de Asia-Pacífico concluyó que, a pesar de algunos éxitos pasados, el potencial general de la eficiencia energética en Perú sigue estando en gran medida sin explotar, y que falta un compromiso entre la industria y el ejecutivo en este tema (APER, 2020).

Electrificación

En consonancia con las evaluaciones mundiales de las vías tecnológicas y económicas hacia una industria sin emisiones, lograr una descarbonización profunda de la industria peruana requeriría una expansión a gran escala de la electricidad limpia de red. Para que Perú alcance una industria sin emisiones (incluidos los sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero), será necesario que casi el 100% de la electricidad suministrada para la producción proceda de fuentes de energía que no sean combustibles fósiles. Los principios generales para la descarbonización del suministro eléctrico incluyen la planificación de una electrificación limpia a largo plazo; la creación de hojas de ruta; la disponibilidad de financiación a bajo costo para la generación, transmisión y distribución; el establecimiento de estándares de rendimiento (por ejemplo, para la intensidad de los GEI); la agilización de los permisos y aprobaciones para la construcción de infraestructuras energéticas; y la puesta en marcha de un proceso gestionado de eliminación progresiva de la generación residual de combustibles fósiles (Fazekas et al., 2022).

El potencial de Perú para generar energía renovable es muy alto, pero está infrautilizado (IRENA, 2014). Por ejemplo, basándose únicamente en los recursos solares y las limitaciones geográficas (es decir, la red también tendría que reforzarse en consecuencia), las estimaciones sugieren que Perú podría generar, solo con energía solar, aproximadamente 10 veces la electricidad que produce actualmente (NREL, 2019). Sin embargo, la hoja de ruta peruana para ampliar la energía renovable no está clara, y las subastas de proyectos de energía renovable que se pretendía celebrar anualmente están paralizadas desde 2016. El

MINEM no actualizó su plan estratégico de energía (MINEM, 2014) en casi una década; el retraso sugiere una ausencia de coordinación estrecha entre los objetivos de la política medioambiental y los de la política energética. Solo alrededor del 70% de la población de las zonas rurales tiene acceso a la electricidad, por lo que un plan de electrificación rural a gran escala es fundamental para los planes gubernamentales de mejorar las oportunidades económicas y los medios de subsistencia (MINEM, 2020). Uno de los grandes retos identificados para Perú fue el acceso limitado a la financiación de proyectos de energías renovables y a la financiación climática en general, así como las necesidades no cubiertas de apoyo adicional en el ámbito del desarrollo tecnológico y la innovación (Umweltbundesamt, 2018). Una coordinación más estrecha entre gobiernos y la implicación de diferentes organismos serían pasos útiles para ayudar a cerrar esta brecha. Por ejemplo, una acción a corto plazo para el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) sería identificar oportunidades de inversión y promoverlas. Para ello, el MEF podría utilizar las habilidades y la experiencia de ProInversion, una agencia técnica especializada financiada por el Estado que forma parte del Ministerio de Economía y Finanzas del Perú y que está destinada a servir como un vehículo clave para fomentar la inversión privada en la economía peruana.

Combustibles sintéticos con bajo contenido de GEI

Diversos procesos industriales, como la fabricación de acero, la producción de cemento y vidrio, o el refinado de productos químicos, requieren temperaturas elevadas. Otros ejemplos incluyen la creación de polímeros a granel en la industria del plástico y el teñido de tejidos textiles. Las bombas de calor eléctricas disponibles en el mercado ya pueden suministrar temperaturas de hasta 150 °C, pero es probable que las temperaturas más altas sean un desafío hasta la década de 2030 (Arpagaus et al., 2018). La descarbonización de la industria requiere, por tanto, combustibles sintéticos de bajas emisiones para proporcionar calor a partir de la combustión.

Los esfuerzos por desarrollar biocombustibles en Perú tuvo resultados desiguales hasta la fecha (Pacheco Canales, 2019); históricamente, tales esfuerzos se enfrentaron a preocupaciones sobre el impacto en los bosques, la disponibilidad de agua y la seguridad alimentaria en general (Tejada & Rist, 2018; Urteaga-Crovetto & Segura-Urrunaga, 2021). Los esfuerzos por controlar la deforestación en Perú provocaron un aumento de los precios de los alimentos (Ugarte et al., 2021), lo que agravó estas preocupaciones. Por lo tanto, parece que la combinación de cultivos bioenergéticos a gran escala con los esfuerzos para preservar los sumideros de carbono de los bosques en el marco de la estrategia nacional de descarbonización de Perú puede suponer un reto (Gobierno del Perú, 2020a).

Los principales candidatos a sustituir a los combustibles fósiles en la industria son el hidrógeno y el amoníaco verdes, que podrían fabricarse en Perú. En un primer paso alentador, el MINEM firmó recientemente un acuerdo con H2 Perú, una asociación industrial que representa a diversas empresas de energía e ingeniería química, para colaborar e impulsar el desarrollo tecnológico de proyectos de hidrógeno verde (MINEM, 2022). El primer proyecto piloto que se propuso es un electrolizador de 160 MW que producirá 55 toneladas diarias de hidrógeno, con equipos de Siemens, con el objetivo de producir hidrógeno verde, metanol o amoníaco para su exportación a Asia y a la costa oeste de Estados Unidos (H2 Perú, 2022). El amoníaco y el hidrógeno verdes también se consideran los principales candidatos a sustituir a los combustibles fósiles en la generación de energía (Cesaro et al., 2021; Valera-Medina et al., 2018) y el transporte marítimo (Al-Aboosi et al., 2021; Inal et al., 2022). El amoníaco ya tiene una gran demanda a nivel mundial como insumo clave para los fertilizantes agrícolas (Faria, 2021). Esto significa que el desarrollo de una sólida industria peruana del hidrógeno podría ayudar a descarbonizar la producción nacional, ofrecer

oportunidades de mercado para la exportación y aumentar la seguridad energética gracias a una menor dependencia de los combustibles fósiles importados. La producción de hidrógeno y amoníaco representa una oportunidad para que la industria nacional del gas natural diversifique sus actividades; este enfoque podría ser particularmente importante ya que es probable que Perú se convierta en un importador neto de gas natural a mediados de la década de 2030 (Chavez-Rodriguez et al., 2018; Leung & Jenkins, 2014).

Captura y almacenamiento de carbono

Las tecnologías de secuestro artificial de CO₂, como las tecnologías de captura directa en el aire (Erans et al., 2022; Hanna et al., 2021; McQueen et al., 2021), aún no aparecen en la literatura política peruana. Aun así, los investigadores peruanos ya realizaron evaluaciones de posibles depósitos para el almacenamiento geológico a largo plazo del dióxido de carbono capturado (Carlotto et al., 2022).

Circularidad y reciclaje de los materiales

La gestión de residuos sigue siendo un reto importante para Perú. Predomina la eliminación informal, como sugiere una evaluación reciente que documentó 29 vertederos registrados y 1400 vertederos a cielo abierto (Ziegler-Rodriguez et al., 2019). Las estimaciones indican que solo el 3% de los hogares reciclan sus residuos (Lavanda Reyes, 2021). El Ministerio de Medio Ambiente (MINAM) lleva una década esforzándose por superar estos problemas y pasar a un sistema de gestión de residuos con separación en origen y recolección controlada en vertederos sanitarios (MINAM, 2021a, 2021b). Al mismo tiempo, el reciclaje como medio de recuperación de materiales para su reutilización aumenta cada año en Perú, aunque principalmente a través de canales informales (De-La-Torre-Jave et al., 2022), y los investigadores comenzaron a colaborar con las empresas para comprender qué factores podrían motivar comportamientos compatibles con la economía circular (Alvarez-Risco et al., 2021). El gobierno peruano comenzó a incorporar el concepto de flujos de materiales más circulares en la formulación de políticas ambientales y económicas a través de publicaciones como la Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en el Sector Industria (Gobierno del Perú, 2020b) y el Plan Nacional de Competitividad y Productividad (MEF, 2019).

Eliminación del dióxido de carbono (CDR)

Para que las emisiones peruanas sean neutras en cuanto al carbono de sus industrias y de toda la economía, es probable que haya que tomar medidas para eliminar el dióxido de carbono de la atmósfera. Los enfoques basados en la naturaleza ofrecen un medio para compensar la fracción de emisiones que no se pueden eliminar fácilmente, como las emisiones de óxido nitroso procedentes del uso de fertilizantes nitrogenados en la producción agrícola (Lim et al., 2021) para el cultivo de alimentos y textiles. La Contribución Nacionalmente Determinada de Perú al Acuerdo de París (Gobierno del Perú, 2020a) se basa en la captura natural de carbono a través de la protección y la gestión de los bosques tropicales como medio clave para acercar las emisiones de GEI del país a cero para 2050 (Ugarte et al., 2021). También existe la posibilidad de aumentar los sumideros de carbono a través de la reforestación; un enfoque de este tipo requerirá la adopción de medidas para abordar la contabilización incorrecta de dichos sumideros y los daños causados a los bosques por, por ejemplo, incendios y enfermedades (Lefebvre et al., 2021).

7.8 Conclusiones

Perú es un país que se encuentra en las primeras etapas de desarrollo de una estrategia de transición hacia una economía con cero emisiones netas que puede alinearse con otros objetivos nacionales críticos, como la electrificación rural, la diversificación económica y la mitigación de la pobreza. En el momento de redactar este documento (principios de 2023), aún no se había publicado una hoja de ruta nacional para lograr la neutralidad de carbono en 2050. Cualquier futura estrategia de descarbonización industrial deberá ajustarse a los contornos generales del próximo plan (que elaborará el Ministerio de Medio Ambiente (MINAM)). Perú cuenta con una serie de ventajas tanto por sus recursos naturales como por su ubicación. Tiene potencial para generar abundante energía solar y eólica. Sus puertos en la costa del Pacífico ofrecen rutas de exportación a las principales economías de América del Norte y Asia. No está claro si se están aprovechando al máximo para lograr mayores objetivos de desarrollo.

Incluso sin la estrategia de descarbonización, es evidente que se necesitarán grandes aumentos en la disponibilidad de electricidad baja en carbono a través de la red eléctrica nacional para hacer posible la actividad industrial sin emisiones en Perú. Esto puede requerir la intervención del Estado en la estructura existente del mercado eléctrico para acelerar el despliegue de las energías renovables y aumentar la capacidad de generación, que en los últimos años se quedó rezagada con respecto a los objetivos. El último plan energético nacional se publicó en 2014, hace casi una década. La ausencia de una hoja de ruta energética actualizada y global por parte del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) dejó un vacío entre las políticas energéticas, medioambientales y económicas. Esta brecha solo puede cerrarse mediante una coordinación interdepartamental más estrecha. Para lograr una transición de la magnitud necesaria será preciso que todos los que trabajan en los ministerios y departamentos gubernamentales en materia de energía, minería, medio ambiente, economía y finanzas trabajen en estrecha colaboración.

Los combustibles sintéticos con bajas emisiones de carbono también son un requisito previo para las actividades industriales sin emisiones. Son particularmente importantes para las industrias manufactureras que requieren calor de proceso a alta temperatura, necesario para producir plásticos, refinar productos petroquímicos y producir insumos clave aguas arriba (como acero y vidrio) para la fabricación de automóviles. Un primer paso prometedor en este ámbito fue el acuerdo entre el MINEM y la Asociación Peruana del Hidrógeno (H2 Perú) para promover proyectos de hidrógeno verde (MINEM, 2022). Además, Perú inició el proceso de introducir el pensamiento de la economía circular en sus documentos estratégicos más recientes; sin embargo, será difícil lograr la circularidad material a menos que se mejore el rendimiento del sistema de recolección de residuos para evitar la eliminación incontrolada en vertederos abiertos, que sigue siendo el principal método de eliminación al final de la vida útil de los productos desechados.

Los dirigentes peruanos deben tomar medidas audaces y decisivas a fin de desarrollar todo su potencial y avanzar sustancialmente hacia un futuro industrial descarbonizado. Sobre la base de las ventajas naturales y las iniciativas históricas del país, es fundamental renovar las políticas energéticas, fomentar las sinergias interdepartamentales e invertir en nuevas infraestructuras. Al hacerlo, Perú podrá armonizar el crecimiento económico con la protección del medio ambiente para el bienestar de sus ciudadanos.

REFERENCIAS

- Abernethy, K. E., Trebilcock, P., Kebede, B., Allison, E. H., & Dulvy, N. K. (2010). Fuelling the decline in UK fishing communities? *ICES Journal of Marine Science*, 67(5), 1076–1085.
- Agora Verkehrswende. (2019). The carbon footprint of electric cars: influencing factors and potential for improvement (In German: "Klimabilanz von Elektroautos: Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial").
- Aguilar Esteva, L. C., Kasliwal, A., Kinzler, M. S., Kim, H. C., & Keoleian, G. A. (2021). Circular economy framework for automobiles: Closing energy and material loops. *Journal of Industrial Ecology*, 25(4), 877–889.
- Ahamed, A., Veksha, A., Giannis, A., & Lisak, G. (2021). Flexible packaging plastic waste – environmental implications, management solutions, and the way forward. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 32, 100684.
- Aichberger, C., & Jungmeier, G. (2020). Environmental Life Cycle Impacts of Automotive Batteries Based on a Literature Review. *Energies*, 13(23), 6345.
- Air Products. (2021). Air Products Announces Multi-Billion Dollar Net-Zero Hydrogen Energy Complex in Edmonton, Alberta, Canada.
- AITE. (2019). Aite Noticias, Edición 12, Febrero - Marzo 2019: Cosechamos primeros resultados del acercamiento con viceministros de producción y comercio exterior (In English: "AITE News, 12th Edition, February - March 2019: We reap the first results of our approach tow).
- Ajayi, V., & Reiner, D. (2020). Consumer Willingness to Pay for Reducing the Environmental Footprint of Green Plastics, Cambridge Working Papers in Economics 20110.
- Al-Aboosi, F. Y., El-Halwagi, M. M., Moore, M., & Nielsen, R. B. (2021). Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100670.
- Alasalvar, C., & Quantick, P. C. (1997). Temperature modelling and relationships in fish transportation. In *Fish Processing Technology* (pp. 249–288). Springer US.
- Alvarez-Risco, A., Estrada-Merino, A., Rosen, M. A., Vargas-Herrera, A., & Del-Aguila-Arcentales, S. (2021). Factors for Implementation of Circular Economy in Firms in COVID-19 Pandemic Times: The Case of Peru. *Environments*, 8(9), 95.
- Alvarez-Risco, A., Rosen, M. A., & Del-Aguila-Arcentales, S. (2020). A New Regulation for Supporting a Circular Economy in the Plastic Industry: The Case of Peru (Short Communication). *Journal of Landscape Ecology*, 13(1), 1–3.
- Alzahrani, A., Petri, I., Ghoroughi, A., & Rezgui, Y. (2022). A proposed roadmap for delivering zero carbon fishery ports. *Energy Reports*, 8, 82–88.
- Alzahrani, A., Petri, I., & Rezgui, Y. (2019). Modelling and implementing smart micro-grids for fish-processing industry. 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), 1–8.
- Alzahrani, A., Petri, I., Rezgui, Y., & Ghoroghi, A. (2020). Developing Smart Energy Communities around Fishery Ports: Toward Zero-Carbon Fishery Ports. *Energies*, 13(11), 2779.
- American Chemistry Council (ACC), & Franklin Associates. (2010). Final Report: Cradle-to-Gate Life Cycle Inventory of Nine Plastic Resins and Four Polyurethane Precursors.
- Anderson, J. L., Asche, F., Garlock, T., & Chu, J. (2017). Aquaculture: Its Role in the Future of Food (pp. 159–173).
- APEREC. (2020). Follow-Up Peer Review on Energy Efficiency in Peru.
- Arango-Aramburo, S., Turner, S. W. D., Daenzer, K., Ríos-Ocampo, J. P., Hejazi, M. I., Kober, T., Álvarez-Espinosa, A. C., Romero-Otalora, G. D., & van der Zwaan, B. (2019). Climate impacts on hydropower in Colombia: A multi-model assessment of power sector adaptation pathways. *Energy Policy*, 128, 179–188.

- Arcentales, D., & Silva, C. (2019). Exploring the Introduction of Plug-In Hybrid Flex-Fuel Vehicles in Ecuador. *Energies*, 12(12), 2244.
- Arévalo Campos, L. M., & Méndez Navarro, A. (2022). Acciones basadas en la economía circular que minimicen los impactos ambientales generados por la confección de prendas de vestir en Colombia.
- Armijo, J., & Philibert, C. (2020). Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1541–1558.
- Arnaiz del Pozo, C., & Cloete, S. (2022). Techno-economic assessment of blue and green ammonia as energy carriers in a low-carbon future. *Energy Conversion and Management*, 255, 115312.
- Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., & Bertsch, S. S. (2018). High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy*, 152, 985–1010.
- Asamblea Constituyente. (2008). Constitución de Ecuador, 2008.
- Asamblea Nacional. (2019). Organic Law of Energy Efficiency (In Spanish: "Ley Orgánica de Eficiencia Energética", LOEE).
- Asamblea Nacional. (2021). Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva, Registro Oficial Suplemento No. 488 de 06 de julio de 2021.
- Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M. M., Atilhan, M., Moore, M., & Nielsen, R. B. (2021). Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100668.
- Baars, J., Domenech, T., Bleischwitz, R., Melin, H. E., & Heidrich, O. (2021). Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. *Nature Sustainability*, 4(1), 71–79.
- Báez, S., Jaramillo, L., Cuesta, F., & Donoso, D. A. (2016). Effects of climate change on Andean biodiversity: a synthesis of studies published until 2015. *Neotropical Biodiversity*, 2(1), 181–194.
- Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conversion and Management*, 182, 72–88.
- Balcombe, P., Staffell, I., Kerdan, I. G., Speirs, J. F., Brandon, N. P., & Hawkes, A. D. (2021). How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis. *Energy*, 227, 120462.
- Baldi, F., Moret, S., Tammi, K., & Maréchal, F. (2020). The role of solid oxide fuel cells in future ship energy systems. *Energy*, 194, 116811.
- Ballester-Moltó, M., Sanchez-Jerez, P., Cerezo-Valverde, J., & Aguado-Giménez, F. (2017). Particulate waste outflow from fish-farming cages. How much is uneaten feed? *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 23–30.
- Barreiro, J., Zaragoza, S., & Diaz-Casas, V. (2022). Review of ship energy efficiency. *Ocean Engineering*, 257, 111594.
- Barrowclough, D., & Birkbeck, C. (2022). Transforming the Global Plastics Economy: The Role of Economic Policies in the Global Governance of Plastic Pollution. *Social Sciences*, 11(1), 26.
- Bastardie, F., Hornborg, S., Ziegler, F., Gislason, H., & Eigaard, O. R. (2022). Reducing the Fuel Use Intensity of Fisheries: Through Efficient Fishing Techniques and Recovered Fish Stocks. *Frontiers in Marine Science*, 9.
- Basurko, O. C., Gabiña, G., & Uriondo, Z. (2013). Energy performance of fishing vessels and potential savings. *Journal of Cleaner Production*, 54, 30–40.
- Bataille, C., Åhman, M., Neuhoff, K., Nilsson, L. J., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Stiebert, S., Waisman, H., Sartor, O., & Rahbar, S. (2018). A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production*, 187, 960–973.
- Bataille, C., Nilsson, L. J., & Jotzo, F. (2021). Industry in a net-zero emissions world: New mitigation pathways, new supply chains, modelling needs and policy implications. *Energy and Climate Change*, 2, 100059.

- Bataille, C., Stiebert, S., Li, F. G. N., Stiebert, S., & Li, F. G. N. (2021). Global Facility Level Net-zero Steel Pathways: Technical Report on the First Scenarios of the Net-zero Steel Project.
- Bataille, C., Waisman, H., Briand, Y., Svensson, J., Vogt-Schilb, A., Jaramillo, M., Delgado, R., Arguello, R., Clarke, L., Wild, T., Lallana, F., Bravo, G., Nadal, G., Le Treut, G., Godinez, G., Quiros-Tortos, J., Pereira, E., Howells, M., Buirra, D., ... Imperio, M. (2020). Net-zero deep decarbonization pathways in Latin America: Challenges and opportunities. *Energy Strategy Reviews*, 30, 100510.
- Bauen, A., Bitossi, N., German, L., Harris, A., & Leow, K. (2020). Sustainable Aviation Fuels. Johnson Matthey Technology Review.
- Bauer, C., Burkhardt, S., Dasgupta, N. P., Ellingsen, L. A.-W., Gaines, L. L., Hao, H., Hischer, R., Hu, L., Huang, Y., Janek, J., Liang, C., Li, H., Li, J., Li, Y., Lu, Y.-C., Luo, W., Nazar, L. F., Olivetti, E. A., Peters, J. F., ... Xu, S. (2022). Charging sustainable batteries. *Nature Sustainability*, 5(3), 176–178.
- Bauer, C., Treyer, K., Antonini, C., Bergerson, J., Gazzani, M., Gencer, E., Gibbins, J., Mazzotti, M., McCoy, S. T., McKenna, R., Pietzcker, R., Ravikumar, A. P., Romano, M. C., Ueckerdt, F., Vente, J., & van der Spek, M. (2022). On the climate impacts of blue hydrogen production. *Sustainable Energy & Fuels*, 6(1), 66–75.
- Bauer, F., Ericsson, K., Hasselbalch, J., Nielsen, T., & Nilsson, L. J. (2018). Climate innovations in the plastic industry: Prospects for decarbonisation (IMES/EEES report series; Vol. 111).
- Bauer, F., & Fontenit, G. (2021). Plastic dinosaurs – Digging deep into the accelerating carbon lock-in of plastics. *Energy Policy*, 156, 112418.
- BEIS. (2021). Industrial Decarbonisation Strategy.
- Béné, C., Barange, M., Subasinghe, R., Pinststrup-Andersen, P., Merino, G., Hemre, G.-I., & Williams, M. (2015). Feeding 9 billion by 2050 – Putting fish back on the menu. *Food Security*, 7(2), 261–274.
- Bergmann, J. (2021). Planned relocation in Peru: advancing from well-meant legislation to good practice. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 11(3), 365–375.
- Besson, M., Aubin, J., Komen, H., Poelman, M., Quillet, E., Vandeputte, M., van Arendonk, J. A. M., & de Boer, I. J. M. (2016). Environmental impacts of genetic improvement of growth rate and feed conversion ratio in fish farming under rearing density and nitrogen output limitations. *Journal of Cleaner Production*, 116, 100–109.
- Beton, A., Dias, D., Farrant, L., Gibon, T., Le Guern, Y., Desaxce, M., Perwueltz, A., Boufateh, I., Wolf, O., Kougoulis, J., Cordella, M., & Dodd, N. (2014). Environmental improvement potential of textiles (IMPRO Textiles).
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2018). Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: A life cycle approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2), 1179–1193.
- Bishop, G., Styles, D., & Lens, P. N. L. (2021). Environmental performance comparison of bioplastics and petrochemical plastics: A review of life cycle assessment (LCA) methodological decisions. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105451.
- BMUV. (2016). Climate Action Plan 2050: Principles and Goals of the German Government's Climate Policy (In German: "Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung).
- BMW. (2020). The National Hydrogen Strategy (In German: "Die Nationale Wasserstoffstrategie").
- Bonsch, M., Humpenöder, F., Popp, A., Bodirsky, B., Dietrich, J. P., Rolinski, S., Biewald, A., Lotze-Campen, H., Weindl, I., Gerten, D., & Stevanovic, M. (2016). Trade-offs between land and water requirements for large-scale bioenergy production. *GCB Bioenergy*, 8(1), 11–24.
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Riialand, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408–421.
- Boziaris, I. S. (2013). *Seafood Processing: Technology, Quality and Safety* (I. S. Boziaris (ed.)). Wiley-Blackwell.

- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., & Sukumaran, S. (2020). Plastic rain in protected areas of the United States. *Science*, 368(6496), 1257–1260.
- Brodin, M., Vallejos, M., Opedal, M. T., Area, M. C., & Chinga-Carrasco, G. (2017). Lignocellulosics as sustainable resources for production of bioplastics – A review. *Journal of Cleaner Production*, 162, 646–664.
- Brooks, A., Jambeck, J. R., & Mozo-Reyes, E. (2020). Plastic Waste Management and Leakage in Latin America and the Caribbean (IDB Technical Note 2058).
- Bujas, T., Koričan, M., Vukić, M., Soldo, V., Vladimir, N., & Fan, A. (2022). Review of Energy Consumption by the Fish Farming and Processing Industry in Croatia and the Potential for Zero-Emissions Aquaculture. *Energies*, 15(21), 8197.
- Bullock, S., Mason, J., & Larkin, A. (2022). The urgent case for stronger climate targets for international shipping. *Climate Policy*, 22(3), 301–309.
- Busch, J., Engelmann, J., Cook-Patton, S. C., Griscom, B. W., Kroeger, T., Possingham, H., & Shyamsundar, P. (2019). Potential for low-cost carbon dioxide removal through tropical reforestation. *Nature Climate Change*, 9(6), 463–466.
- Caballero, B. M., de Marco, I., Adrados, A., López-Urionabarrenechea, A., Solar, J., & Gastelu, N. (2016). Possibilities and limits of pyrolysis for recycling plastic rich waste streams rejected from phones recycling plants. *Waste Management*, 57, 226–234.
- Cabral, R. B., Halpern, B. S., Lester, S. E., White, C., Gaines, S. D., & Costello, C. (2019). Designing MPAs for food security in open-access fisheries. *Scientific Reports*, 9(1), 8033.
- Calderón Márquez, A. J., & Rutkowski, E. W. (2020). Waste management drivers towards a circular economy in the global south – The Colombian case. *Waste Management*, 110, 53–65.
- Calderón, S., Alvarez, A. C., Loboguerrero, A. M., Arango, S., Calvin, K., Kober, T., Daenzer, K., & Fisher-Vanden, K. (2016). Achieving CO₂ reductions in Colombia: Effects of carbon taxes and abatement targets. *Energy Economics*, 56, 575–586.
- Campozano, L., Ballari, D., Montenegro, M., & Avilés, A. (2020). Future Meteorological Droughts in Ecuador: Decreasing Trends and Associated Spatio-Temporal Features Derived From CMIP5 Models. *Frontiers in Earth Science*, 8.
- Capuzzi, S., & Timelli, G. (2018). Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review. *Metals*, 8(4), 249.
- Carlotto, V., Dueñas, A., Ingol-Blanco, E., & Santa-Cruz, S. (2022). A multi-criteria approach to the selection of geological storage of CO₂ sites in Peru. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 114, 103600.
- Carrillo-Larco, R. M., Guzman-Vilca, W. C., Leon-Velarde, F., Bernabe-Ortiz, A., Jimenez, M. M., Penny, M. E., Gianella, C., Leguía, M., Tsukayama, P., Hartinger, S. M., Lescano, A. G., Cuba-Fuentes, M. S., Cutipé, Y., Diez-Canseco, F., Mendoza, W., Ugarte-Gil, C., Valdivia-Gago, A., Zavaleta-Cortijo, C., & Miranda, J. J. (2022). Peru – Progress in health and sciences in 200 years of independence. *The Lancet Regional Health - Americas*, 7, 100148.
- Carruth, M. A., Allwood, J. M., & Moynihan, M. C. (2011). The technical potential for reducing metal requirements through lightweight product design. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 48–60.
- Carus, M., Dammer, L., Raschka, A., & Skoczinski, P. (2020). Renewable carbon: Key to a sustainable and future-oriented chemical and plastic industry: Definition, strategy, measures and potential. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 10(3), 488–505.
- Carvajal, P. E., & Li, F. G. N. (2019). Challenges for hydropower-based nationally determined contributions: a case study for Ecuador. *Climate Policy*, 19(8), 974–987.
- Carvajal, P. E., Li, F. G. N., Soria, R., Cronin, J., Anandarajah, G., & Mulugetta, Y. (2019). Large hydropower, decarbonisation and climate change uncertainty: Modelling power sector pathways for Ecuador. *Energy Strategy Reviews*, 23, 86–99.
- Castiblanco, C., Moreno, A., & Etter, A. (2015). Impact of policies and subsidies in agribusiness: The case of oil palm and biofuels in Colombia. *Energy Economics*, 49, 676–686.

- CCI. (2021). Canada's Net Zero Future: Finding Our Way in the Global Transition.
- CEIL. (2019). Plastic & Climate: The Hidden Costs of a Plastic Planet.
- Cesaro, Z., Ives, M., Nayak-Luke, R., Mason, M., & Bañares-Alcántara, R. (2021). Ammonia to power: Forecasting the levelized cost of electricity from green ammonia in large-scale power plants. *Applied Energy*, 282, 116009.
- Chalmers, D. W. (1988). The properties and uses of marine structural materials. *Marine Structures*, 1(1), 47–70.
- Chatterjee, S., & Huang, K.-W. (2020). Unrealistic energy and materials requirement for direct air capture in deep mitigation pathways. *Nature Communications*, 11(1), 3287.
- Chavez-Rodriguez, M. F., Carvajal, P. E., Martinez Jaramillo, J. E., Egúez, A., Mahecha, R. E. G., Schaeffer, R., Szklo, A., Lucena, A. F. P., & Arango Aramburo, S. (2018). Fuel saving strategies in the Andes: Long-term impacts for Peru, Colombia and Ecuador. *Energy Strategy Reviews*, 20, 35–48.
- Chehade, G., & Dincer, I. (2021). Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel. *Fuel*, 299, 120845.
- Chen, F., Ji, X., Chu, J., Xu, P., & Wang, L. (2021). A review: life cycle assessment of cotton textiles. *Industria Textila*, 72(01), 19–29.
- Chen, L., Caro, F., Corbett, C. J., & Ding, X. (2019). Estimating the environmental and economic impacts of widespread adoption of potential technology solutions to reduce water use and pollution: Application to China's textile industry. *Environmental Impact Assessment Review*, 79, 106293.
- Chevallier, P., Pouyaud, B., Suarez, W., & Condom, T. (2011). Climate change threats to environment in the tropical Andes: glaciers and water resources. *Regional Environmental Change*, 11(S1), 179–187.
- Chimborazo, O., & Vuille, M. (2021). Present-day climate and projected future temperature and precipitation changes in Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(3–4), 1581–1597.
- Chowkwanyun, M. (2019). Two Cheers for Air Pollution Control: Triumphs and Limits of the Mid-Century Fight for Air Quality. *Public Health Reports*, 134(3), 307–312.
- Ciez, R. E., & Whitacre, J. F. (2019). Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability*, 2(2), 148–156.
- Clean Energy Ministerial. (2021). Industrial Deep Decarbonisation: An Initiative of the Clean Energy Ministerial.
- Coca-Cola Company. (2015). Great Things Come in Innovative Packaging: An Introduction to PlantBottle Packaging.
- Cole, S., & Itani, S. (2013). The Alberta Carbon Trunk Line and the Benefits of CO₂. *Energy Procedia*, 37, 6133–6139.
- Coll, M., Libralato, S., Tudela, S., Palomera, I., & Pranovi, F. (2008). Ecosystem Overfishing in the Ocean. *PLoS ONE*, 3(12), e3881.
- Colmenares-Quintero, R. F., Rico-Cruz, C. J., Stansfield, K. E., & Colmenares-Quintero, J. C. (2020). Assessment of biofuels production in Colombia. *Cogent Engineering*, 7(1), 1740041.
- Congreso de la República. (2018). Ley N° 30884.- Ley que regula el plástico de un solo uso y los recipientes o envases descartables (In English: "Law No. 30884.- Law that regulates single-use plastic and disposable containers or containers").
- Congreso de la República de Colombia. (2017). Ley No. 1844 14 Jul 2017, "Por medio de la cual se aprueba el <<Acuerdo de París>>, adoptado el 12 de Diciembre de 2015, en París Francia".
- Congreso de la República de Colombia. (2019). Ley 1973 de 2019: Por medio de la cual se regula y prohíbe el ingreso, comercialización y uso de bolsas y otros materiales plásticos en el departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina e Islas menores que lo componen.
- Cordoba, C. (2018). Luxury Fashion and Peace Restoration for Artisans in Colombia. In C. K. Y. Lo & J. Ha-Brookshire (Eds.), *Sustainability in Luxury Fashion Business* (pp. 173–192). Springer.
- Costa-Pierce, B. A., & Chopin, T. (2021). The Hype, Fantasies and Realities of Aquaculture Development Globally and In Its New Geographies. *World Aquaculture*, 52(2), 23–35.

- Costello, C. (2019). The concept of Zero Waste. In *Saving Food* (pp. 369–391). Elsevier.
- Costello, C., Cao, L., Gelcich, S., Cisneros-Mata, M. Á., Free, C. M., Froehlich, H. E., Golden, C. D., Ishimura, G., Maier, J., Macadam-Somer, I., Mangin, T., Melnychuk, M. C., Miyahara, M., de Moor, C. L., Naylor, R., Nøstbakken, L., Ojea, E., O'Reilly, E., Parma, A. M., ... Lubchenco, J. (2020). The future of food from the sea. *Nature*, 588(7836), 95–100.
- Costello, C., Ovando, D., Clavelle, T., Strauss, C. K., Hilborn, R., Melnychuk, M. C., Branch, T. A., Gaines, S. D., Szuwalski, C. S., Cabral, R. B., Rader, D. N., & Leland, A. (2016). Global fishery prospects under contrasting management regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(18), 5125–5129.
- Crabtree, G. (2019). The coming electric vehicle transformation. *Science*, 366(6464), 422–424.
- Cui, K. (2020). Why crude-to-chemicals is the obvious way forward.
- Cullinane, K., & Yang, J. (2022). Evaluating the Costs of Decarbonizing the Shipping Industry: A Review of the Literature. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 946.
- Czerwinski, F. (2021). Current Trends in Automotive Lightweighting Strategies and Materials. *Materials*, 14(21), 6631.
- D'Adamo, I., Gastaldi, M., & Rosa, P. (2020). Recycling of end-of-life vehicles: Assessing trends and performances in Europe. *Technological Forecasting and Social Change*, 152, 119887.
- Daehn, K., Basuhi, R., Gregory, J., Berlinger, M., Somjit, V., & Olivetti, E. A. (2022). Innovations to decarbonize materials industries. *Nature Reviews Materials*, 7(4), 275–294.
- Daehn, K. E., Cabrera Serrenho, A., & Allwood, J. M. (2017). How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? *Environmental Science & Technology*, 51(11), 6599–6606.
- De-La-Torre-Jave, E., Alvarez-Risco, A., & Del-Aguila-Arcentales, S. (2022). Circular Economy and Recycling in Peru. In *Towards a Circular Economy* (pp. 281–295). Springer.
- de Carvalho Nunes, R., & de Medeiros Costa, H. K. (2021). Carbon capture and storage technologies and efforts on climate change in Latin American and Caribbean countries. In *Carbon Capture and Storage in International Energy Policy and Law* (pp. 75–106). Elsevier.
- Degen, F., & Schütte, M. (2022). Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129798.
- Delgado, R., Wild, T. B., Arguello, R., Clarke, L., & Romero, G. (2020). Options for Colombia's mid-century deep decarbonization strategy. *Energy Strategy Reviews*, 32, 100525.
- DNP. (2018). El 71% de hogares colombianos redujo el consumo de bolsas plásticas (In English, "71% of Colombian households reduced the consumption of plastic bags").
- DNP. (2023). Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia, Potencia Mundial de la Vida (In English, "National Development Plan 2022-2026: Colombia, World Power of Life)."
- Domina, T., & Koch, K. (1997). The Textile Waste Lifecycle. *Clothing and Textiles Research Journal*, 15(2), 96–102.
- Domínguez, S., Cifuentes, B., Bustamante, F., Cantillo, N. M., Barraza-Botet, C. L., & Cobo, M. (2022). On the Potential of Blue Hydrogen Production in Colombia: A Fossil Resource-Based Assessment for Low-Emission Hydrogen. *Sustainability*, 14(18), 11436.
- Dotor Robayo, A. L. (2020). Thinking Textile Materials from Their Nature: Ethical Materials for Fashion Design with Technological, Social, and Aesthetic Sense. In S. S. Muthu & M. A. Gardetti (Eds.), *Sustainability in the Textile and Apparel Industries: Sourcing Synthetic and Novel Alternative Raw Materials* (pp. 21–43). Springer International Publishing.
- Drake, D. F. (2018). Carbon Tariffs: Effects in Settings with Technology Choice and Foreign Production Cost Advantage. *Manufacturing & Service Operations Management*, 20(4), 667–686.
- Duarte, A., Angarita, J. D., Espinosa-Cárdenas, J. P., Lizcano, J., García-Saravia, R. C., & Uribe-Rodríguez, A. (2022). Multiperiod optimization model for CO₂ capture, utilization and storage, Colombian case study. In *Computer Aided Chemical Engineering* (pp. 997–1002). Elsevier.

- Ducker. (2020). 2020 North American Light Vehicle Aluminum Content and Outlook. *Energy*, 182, 520–534.
- Edwards, P., Zhang, W., Belton, B., & Little, D. C. (2019). Misunderstandings, myths and mantras in aquaculture: Its contribution to world food supplies has been systematically over reported. *Marine Policy*, 106, 103547.
- EEAS. (2021). Ecuador goes circular: discover the strategy behind.
- Eguiguren-Velepucha, P. A., Chamba, J. A. M., Aguirre Mendoza, N. A., Ojeda-Luna, T. L., Samaniego-Rojas, N. S., Furniss, M. J., Howe, C., & Aguirre Mendoza, Z. H. (2016). Tropical ecosystems vulnerability to climate change in southern Ecuador. *Tropical Conservation Science*, 9(4), 194008291666800.
- EIA. (2021). International Energy Outlook 2021.
- EIA. (2022). Country Analysis Executive Summary: Colombia.
- EIT Climate-KIC. (2021). Innovating the plastics value chain.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017a). A New Textiles Economy: Redesigning fashion's future.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017b). The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics & Catalysing Action.
- Ellingsen, L. A.-W., Hung, C. R., & Strømman, A. H. (2017). Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 82–90.
- Erans, M., Sanz-Pérez, E. S., Hanak, D. P., Clulow, Z., Reiner, D. M., & Mutch, G. A. (2022). Direct air capture: process technology, techno-economic and socio-political challenges. *Energy & Environmental Science*, 15(4), 1360–1405.
- Espinoza, V. S., Fontalvo, J., Martí-Herrero, J., Ramírez, P., & Capellán-Pérez, I. (2019). Future oil extraction in Ecuador using a Hubbert approach. *Energy*, 182, 520–534.
- European Bioplastics. (2021). Bioplastics Market Development Update 2021.
- European Commission. (2018). A European Strategy for Plastics in a Circular Economy.
- European Commission. (2019). The European Green Deal.
- European Commission. (2021a). Joint EU-US Statement on a Global Arrangement on Sustainable Steel and Aluminium.
- European Commission. (2021b). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a carbon border adjustment mechanism: COM/2021/564 final.
- Executive Office of the President of the United States. (2021). Fact Sheet: The United States and European Union To Negotiate World's First Carbon-Based Sectoral Arrangement on Steel and Aluminum Trade.
- Fan, J., & Njuguna, J. (2016). An introduction to lightweight composite materials and their use in transport structures. In *Lightweight Composite Structures in Transport* (pp. 3–34). Elsevier.
- FAO. (2022). The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA) 2022: Towards Blue Transformation.
- Faria, J. A. (2021). Renaissance of ammonia synthesis for sustainable production of energy and fertilizers. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 29, 100466.
- Farmery, A. K., Allison, E. H., Andrew, N. L., Troell, M., Voyer, M., Campbell, B., Eriksson, H., Fabinyi, M., Song, A. M., & Steenbergen, D. (2021). Blind spots in visions of a “blue economy” could undermine the ocean's contribution to eliminating hunger and malnutrition. *One Earth*, 4(1), 28–38.
- Farrauto, R. J., Deebe, M., & Alerasool, S. (2019). Gasoline automobile catalysis and its historical journey to cleaner air. *Nature Catalysis*, 2(7), 603–613.
- Fay, M., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Rozenberg, J., Narloch, U., & Kerr, T. (2015). Planning Ahead with an Eye on the End Goal. In *Decarbonizing Development:*

- Three Steps to a Zero-Carbon Future (pp. 55–76). The World Bank.
- Fazekas, A., Bataille, C., & Vogt-Schilb, A. (2022). Achieving Net-Zero Prosperity: How Governments Can Unlock 15 Essential Transformations.
- Fishedick, M., Marzinkowski, J., Winzer, P., & Weigel, M. (2014). Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. *Journal of Cleaner Production*, 84, 563–580.
- Flammini, A., Pan, X., Tubiello, F. N., Qiu, S. Y., Rocha Souza, L., Quadrelli, R., Bracco, S., Benoit, P., & Sims, R. (2022). Emissions of greenhouse gases from energy use in agriculture, forestry and fisheries: 1970–2019. *Earth System Science Data*, 14(2), 811–821.
- Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J. A., Dempster, T., Eguiraun, H., Watson, W., Stahl, A., Sunde, L. M., Schellewald, C., Skøien, K. R., Alver, M. O., & Berckmans, D. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering*, 173, 176–193.
- Franklin Associates. (2011). Life Cycle Inventory of Plastic Fabrication Processes: Injection Molding and Thermoforming.
- Fujita, T., Chen, H., Wang, K., He, C., Wang, Y., Doddiba, G., & Wei, Y. (2021). Reduction, reuse and recycle of spent Li-ion batteries for automobiles: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28(2), 179–192.
- Fun-sang Cepeda, M. A., Pereira, N. N., Kahn, S., & Caprace, J.-D. (2019). A review of the use of LNG versus HFO in maritime industry. *Marine Systems & Ocean Technology*, 14(2–3), 75–84.
- Furszyfer Del Rio, D. D., Sovacool, B. K., Foley, A. M., Griffiths, S., Bazilian, M., Kim, J., & Rooney, D. (2022). Decarbonizing the glass industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111885.
- Gaines, L. (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 1–2, 2–7.
- Galvís-Villamizar, D. N., Duque-Suárez, O. M., & Gómez-Camperos, J. A. (2022). Photovoltaic solar energy in Colombia. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
- Gandini, A. (2008). Polymers from Renewable Resources: A Challenge for the Future of Macromolecular Materials. *Macromolecules*, 41(24), 9491–9504.
- Garavelli, L., Freeman, M. C., Tugade, L. G., Greene, D., & McNally, J. (2022). A feasibility assessment for co-locating and powering offshore aquaculture with wave energy in the United States. *Ocean & Coastal Management*, 225, 106242.
- Gentry, R. R., Lester, S. E., Kappel, C. V., White, C., Bell, T. W., Stevens, J., & Gaines, S. D. (2017). Offshore aquaculture: Spatial planning principles for sustainable development. *Ecology and Evolution*, 7(2), 733–743.
- Gephart, J. A., Henriksson, P. J. G., Parker, R. W. R., Shepon, A., Gorospe, K. D., Bergman, K., Eshel, G., Golden, C. D., Halpern, B. S., Hornborg, S., Jonell, M., Metian, M., Mifflin, K., Newton, R., Tyedmers, P., Zhang, W., Ziegler, F., & Troell, M. (2021). Environmental performance of blue foods. *Nature*, 597(7876), 360–365.
- Gephart, J. A., Rovenskaya, E., Dieckmann, U., Pace, M. L., & Brännström, Å. (2016). Vulnerability to shocks in the global seafood trade network. *Environmental Research Letters*, 11(3), 035008.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7).
- Ghaly, A., Ramakrishnan, V., Brooks, M., Budge, S., & Dave, D. (2013). Fish Processing Wastes as a Potential Source of Proteins, Amino Acids and Oils: A Critical Review. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 05(04).
- Giampieri, A., Ling-Chin, J., Ma, Z., Smallbone, A., & Roskilly, A. P. (2020). A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Applied Energy*, 261, 114074.
- Gielen, D., Saygin, D., Taibi, E., & Birat, J. (2020). Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study. *Journal of Industrial Ecology*, 24(5), 1113–1125.
- Gobierno de Colombia. (2021). Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París (In English: “Long term climate strategy for Colombia E2050 to comply with the Paris Agreement”).

- Gobierno del Perú. (2019). Decreto Supremo N.º 012-2019-PRODUCE: Decreto Supremo Que Aprueba El Reglamento de Gestión Ambiental de los Susectores Pesca y Acuicultura.
- Gobierno del Perú. (2020a). Contribuciones Determinadas A Nivel Nacional Del Perú: Reporte De Actualización Periodo 2021 - 2030 (In English: National Determined Contribution of Peru: Update for Reporting Period 2021-2030).
- Gobierno del Perú. (2020b). Decreto Supremo n.º 003-2020-Produce, Decreto Supremo que aprueba la Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en el Sector Industria (In English: "Supreme Decree No. 003-2020-Produce, Supreme Decree approving the Roadmap towards a Circular Economy in the.
- Goldemberg, J. (2008). The Brazilian biofuels industry. *Biotechnology for Biofuels*, 1(1), 6.
- Gomilšek, R., Čuček, L., Homšak, M., Tan, R. R., & Kravanja, Z. (2020). Carbon Emissions Constrained Energy Planning for Aluminum Products. *Energies*, 13(11), 2753.
- Gonzalez, F. R., Raval, S., Taplin, R., Timms, W., & Hitch, M. (2019). Evaluation of Impact of Potential Extreme Rainfall Events on Mining in Peru. *Natural Resources Research*, 28(2), 393-408.
- Gray, N., McDonagh, S., O'Shea, R., Smyth, B., & Murphy, J. D. (2021). Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. *Advances in Applied Energy*, 1, 100008.
- Greco, S., & De Cock, B. (2021). Argumentative misalignments in the controversy surrounding fashion sustainability. *Journal of Pragmatics*, 174, 55-67.
- Greenpeace. (2019). *Crashing the Climate: How the Car Industry is Driving the Climate Crisis*.
- Greer, K., Zeller, D., Woroniak, J., Coulter, A., Winchester, M., Palomares, M. L. D., & Pauly, D. (2019). Global trends in carbon dioxide (CO₂) emissions from fuel combustion in marine fisheries from 1950 to 2016. *Marine Policy*, 107, 103382.
- Gregorich, E., Janzen, H. H., Helgason, B., & Ellert, B. (2015). Nitrogenous Gas Emissions from Soils and Greenhouse Gas Effects. In *Advances in Agronomy* (pp. 39-74).
- Griffin, P. W., Hammond, G. P., & McKenna, R. C. (2021). Industrial energy use and decarbonisation in the glass sector: A UK perspective. *Advances in Applied Energy*, 3, 100037.
- Griffin, P. W., Hammond, G. P., & Norman, J. B. (2018). Industrial energy use and carbon emissions reduction in the chemicals sector: A UK perspective. *Applied Energy*, 227, 587-602.
- H2 Perú. (2022). Perú tendrá su primer proyecto de H2 verde en el sur (In English: "Peru will have its first green H2 project in the south").
- Hadžić, N., Kozmar, H., & Tomić, M. (2018). Feasibility of Investment in Renewable Energy Systems for Shipyards. *Brodogradnja*, 69(2), 1-16.
- Hall, G. M. (2010a). Canning Fish and Fish Products. In G. M. Hall (Ed.), *Fish Processing: Sustainability and New Opportunities* (pp. 30-50). Wiley.
- Hall, G. M. (2010b). Freezing and Chilling of Fish and Fish Products. In G. M. Hall (Ed.), *Fish Processing: Sustainability and New Opportunities* (pp. 77-97). Wiley.
- Hallegatte, S., Fay, M., & Vogt-Schilb, A. (2013). *Green Industrial Policies: When and How: World Bank Policy Research Working Paper 6677*.
- Hanna, R., Abdulla, A., Xu, Y., & Victor, D. G. (2021). Emergency deployment of direct air capture as a response to the climate crisis. *Nature Communications*, 12(1), 368.
- Harari Arjona, R., Piñeiros, J., Ayabaca, M., & Harari Freire, F. (2016). Climate change and agricultural workers' health in Ecuador: occupational exposure to UV radiation and hot environments. *Annali Dell'Istituto Superiore Di Sanità*, 52(3), 368-373.
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75-86.

- Harwatt, H., Ripple, W. J., Chaudhary, A., Betts, M. G., & Hayek, M. N. (2020). Scientists call for renewed Paris pledges to transform agriculture. *The Lancet Planetary Health*, 4(1), e9–e10.
- Hasanbeigi, A., & Price, L. (2015). A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. *Journal of Cleaner Production*, 95, 30–44.
- Hatti-Kaul, R., Nilsson, L. J., Zhang, B., Rehnberg, N., & Lundmark, S. (2020). Designing Biobased Recyclable Polymers for Plastics. *Trends in Biotechnology*, 38(1), 50–67.
- He, X., Su, D., Cai, W., Pehlken, A., Zhang, G., Wang, A., & Xiao, J. (2021). Influence of Material Selection and Product Design on Automotive Vehicle Recyclability. *Sustainability*, 13(6), 3407.
- Hedayati, M., Brock, P. M., Nachimuthu, G., & Schwenke, G. (2019). Farm-level strategies to reduce the life cycle greenhouse gas emissions of cotton production: An Australian perspective. *Journal of Cleaner Production*, 212, 974–985.
- Helgason, R., Cook, D., & Davíðsdóttir, B. (2020). An evaluation of the cost-competitiveness of maritime fuels – a comparison of heavy fuel oil and methanol (renewable and natural gas) in Iceland. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 236–248.
- Helms, H., Jöhrens, J., Kämper, C., Giegrich, J., Liebich, A., Vogt, R., & Lambrecht, U. (2016). Further development and in-depth analysis of the environmental balance of electric vehicles (In German: "Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen").
- Henao, F., Viteri, J. P., Rodríguez, Y., Gómez, J., & Dyner, I. (2020). Annual and interannual complementarities of renewable energy sources in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110318.
- Henninger, C. E., Alevizou, P. J., & Oates, C. J. (2016). What is sustainable fashion? *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*, 20(4), 400–416.
- Herbozo, J. E., Muñoz, L. E., Guerra, M. J., Minaya, V., Haro, P., Carrillo, V., Manciat, C., & Campozaño, L. (2022). Non-Stationary Hydrological Regimes Due to Climate Change: The Impact of Future Precipitation in the Spillway Design of a Reservoir, Case Study: Sube y Baja Dam, in Ecuador. *Atmosphere*, 13(5), 828.
- Hinicio, IDB, & OTAM. (2021). National Electromobility Strategy for Ecuador (In Spanish: "Estrategia Nacional de Electromovilidad para Ecuador, ENEM).
- HM Government. (2021). Net Zero Strategy: Build Back Greener.
- Horner, W. F. A. (1997). Preservation of fish by curing (drying, salting and smoking). In G. M. Hall (Ed.), *Fish Processing Technology* (pp. 32–73). Springer US.
- Horvath, S., Fasihi, M., & Breyer, C. (2018). Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040. *Energy Conversion and Management*, 164, 230–241.
- Hua, K., Cobcroft, J. M., Cole, A., Condon, K., Jerry, D. R., Mangott, A., Praeger, C., Vucko, M. J., Zeng, C., Zenger, K., & Strugnell, J. M. (2019). The Future of Aquatic Protein: Implications for Protein Sources in Aquaculture Diets. *One Earth*, 1(3), 316–329.
- Huggel, C., Carey, M., Emmer, A., Frey, H., Walker-Crawford, N., & Wallimann-Helmer, I. (2020). Anthropogenic climate change and glacier lake outburst flood risk: local and global drivers and responsibilities for the case of lake Palcacocha, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2175–2193.
- Hurmelinna-Laukkanen, P., Paukku, E., & Taskila, S. (2021). Innovation Management Responses to Regulation - SUP-Directive and Replacing Plastic. *International Journal of Innovation Management*, 25(10).
- IDB. (2021). Descarbonización a través del hidrógeno: Vías para la Recuperación Verde (In English: "Decarbonization through Hydrogen: Pathways for Green Recovery").
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLETERÍA. (2021). Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC).
- IEA. (2018). The future of petrochemicals. OECD.
- IEA. (2019). The Future of Rail: Opportunities for Energy and Environment.

- IEA. (2020a). Global car sales by key markets, 2005-2020.
- IEA. (2020b). Iron and Steel Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking.
- IEA. (2021a). Aluminium: Tracking report — November 2021.
- IEA. (2021b). Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertiliser production.
- IEA. (2021c). Aviation Tracking Report - November 2021.
- IEA. (2021d). Global EV Outlook 2021: Accelerating Ambitions Despite the Pandemic.
- IEA. (2021e). International Shipping Tracking Report - November 2021.
- IEA. (2021f). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector.
- IEA. (2021g). Tracking Transport 2021.
- Igogo, T., Awuah-Offei, K., Newman, A., Lowder, T., & Engel-Cox, J. (2021). Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches. *Applied Energy*, 300, 117375.
- Inal, O. B., Zincir, B., & Deniz, C. (2022). Investigation on the decarbonization of shipping: An approach to hydrogen and ammonia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(45), 19888–19900.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- IPIAP. (2018). *Plásticos en el mar... NO MÁS!* (In English: "Plastics in the Sea... NO MORE!").
- IRENA. (2014). *Peru: Renewables Readiness Assessment 2014*.
- Itochu. (2022). ITOCHU Announces Project to Manufacture and Sell Blue Ammonia and Blue Methanol in Canada, Aiming to Realize a Decarbonized Society.
- Iturralde-Pólit, P., Dangles, O., Burneo, S. F., & Meynard, C. N. (2017). The effects of climate change on a mega-diverse country: predicted shifts in mammalian species richness and turnover in continental Ecuador. *Biotropica*, 49(6), 821–831.
- Ivleva, D., Månberger, A., & Kirr, J. (2022). A Game Changing? The Geopolitics of Decarbonisation through the Lens of Trade.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771.
- Jarpa, S. G., & Halog, A. (2021). Pursuing a Circular and Sustainable Textile Industry in Latin America. In M. Á. Gardetti & R. P. Larios-Francia (Eds.), *Sustainable Fashion and Textiles in Latin America* (pp. 105–130). Springer.
- Jebsen, S. H. N. (2021). Scenarios for the Decarbonization of Energy Supply for Salmon Aquaculture in Norway [Norwegian University for Science and Technology (NTNU: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet)].
- Jeong, B., Jeon, H., Kim, S., Kim, J., & Zhou, P. (2020). Evaluation of the Lifecycle Environmental Benefits of Full Battery Powered Ships: Comparative Analysis of Marine Diesel and Electricity. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8), 580.
- Jimenez, V. J., Kim, H., & Munim, Z. H. (2022). A review of ship energy efficiency research and directions towards emission reduction in the maritime industry. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132888.
- Jing, L., El-Houjeiri, H. M., Monfort, J.-C., Brandt, A. R., Masnadi, M. S., Gordon, D., & Bergerson, J. A. (2020). Carbon intensity of global crude oil refining and mitigation potential. *Nature Climate Change*, 10(6), 526–532.
- Jones, A. R., Alleway, H. K., McAfee, D., Reis-Santos, P., Theuerkauf, S. J., & Jones, R. C. (2022). Climate-Friendly Seafood: The Potential for Emissions Reduction and Carbon Capture in Marine Aquaculture. *BioScience*, 72(2), 123–143.
- Juanga-Labayen, J. P., Labayen, I. V., & Yuan, Q. (2022). A Review on Textile Recycling Practices and Challenges. *Textiles*, 2(1), 174–188.

- Jung, J., Kim, S. J., & Kim, K. H. (2020). Sustainable marketing activities of traditional fashion market and brand loyalty. *Journal of Business Research*, 120, 294–301.
- Kaack, L. H., Vaishnav, P., Morgan, M. G., Azevedo, I. L., & Rai, S. (2018). Decarbonizing intraregional freight systems with a focus on modal shift. *Environmental Research Letters*, 13(8), 083001.
- Kacar, I., Durgun, I., Ozturk, F., & Simmons, R. J. (2018). A review of light duty passenger car weight reduction impact on CO₂ emission. *International Journal of Global Warming*, 15(3), 333.
- Kapustin, N. O., & Grushevenko, D. A. (2020). Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid. *Energy Policy*, 137, 111103.
- Karvounis, P., Dantas, J. L. D., Tsoumpris, C., & Theotokatos, G. (2022). Ship Power Plant Decarbonisation Using Hybrid Systems and Ammonia Fuel—A Techno-Economic–Environmental Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1675.
- Kawamoto, R., Mochizuki, H., Moriguchi, Y., Nakano, T., Motohashi, M., Sakai, Y., & Inaba, A. (2019). Estimation of CO₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA. *Sustainability*, 11(9), 2690.
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Woerden, F. Van. (2018). *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank, Washington D.C., USA.
- Kelly, S., & Apelian, D. (2016). Automotive aluminum recycling at end of life: a grave-to-gate analysis.
- Kesieme, U., Pazouki, K., Murphy, A., & Chrysanthou, A. (2019). Attributional life cycle assessment of biofuels for shipping: Addressing alternative geographical locations and cultivation systems. *Journal of Environmental Management*, 235, 96–104.
- Khan, A., Tan, D. K. Y., Munsif, F., Afridi, M. Z., Shah, F., Wei, F., Fahad, S., & Zhou, R. (2017). Nitrogen nutrition in cotton and control strategies for greenhouse gas emissions: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(30), 23471–23487.
- Khodier, A., Williams, K., & Dallison, N. (2018). Challenges around automotive shredder residue production and disposal. *Waste Management*, 73, 566–573.
- Korberg, A. D., Brynolf, S., Grahn, M., & Skov, I. R. (2021). Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110861.
- Kose, S. (2010). On-board Fish Processing. In G. M. Hall (Ed.), *Fish Processing: Sustainability and New Opportunities* (pp. 167–206). Wiley.
- Lagouvardou, S., Psaraftis, H. N., & Zis, T. (2020). A Literature Survey on Market-Based Measures for the Decarbonization of Shipping. *Sustainability*, 12(10), 3953.
- Lange, J.-P. (2021). Towards circular carbo-chemicals – the metamorphosis of petrochemicals. *Energy & Environmental Science*, 14(8), 4358–4376.
- Lau, W. W. Y., Shiran, Y., Bailey, R. M., Cook, E., Stuchtey, M. R., Koskella, J., Velis, C. A., Godfrey, L., Boucher, J., Murphy, M. B., Thompson, R. C., Jankowska, E., Castillo Castillo, A., Pilditch, T. D., Dixon, B., Koerselman, L., Kosior, E., Favoino, E., Gutberlet, J., ... Palardy, J. E. (2020). Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, 369(6510), 1455–1461.
- Lavanda Reyes, F. A. (2021). Influence of the plastic law on the consumption of Biodegradable containers in the Peruvian Population [Educación Influencia de la ley de plásticos en el consumo de envases biodegradables en la población peruana]. *Journal of Energy & Environmental Sciences*, 5(1), 10.
- Le Van Mao, R., Yan, H., Muntasar, A., & Al-Yassir, N. (2013). Blending of Non-Petroleum Compounds with Current Hydrocarbon Feeds to Use in the Thermo-Catalytic Steam-Cracking Process for the Selective Production of Light Olefins. In *New and Future Developments in Catalysis* (pp. 143–173). Elsevier.
- Lechtenböhmer, S., Nilsson, L. J., Åhman, M., & Schneider, C. (2016). Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. *Energy*, 115, 1623–1631.

- Lefebvre, D., Williams, A. G., Kirk, G. J. D., Paul, Burgess, J., Meersmans, J., Silman, M. R., Román-Dañobeytia, F., Farfan, J., & Smith, P. (2021). Assessing the carbon capture potential of a reforestation project. *Scientific Reports*, 11(1), 19907.
- Leung, L., & Jenkins, G. P. (2014). An economic evaluation of Peru's liquefied natural gas export policy. *Energy Policy*, 74, 643–654.
- Lim, J., Fernández, C. A., Lee, S. W., & Hatzell, M. C. (2021). Ammonia and Nitric Acid Demands for Fertilizer Use in 2050. *ACS Energy Letters*, 6(10), 3676–3685.
- Lindstad, E., Stokke, T., Alteskjær, A., Borgen, H., & Sandaas, I. (2022). Ship of the future – A slender dry-bulker with wind assisted propulsion. *Maritime Transport Research*, 3, 100055.
- Link, J. S., & Watson, R. A. (2019). Global ecosystem overfishing: Clear delineation within real limits to production. *Science Advances*, 5(6).
- MAATE. (2018). Ecuador y ONU Medio Ambiente lanzan un llamado para terminar con la contaminación por plásticos (In English: "Ecuador and UNEP launch a call to end plastic pollution").
- Macías Barberán, J. R., Cuenca Nevárez, G. J., Intriago Flor, F. G., Caetano, C. M., Menjivar Flores, J. C., & Pacheco Gil, H. A. (2019). Vulnerability to climate change of smallholder cocoa producers in the province of Manabí, Ecuador. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(1), 8707–8716.
- MacLeod, M., Eory, V., Gruère, G., & Lankoski, J. (2015). Cost-Effectiveness of Greenhouse Gas Mitigation Measures for Agriculture: A Literature Review.
- MacLeod, M. J., Hasan, M. R., Robb, D. H. F., & Mamun-Ur-Rashid, M. (2020). Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. *Scientific Reports*, 10(1), 11679.
- Madin, E. M. P., & Macreadie, P. I. (2015). Incorporating carbon footprints into seafood sustainability certification and eco-labels. *Marine Policy*, 57, 178–181.
- Mah, A. (2021). Future-Proofing Capitalism: The Paradox of the Circular Economy for Plastics. *Global Environmental Politics*, 21(2), 121–142.
- Mäkitie, T., Steen, M., Saether, E. A., Bjørgum, Ø., & Poulsen, R. T. (2022). Norwegian ship-owners' adoption of alternative fuels. *Energy Policy*, 163, 112869.
- Mallouppas, G., & Yfantis, E. A. (2021). Decarbonization in Shipping Industry: A Review of Research, Technology Development, and Innovation Proposals. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 415.
- Mandal, N. R. (2017). *Ship Construction and Welding* (Vol. 2). Springer Singapore.
- Manickam, P., & Duraisamy, G. (2019). 3Rs and circular economy. In *Circular Economy in Textiles and Apparel* (pp. 77–93). Elsevier.
- Manshoven, S., Christis, M., Vercauteren, A., Arnold, M., Nicolau, M., Lafond, E., Fogh Mortensen, L., & Coscieme, L. (2019). Textiles and the environment in a circular economy (Eionet Report - ETC/WMGE 2019/6).
- Mariño-Martínez, J. E., & Moreno-Reyes, L. E. (2018). Posibilidades de captura y almacenamiento geológico de CO₂ (CCS) en Colombia – caso Tauramena (Casanare). *Boletín de Geología*, 40(1), 109–122.
- Mark, B. G., French, A., Baraer, M., Carey, M., Bury, J., Young, K. R., Polk, M. H., Wigmore, O., Lagos, P., Crumley, R., McKenzie, J. M., & Lautz, L. (2017). Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 159, 61–76.
- Martínez-Jaramillo, J. E., Arango-Aramburo, S., & Giraldo-Ramírez, D. P. (2019). The effects of biofuels on food security: A system dynamics approach for the Colombian case. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 34, 97–109.
- Maury-Ramírez, A., Illera-Perozo, D., & Mesa, J. A. (2022). Circular Economy in the Construction Sector: A Case Study of Santiago de Cali (Colombia). *Sustainability*, 14(3), 1923.
- Mayyas, A., Steward, D., & Mann, M. (2019). The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. *Sustainable Materials and Technologies*, 19, e00087.
- McAuley, J. W. (2003). Global Sustainability and Key Needs in Future Automotive Design. *Environmental Science & Technology*, 37(23), 5414–5416.

- McKinlay, C. J., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2021). Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 28282–28297.
- McKinsey & Company. (2022). *State of Fashion 2022: An uneven recovery and new frontiers*.
- McQueen, N., Gomes, K. V., McCormick, C., Blumanthal, K., Pisciotta, M., & Wilcox, J. (2021). A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future. *Progress in Energy*, 3(3), 032001.
- MEER. (2017). *National Energy Efficiency Plan 2016-2035* (In Spanish: "Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035, PLANEE").
- MEF. (2019). *Plan Nacional de Competitividad y Productividad (PNCP)* (In English: "National Competitiveness and Productivity Plan (PNCP)").
- MERNNR. (2020). *Electricity Master Plan 2019-2027* (In Spanish: "Plan Maestro de Electricidad (PME) 2019-2027").
- Merten, F., Nebel, A., Krüger, C., Schneider, C., Scholz, A., & Taubitz, A. (2020). Needs of electricity, hydrogen and carbon infrastructures for greenhouse gas neutral heavy industry clusters in the EU 2050. *European Council for an Energy Efficient Economy*.
- METI. (2021). *The 6th Strategic Energy Plan* (In Japanese: "第6次エネルギー基本計画").
- Meyer, T. (2020). *Decarbonizing road freight transportation – A bibliometric and network analysis*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 89, 102619.
- Meys, R., Frick, F., Westhues, S., Sternberg, A., Klankermayer, J., & Bardow, A. (2020). Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 162, 105010.
- Mielke, J., & Steudle, G. A. (2018). Green Investment and Coordination Failure: An Investors' Perspective. *Ecological Economics*, 150, 88–95.
- Milford, R. L., Allwood, J. M., & Cullen, J. M. (2011). Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO₂ abatement in the steel and aluminium sectors. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(12), 1185–1195.
- Milios, L., Beqiri, B., Whalen, K. A., & Jelonek, S. H. (2019). Sailing towards a circular economy: Conditions for increased reuse and remanufacturing in the Scandinavian maritime sector. *Journal of Cleaner Production*, 225, 227–235.
- MINAM. (2018). *Ley Marco sobre Cambio Climático* (In English: "Framework Law on Climate Change").
- MINAM. (2019a). *Impuesto al consumo de las bolsas de plástico será de S/ 0.20 durante el 2020* (In English: "Plastic bag use tax will be S/0.20 throughout 2020").
- MINAM. (2019b). *MINAM: Desde este viernes se prohíbe la fabricación de cañitas de plástico* (In English: "MINAM: Starting from this Friday the manufacturing of plastic straws will be prohibited").
- MINAM. (2021a). *Guía Para Implementar El Programa De Segregación En La Fuente Y Recolección Selectiva De Residuos Sólidos* (In English: "Guide for Implementation of the Program for Segregation at the Source and Selective Collection of Solid Waste").
- MINAM. (2021b). *Minam aprueba Guía para implementar el programa de segregación en la fuente y recolección selectiva de residuos sólidos* (In English: "Minam approves a guide for implementing the segregation-at-source and selective collection of solid waste program").
- MINCIT. (2023). *Política de Reindustrialización* (In English: "Reindustrialization Policy").
- MINEM. (2009). *Plan Referencial del Uso Eficiente de la Energía 2009-2018* (In English: "Reference Plan for the Efficient Use of Energy 2009-2018").
- MINEM. (2014). *Plan Energético Nacional 2014 - 2025* (In English: "National Energy Plan 2014 - 2025").
- MINEM. (2019). *Balance Nacional de Energía 2019* (In English: "National Energy Balance 2019").

- MINEM. (2020). Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER): Periodo 2021 - 2023 (In English: "National Rural Electrification Plan: 2021 - 2023 Period).
- MINEM. (2022). MINEM y H2 Perú firman convenio para impulsar el desarrollo del hidrógeno verde en nuestro país (In English "MINEM and H2 Peru sign an agreement to promote the development of green hydrogen in our country").
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Resolución 1407 de 2018 (In English, "Resolution 1407 of 2018").
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Se redujo en más de un 50% el uso de bolsas plásticas en los principales establecimientos comerciales del país (In English, "The use of plastic bags was reduced by more than 50% in the country's main commercial establishments").
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Plan Nacional Para la Gestión Sostenible de los Plásticos de Un Solo Uso (In English: "National Plan for Sustainable Management of Single Use Plastics).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Ministerio de Comercio, I. y T. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular (In English: "National Circular Economy Strategy).
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales – PROURE: Plan de acción 2010-2015.
- Ministerio de Minas y Energía. (2018a). Plan Integral de Gestión del Cambio Climático, Sector Minero Energético: Resumen Ejecutivo (In English: "Comprehensive Climate Change Management Plan, Energy and Mining Sector: Executive Summary").
- Ministerio de Minas y Energía. (2018b). Resolución 40807 de 2018: Por medio de la cual se adopta el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático para el Sector Minero Energético (PIGCC).
- Ministerio de Minas y Energía. (2021a). Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia (In English "Hydrogen Roadmap for Colombia").
- Ministerio de Minas y Energía. (2021b). Resolución 40350 de 2021: Por medio de la cual se modifica el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático para el Sector Minero Energético, adoptado a través de la Resolución número 40807 de 2018.
- Ministry of the Ecological Transition. (2020). National Low Carbon Strategy: An Ecological and Just Transition Towards Climate Neutrality (In French: "Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC): La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone").
- Miranda, C. D., Godoy, F. A., & Lee, M. R. (2018). Current Status of the Use of Antibiotics and the Antimicrobial Resistance in the Chilean Salmon Farms. *Frontiers in Microbiology*, 9.
- MISE. (2020). Integrated National Energy and Climate Plan (In Italian: "Piano Nazionale Integrato Per L'energia e il Clima (PNIEC)").
- Mission Possible Partnership. (2021). Net-Zero Steel Sector Transition Strategy.
- Mogollón Murcia, V., & Parra Hermida, G. (2020). Moda sostenible, una nueva tendencia de los millenials en Colombia.
- Molina, O., & Bernhofer, C. (2019). Assessment of Regional and Historical Climate Records for a Water Budget Approach in Eastern Colombia. *Water*, 12(1), 42.
- Molland, A. F. (2008). Ship design, construction and operation. In A. F. Molland (Ed.), *The Maritime Engineering Reference Book* (pp. 636–727). Elsevier.
- Montenegro, M., Campozano, L., Urdiales-Flores, D., Maisincho, L., Serrano-Vincenti, S., & Borbor-Cordova, M. J. (2022). Assessment of the Impact of Higher Temperatures Due to Climate Change on the Mortality Risk Indexes in Ecuador Until 2070. *Frontiers in Earth Science*, 9.
- Moon, K. K.-L., Youn, C., Chang, J. M. T., & Yeung, A. W. (2013). Product design scenarios for energy saving: A case study of fashion apparel. *International Journal of Production Economics*, 146(2), 392–401.
- Moreno, R., & Larrahondo, D. (2020). The First Auction of Non-Conventional Renewable Energy in Colombia: Results and Perspectives. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(1), 528–535.
- Moreno Rocha, C. M., Milanés Batista, C., Arguello Rodríguez, W. F., Fontalvo Ballesteros, A. J., & Núñez Álvarez, J. R. (2022). Challenges and perspectives of the use of photovoltaic solar energy in Colombia. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12(5), 4521.

- Moretti, C., Junginger, M., & Shen, L. (2020). Environmental life cycle assessment of polypropylene made from used cooking oil. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104750.
- Moshiul, A. M., Mohammad, R., Hira, F. A., & Maarop, N. (2022). Alternative Marine Fuel Research Advances and Future Trends: A Bibliometric Knowledge Mapping Approach. *Sustainability*, 14(9), 4947.
- Moutopoulos, D. K., & Koutsikopoulos, C. (2014). Fishing strange data in national fisheries statistics of Greece. *Marine Policy*, 48, 114–122.
- Mulvaney, D., Richards, R. M., Bazilian, M. D., Hensley, E., Clough, G., & Sridhar, S. (2021). Progress towards a circular economy in materials to decarbonize electricity and mobility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110604.
- Muñoz-Fernández, J. A., Beleño-Mendoza, W. A., & Díaz-Consuegra, H. (2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. *Revista Fuentes, El Reventón Energético*, 20(1), 57–72.
- Muslemani, H., Ascui, F., Xi, L., Kaesehage, K., & Wilson, J. (2022). Steeling the race: “Green steel” as the new clean material in the automotive sector (OIES Paper: ET No. 09).
- Muslemani, H., Liang, X., Kaesehage, K., Ascui, F., & Wilson, J. (2021). Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for ‘green steel’ products. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128127.
- Muthu, S. S. (2014). *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing* (S. S. Muthu (ed.)). Springer Singapore.
- Nakano, K., & Shibahara, N. (2017). Comparative assessment on greenhouse gas emissions of end-of-life vehicles recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 505–515.
- Nanda, S., Azargohar, R., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2015). An assessment on the sustainability of lignocellulosic biomass for biorefining. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 925–941.
- Narayan, R. (2012). *Biobased & Biodegradable Plastics: Rationale, Drivers, and Technology Exemplars. In Degradable Polymers and Materials: Principles and Practice* (2nd Edition) (pp. 13–31). American Chemical Society.
- National People’s Congress. (2021). *The 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People’s Republic of China and Outline of the Vision for 2035* (In Chinese: “中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要”).
- Nature. (2018). Aluminium producers promise a cleaner smelting pot. *Nature*, 557(7705), 280–280.
- Nature Climate Change. (2018). The price of fast fashion. *Nature Climate Change*, 8(1), 1–1.
- Nayak, R., & Padhye, R. (2015). Introduction. In *Garment Manufacturing Technology* (pp. 1–17). Elsevier.
- Nazir, H., Muthuswamy, N., Louis, C., Jose, S., Prakash, J., Buan, M. E. M., Flox, C., Chavan, S., Shi, X., Kauranen, P., Kallio, T., Maia, G., Tammeveski, K., Lymperopoulos, N., Carcadea, E., Veziroglu, E., Iranzo, A., & M. Kannan, A. (2020). Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part III: H2 usage technologies, applications, and challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(53), 28217–28239.
- Negri, A., & Ligthart, T. (2021). *Decarbonisation Options for the Dutch Polyolefins Industry*.
- Nevermann, H., Gomez, J. N. B., Fröhle, P., & Shorki, N. (2022). Land Loss Implications of Sea Level Rise Along the Coastline of Colombia Under Different Climate Change Scenarios. *SSRN Electronic Journal*.
- Nicholas, K., Campbell, L., Paul, E., Skeltis, G., Wang, W., & Gray, C. (2021). Climate anomalies and childhood growth in Peru. *Population and Environment*, 43(1), 39–60.
- Nicoletti, L., Romano, A., König, A., Schockenhoff, F., & Lienkamp, M. (2020). Parametric Modeling of Mass and Volume Effects for Battery Electric Vehicles, with Focus on the Wheel Components. *World Electric Vehicle Journal*, 11(4), 63.
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189–200.

- Nordhaus, W. (2015). Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy. *American Economic Review*, 105(4), 1339–1370.
- Nordtvedt, T. S., & Widell, K. N. (2020). Refrigeration and sustainability in the seafood cold chain. 6th IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain. Proceedings: Nantes, France, August 26-28 2020, 12.
- Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R., & Hafner, M. (2020). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, 13(1), 298.
- NREL. (2019). Technical Potential of Solar in Peru using the Renewable Energy Data Explorer.
- OECD. (2022). The Observatory of Economic Complexity. OECD - The Observatory of Economic Complexity.
- OECD. (2016). Fisheries and Aquaculture in Colombia.
- OECD. (2017). OECD Environmental Performance Reviews: Peru 2017. OECD.
- OECD. (2022a). Enabling Conditions for Bioenergy Finance and Investment in Colombia. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- OECD. (2022b). Shipbuilding market developments, first semester 2022: Monitoring developments in ship supply, demand, prices and costs.
- Oei, P.-Y., & Mendelevitch, R. (2019). Prospects for steam coal exporters in the era of climate policies: a case study of Colombia. *Climate Policy*, 19(1), 73–91.
- Oesterling, P. (2015). Changing Policy for a Changing Climate: The Social Implications of Rapid Glacial Recession in Peru. *Yale Journal of International Affairs*, 10(1).
- Ohno, H., Matsubae, K., Nakajima, K., Kondo, Y., Nakamura, S., & Nagasaka, T. (2015). Toward the efficient recycling of alloying elements from end of life vehicle steel scrap. *Resources, Conservation and Recycling*, 100, 11–20.
- Ordoñez, J., Gago, E. J., & Girard, A. (2016). Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 195–205.
- Ortega-Pacheco, D. V., Keeler, A. G., & Jiang, S. (2019). Climate change mitigation policy in Ecuador: Effects of land-use competition and transaction costs. *Land Use Policy*, 81, 302–310.
- Ospina Noreña, J. E., Domínguez-Ramírez, C. A., Vega-Rodríguez, E. E., Darghan-Contreras, A. E., & Rodríguez-Molano, L. E. (2017). Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. *Atmósfera*, 30(1), 63–76.
- Quikhalfan, M., Lakbita, O., Delhali, A., Assen, A. H., & Belmabkhout, Y. (2022). Toward Net-Zero Emission Fertilizers Industry: Greenhouse Gas Emission Analyses and Decarbonization Solutions. *Energy & Fuels*, 36(8), 4198–4223.
- Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M., & Schroth, G. (2015). Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLOS ONE*, 10(4), e0124155.
- Pacheco Canales, Y. R. (2019). Evaluación de la política pública sobre bioetanol como combustible en Perú, 2003-2019. *Semestre Económico*, 22(53), 127–162.
- Palacio-Ciro, S., & Vasco-Correa, C. A. (2020). Biofuels policy in Colombia: A reconfiguration to the sugar and palm sectors? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110316.
- Palacios-Mateo, C., van der Meer, Y., & Seide, G. (2021). Analysis of the polyester clothing value chain to identify key intervention points for sustainability. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), 2.
- Palm, E., Nilsson, L. J., & Åhman, M. (2016). Electricity-based plastics and their potential demand for electricity and carbon dioxide. *Journal of Cleaner Production*, 129, 548–555.
- Palm, E., & Svensson Myrin, E. (2018). Mapping the plastics system and its sustainability challenges (IMES/EEES report series; Vol. 108).
- Palme, M., & Lobato, A. (2017). Robustness of Residential Houses in Ecuador in the Face of Global Warming: Prototyping and Simulation Studies in the Amazon, Coastal and Andes Macroclimatic Regions. In *Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy* (pp. 423–428). Springer International Publishing.

- Pan, H., Pournazeri, S., Princevac, M., Miller, J. W., Mahalingam, S., Khan, M. Y., Jayaram, V., & Welch, W. A. (2014). Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(21), 11336–11345.
- Paoli, L., & Gül, T. (2022). Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales.
- Parker, R. W. R., Blanchard, J. L., Gardner, C., Green, B. S., Hartmann, K., Tyedmers, P. H., & Watson, R. A. (2018). Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Climate Change*, 8(4), 333–337.
- Parker, R. W. R., & Tyedmers, P. H. (2015). Fuel consumption of global fishing fleets: current understanding and knowledge gaps. *Fish and Fisheries*, 16(4), 684–696.
- Pauly, D., & Zeller, D. (2017a). Comments on FAOs State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA 2016). *Marine Policy*, 77, 176–181.
- Pauly, D., & Zeller, D. (2017b). The best catch data that can possibly be? Rejoinder to Ye et al. "FAO's statistic data and sustainability of fisheries and aquaculture." *Marine Policy*, 81, 406–410.
- Pazmiño, L. T., & Arranz, A. V. (2015). Impact of energy crops on food sovereignty in Ecuador. *Envisioning a Future without Food Waste and Food Poverty*, 343–348.
- Pelaez-Samaniego, M. R., Espinoza, J. L., Jara-Alvear, J., Arias-Reyes, P., Maldonado-Arias, F., Recalde-Galindo, P., Rosero, P., & Garcia-Perez, T. (2020). Potential and Impacts of Cogeneration in Tropical Climate Countries: Ecuador as a Case Study. *Energies*, 13(20), 5254.
- Pelaez-Samaniego, M. R., Riveros-Godoy, G., Torres-Contreras, S., Garcia-Perez, T., & Albornoz-Vintimilla, E. (2014). Production and use of electrolytic hydrogen in Ecuador towards a low carbon economy. *Energy*, 64, 626–631.
- Penna, C. C. R., & Geels, F. W. (2012). Multi-dimensional struggles in the greening of industry: A dialectic issue lifecycle model and case study. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(6), 999–1020.
- Peters, G., Li, M., & Lenzen, M. (2021). The need to decelerate fast fashion in a hot climate - A global sustainability perspective on the garment industry. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126390.
- Peters, J. F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., & Weil, M. (2017). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 491–506.
- Philibert, C. (2017). Renewable Energy For Industry: From green energy to green materials and fuels. In *Insights Series 2017*. International Energy Agency (IEA).
- Pivnenko, K., Eriksen, M. K., Martín-Fernández, J. A., Eriksson, E., & Astrup, T. F. (2016). Recycling of plastic waste: Presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management*, 54, 44–52.
- Pohlmann, A., & Muñoz-Valencia, R. (2021). Stumbling into sustainability: The effectual marketing approach of Ecuadorian entrepreneurs to reframe masculinity and accelerate the adoption of slow fashion. *Critical Studies in Men??S Fashion*, 8(1), 223–243.
- Ponce-Jara, M. A., Castro, M., Pelaez-Samaniego, M. R., Espinoza-Abad, J. L., & Ruiz, E. (2018). Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007–2017 decade. *Energy Policy*, 113, 513–522.
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992.
- Posch, W. (2011). Polyolefins. In *Applied Plastics Engineering Handbook* (pp. 23–48). Elsevier.
- Posso, F., Espinoza, J. L., Sánchez, J., & Zalamea, J. (2015). Hydrogen from hydropower in Ecuador: Use and impacts in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(45), 15432–15447.
- Posso, F., Sánchez, J., Espinoza, J. L., & Siguencia, J. (2016). Preliminary estimation of electrolytic hydrogen production potential from renewable energies in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 2326–2344.
- Posso, F., Siguencia, J., & Narváez, R. (2020). Residual biomass-based hydrogen production: Potential and possible uses in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(26), 13717–13725.

- Posso Rivera, F., & Sánchez Quezada, J. (2014). La Economía del Hidrógeno en el Ecuador: oportunidades y barreras. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 6(2).
- Potter, L. (2020). Colombia's oil palm development in times of war and 'peace': Myths, enablers and the disparate realities of land control. *Journal of Rural Studies*, 78, 491–502.
- Pringle, A. M., Handler, R. M., & Pearce, J. M. (2017). Aquavoltaics: Synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 572–584.
- Psaraftis, H. N. (2012). Market-based measures for greenhouse gas emissions from ships: a review. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 11(2), 211–232.
- Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. A. (2020). Decarbonization of Maritime Transport: Is There Light at the End of the Tunnel? *Sustainability*, 13(1), 237.
- Quijera, J. A., Alriols, M. G., & Labidi, J. (2014). Integration of a solar thermal system in canned fish factory. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1062–1072.
- Quirós-Tortós, J., Godínez-Zamora, G., De La Torre Ugarte Pierrand, D. G., Heros, C., Lazo Lazo, J., Ruiz, E., Quispe, B., Diez Canseco, D., Garro, F., Mora, J., Eguren, L., Sandoval, M., Campos, S., Salmeri, M., Baron, R., Fernández-Baca, J., Iju Fukushima, A. S., Saavedra, V., & Vogt-Schilb, A. (2021). Costos y beneficios de la carbono-neutralidad en Perú: Una evaluación robusta. *Inter-American Development Bank (IDB)*, Washington D.C., USA.
- Quiroz, R., Ramírez, D. A., Kroschel, J., Andrade-Piedra, J., Barreda, C., Condori, B., Mares, V., Monneveux, P., & Perez, W. (2018). Impact of climate change on the potato crop and biodiversity in its center of origin. *Open Agriculture*, 3(1), 273–283.
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58.
- Ramirez, A. D., Boero, A., Rivela, B., Melendres, A. M., Espinoza, S., & Salas, D. A. (2020). Life cycle methods to analyze the environmental sustainability of electricity generation in Ecuador: Is decarbonization the right path? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110373.
- Ray, D. K., West, P. C., Clark, M., Gerber, J. S., Prishchepov, A. V., & Chatterjee, S. (2019). Climate change has likely already affected global food production. *PLOS ONE*, 14(5), e0217148.
- Realmonde, G., Drouet, L., Gambhir, A., Glynn, J., Hawkes, A., Köberle, A. C., & Tavoni, M. (2019). An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways. *Nature Communications*, 10(1), 3277.
- Reay, D. S. (2020). Land Use and Agriculture: Pitfalls and Precautions on the Road to Net Zero. *Frontiers in Climate*, 2.
- Ren, T., & Patel, M. K. (2009). Basic petrochemicals from natural gas, coal and biomass: Energy use and CO₂ emissions. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(9), 513–528.
- República de Colombia. (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC) (In English: "Update of the Nationally Determined Contribution of Colombia (NDC)").
- República del Ecuador. (2019). Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional Para el Acuerdo de París Bajo la Convención Marco de Naciones Unidas Sobre Cambio Climático.
- Restrepo-Trujillo, J., Moreno-Chuquen, R., & Jiménez-García, F. N. (2020). STRATEGIES OF EXPANSION FOR ELECTRIC POWER SYSTEMS BASED ON HYDROELECTRIC PLANTS IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE: CASE OF ANALYSIS OF COLOMBIA. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(6), 66–74.
- Reverter, M., Sarter, S., Caruso, D., Avarre, J.-C., Combe, M., Pepey, E., Pouyau, L., Vega-Heredía, S., de Verdal, H., & Gozlan, R. E. (2020). Aquaculture at the crossroads of global warming and antimicrobial resistance. *Nature Communications*, 11(1), 1870.
- Rietmann, N., Hügler, B., & Lieven, T. (2020). Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121038.
- Rietmann, N., & Lieven, T. (2019). A Comparison of Policy Measures Promoting Electric Vehicles in 20 Countries (pp. 125–145).

- Ríos Hernández, J. P., Ocampo López, O. L., González Pérez, P. T., Gaviria Ortiz, F. G., & Salazar Gil, V. (2022). Perception of the inhabitants of the department of Caldas, Colombia on the effects of climate change on water quality. *Journal of Water and Climate Change*, 13(1), 43–55.
- Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow, W. R., Zhou, N., Elliott, N., Dell, R., Heeren, N., Huckestein, B., Cresko, J., Miller, S. A., Roy, J., Fennell, P., Cremmins, B., Koch Blank, T., Hone, D., Williams, E. D., de la Rue du Can, S., ... Helseth, J. (2020). Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, 266, 114848.
- Rodríguez-Urrego, D., & Rodríguez-Urrego, L. (2018). Photovoltaic energy in Colombia: Current status, inventory, policies and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 160–170.
- Rondon-Jara, E., Lipa-Echevarría, K., Marchena-Barrientos, S., Chambi-Quispe, M. L., & Carocancha-Condori, G. J. (2021). Comparación de las leyes sobre el consumo de bolsas plásticas en Perú y Chile. *Producción + Limpia*, 15(2), 175–187.
- Rosenboom, J.-G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 117–137.
- Rueda-Bayona, J. G., Guzmán, A., Eras, J. J. C., Silva-Casarin, R., Bastidas-Arteaga, E., & Horrillo-Caraballo, J. (2019). Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology. *Journal of Cleaner Production*, 220, 529–543.
- Rungskunroch, P., Shen, Z.-J., & Kaewunruen, S. (2021). Getting It Right on the Policy Prioritization for Rail Decarbonization: Evidence From Whole-Life CO₂e Emissions of Railway Systems. *Frontiers in Built Environment*, 7.
- Sadeghi, B., Marfavi, Y., AliAkbari, R., Kowsari, E., Borbor Ajdari, F., & Ramakrishna, S. (2021). Recent Studies on Recycled PET Fibers: Production and Applications: a Review. *Materials Circular Economy*, 3(1), 4.
- Saget, C., Vogt-Schilb, A., & Luu, T. (2020). Jobs in a Net-Zero Emissions Future in Latin America and the Caribbean.
- Sala, A., Damalas, D., Labanchi, L., Martinsohn, J., Moro, F., Sabatella, R., & Notti, E. (2022). Energy audit and carbon footprint in trawl fisheries. *Scientific Data*, 9(1), 428.
- Sala, E., Mayorga, J., Bradley, D., Cabral, R. B., Atwood, T. B., Auber, A., Cheung, W., Costello, C., Ferretti, F., Friedlander, A. M., Gaines, S. D., Garilao, C., Goodell, W., Halpern, B. S., Hinson, A., Kaschner, K., Kesner-Reyes, K., Leprieur, F., McGowan, J., ... Lubchenco, J. (2021). Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. *Nature*, 592(7854), 397–402.
- Samadi, S., Lechtenböhmer, S., Viebahn, P., & Fischer, A. (2021). Conceptualisation of the Renewables Pull Effect (In German: "Renewables Pull - Verlagerung industrieller Produktion aufgrund unterschiedlicher Kosten erneuerbarer Energien").
- Samaniego, J., Schmidt, K.-U., Carlino, H., Caratori, L., Carlino, M., Gogorza, A., Rodríguez Vagaría, A., & Vázquez Amábile, G. (2021). Current understanding of the potential impact of Carbon Dioxide Removal approaches on the SDGs in selected countries in Latin America and the Caribbean.
- Sato, F. E. K., & Nakata, T. (2020). Energy Consumption Analysis for Vehicle Production through a Material Flow Approach. *Energies*, 13(9), 2396.
- Sawyer, J. W. (2016). *Automotive Scrap Recycling: Processes Prices and Prospects*. Routledge.
- Saygin, D., & Gielen, D. (2021). Zero-Emission Pathway for the Global Chemical and Petrochemical Sector. *Energies*, 14(13), 3772.
- Scarpelli, T. R., Jacob, D. J., Maasackers, J. D., Sulprizio, M. P., Sheng, J.-X., Rose, K., Romeo, L., Worden, J. R., & Janssens-Maenhout, G. (2020). A global gridded (0.1° × 0.1°) inventory of methane emissions from oil, gas, and coal exploitation based on national reports to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *Earth System Science Data*, 12(1), 563–575.
- Schäfer, A. W., Barrett, S. R. H., Doyme, K., Dray, L. M., Gnad, A. R., Self, R., O'Sullivan, A., Synodinos, A. P., & Torija, A. J. (2019). Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. *Nature Energy*, 4(2), 160–166.
- Scheffer, M. R. (2012). Trends in textile markets and their implications for textile products and processes. In *The Global Textile and Clothing Industry* (pp. 8–28). Elsevier.

- Schinas, O., & Butler, M. (2016). Feasibility and commercial considerations of LNG-fueled ships. *Ocean Engineering*, 122, 84–96.
- Scott, A., Pickard, S., Sharp, S., & Becqué, R. (2020). Phasing out plastics.
- Scroggins, R. E., Fry, J. P., Brown, M. T., Neff, R. A., Asche, F., Anderson, J. L., & Love, D. C. (2022). Renewable energy in fisheries and aquaculture: Case studies from the United States. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134153.
- Sevim, C., & Zincir, B. (2022). Biodiesel and Renewable Diesel as a Drop-in Fuel for Decarbonized Maritime Transportation. In A. K. Agarwal & H. Valera (Eds.), *Potential and Challenges of Low Carbon Fuels for Sustainable Transport*. Energy, Environment, and Sustainability (pp. 319–345). Springer Singapore.
- Shaffer, B., Auffhammer, M., & Samaras, C. (2021). Make electric vehicles lighter to maximize climate and safety benefits. *Nature*, 598(7880), 254–256.
- Sharafian, A., Blomerus, P., & Mérida, W. (2019). Natural gas as a ship fuel: Assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potential. *Energy Policy*, 131, 332–346.
- Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., & Naebe, M. (2020). Death by waste: Fashion and textile circular economy case. *Science of The Total Environment*, 718, 137317.
- Shishoo, R. (2012). Introduction: trends in the global textile industry. In *The Global Textile and Clothing Industry* (pp. 1–7). Elsevier.
- Sigcha, E., Martínez-MoscOSO, A., Siguenza-Guzmán, L., & Jadan, D. (2021). PESTEL Analysis as a Baseline to Support Decision-Making in the Local Textile Industry (pp. 144–156).
- Singh, A., Rorrer, N. A., Nicholson, S. R., Erickson, E., DesVeaux, J. S., Avelino, A. F. T., Lamers, P., Bhatt, A., Zhang, Y., Avery, G., Tao, L., Pickford, A. R., Carpenter, A. C., McGeehan, J. E., & Beckham, G. T. (2021). Techno-economic, life-cycle, and socioeconomic impact analysis of enzymatic recycling of poly(ethylene terephthalate). *Joule*, 5(9), 2479–2503.
- Slade, R., Bauen, A., & Gross, R. (2014). Global bioenergy resources. *Nature Climate Change*, 4(2), 99–105.
- Solano-Rodríguez, B., Pye, S., Li, P.-H., Ekins, P., Manzano, O., & Vogt-Schilb, A. (2021). Implications of climate targets on oil production and fiscal revenues in Latin America and the Caribbean. *Energy and Climate Change*, 2, 100037.
- Soo, V. K., Compston, P., & Doolan, M. (2017). The influence of joint technologies on ELV recyclability. *Waste Management*, 68, 421–433.
- Sornn-Friese, H., Roth, E., Sofev, P., Kaiser, B., Sinding, K., Vágsheyg, H., Eikås, A., Høivik, H., Langhorst, K., Trudsøe Larsen, F., Olsen, T., Mathias, D. P., Lange, B., & Stuer-Lauridsen, F. (2021). Creating Circular Economy Clusters for Sustainable Ship Recycling in Denmark.
- Spehar, D. S. (2021). How Translating Between Heritage and Contemporary Fashion Can Create a Sustainable Fashion Movement. In M. Á. Gardetti & S. S. Muthu (Eds.), *Handloom Sustainability and Culture* (pp. 251–266). Springer Nature.
- Sperling, D., Abeles, E., Bunch, D., Burke, A., Chen, B., Kurani, K., & Turrentine, T. (2004). The Price of Regulation. *ACCESS Magazine*, 1(25), 9–18.
- Stern, N., & Valero, A. (2021). Innovation, growth and the transition to net-zero emissions. *Research Policy*, 50(9), 104293.
- Strambo, C., & González Espinosa, A. C. (2020). Extraction and development: fossil fuel production narratives and counternarratives in Colombia. *Climate Policy*, 20(8), 931–948.
- Sturgeon, T. J., Memedovic, O., Biesebroeck, J. Van, & Gereffi, G. (2009). Globalisation of the automotive industry: main features and trends. *International Journal of Technological Learning, Innovation and Development*, 2(1/2), 7.
- Sturgeon, T. J., Van Biesebroeck, J., & Gereffi, G. (2008). Value chains, networks and clusters: reframing the global automotive industry. *Journal of Economic Geography*, 8(3), 297–321.
- Tambet, H., & Stopnitzky, Y. (2021). Climate Adaptation and Conservation Agriculture among Peruvian Farmers. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(3), 900–922.

- Tejada, L., & Rist, S. (2018). Seeing land deals through the lens of the 'land-water nexus': the case of biofuel production in Piura, Peru. *The Journal of Peasant Studies*, 45(7), 1247–1271.
- Thiel, G. P., & Stark, A. K. (2021). To decarbonize industry, we must decarbonize heat. *Joule*, 5(3), 531–550.
- Thrane, M., Nielsen, E. H., & Christensen, P. (2009). Cleaner production in Danish fish processing – experiences, status and possible future strategies. *Journal of Cleaner Production*, 17(3), 380–390.
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518–522.
- Tobler-Rohr, M. I. (2011). The supply chain of textiles. In *Handbook of Sustainable Textile Production* (pp. 45–149). Elsevier.
- Torres-Guevara, L. E., Prieto-Sandoval, V., & Mejia-Villa, A. (2021). Success Drivers for Implementing Circular Economy: A Case Study from the Building Sector in Colombia. *Sustainability*, 13(3), 1350.
- Torres, F. G., & Cornejo, H. (2016). The Need for Technical Improvement in the Plastics Recycling Industry in Middle-income Countries: The Peruvian Case. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 32(4), 201–212.
- Troell, M., Tyedmers, P., Kautsky, N., & Rönnbäck, P. (2004). Aquaculture and Energy Use. In *Encyclopedia of Energy* (pp. 97–108). Elsevier.
- Tullo, A. H. (2017). Plastics makers plot the future of the car. *Chemical & Engineering News (C&EN) Global Enterprise*, 95(45).
- Tullo, A. H. (2019). The future of oil is in chemicals, not fuels. *Chemicals & Engineering News (C&EN) Global Enterprise*, 97(8), 26–29.
- Tullo, A. H. (2021). A greener route to ethylene. *Chemicals & Engineering News (C&EN) Global Enterprise*, 99(39), 20–20.
- Tyedmers, P. H., Watson, R., & Pauly, D. (2005). Fueling Global Fishing Fleets. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 34(8), 635–638.
- Uddin, F. (2019). Introductory Chapter: Textile Manufacturing Processes. In *Textile Manufacturing Processes*. IntechOpen.
- Ugarte, D. D. L. T., Collado, M., Requejo, F., Gomez, X., & Heros, C. (2021). A deep decarbonization pathway for Peru's rainforest. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100675.
- Ullman, A. N., & Kittner, N. (2022). Environmental impacts associated with hydrogen production in La Guajira, Colombia. *Environmental Research Communications*, 4(5), 055003.
- Umweltbundesamt. (2018). Implementation of Nationally Determined Contributions: Peru Country Report.
- UNCTAD. (2021). Ship recycling, by country, annual: UNCTAD, Division on Technology and Logistics, estimates based on data supplied by Clarkson Research Services.
- UNCTAD. (2023). Plastic Pollution: The pressing case for natural and environmentally friendly substitutes to plastics.
- United Nations Draft Resolution UNEP/EA.5/L.23/Rev.1: End plastic pollution: Towards an international legally binding instrument, (2022) (testimony of UNEP).
- UNFCCC. (2015). Adoption of the Paris Agreement: Proposal by the President: Draft decision -/CP.21.
- UPME. (2016). Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 - 2022: Una realidad y oportunidad para Colombia (In English: "Indicative energy efficiency action plan 2017-2022: A reality and an opportunity for Colombia").
- UPME. (2019a). Plan Energético Nacional 2020 - 2050 (In English: "National Energy Plan 2020 - 2050").
- UPME. (2019b). Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica: PIEC 2019-2023 (In English "Indicative Plan for the Expansion of Electricity Coverage: PIEC 2019-2023").
- UPME. (2020). Boletín Estadístico de Minas y Energía 2016 - 2020 (In English: "Statistical Bulletin for Mining and Energy 2016 - 2020").
- UPME. (2021). Plan de Expansión de Referencia de Generación Transmisión 2020-2034 (In English: "Reference Expansion Plan for Generation and Transmission 2020-2034").

- UPME. (2022). Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PAI-PROURE) 2022-2030 (In English: "Indicative Action Plan of the Program for Rational and Efficiency Use of Energy (PAI-PROURE) 2022-2030").
- Urteaga-Crovetto, P., & Segura-Urrunaga, F. (2021). Transforming nature, crafting irrelevance: The commodification of marginal land for sugarcane and cocoa agroindustry in Peru. In *Political Ecology of Industrial Crops* (p. 27). Routledge.
- US Department of State, & US Executive Office of the President. (2021). *The Long-Term Strategy of the United States, Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050*.
- USAID. (2017). *Climate Change Risk Profile: Peru*.
- USAID. (2020). *Ecuador Energy Sector Assessment*.
- USAID. (2021). *Ecuador's Energy Sector Opportunities: Scaling Up Renewable Energy*.
- Vakili, S., Ölçer, A. I., & Schönborn, A. (2021). Identification of Shipyard Priorities in a Multi-Criteria Decision-Making Environment through a Transdisciplinary Energy Management Framework: A Real Case Study for a Turkish Shipyard. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1132.
- Vakili, S., Ölçer, A. I., Schönborn, A., Ballini, F., & Hoang, A. T. (2022). Energy-related clean and green framework for shipbuilding community towards zero-emissions: A strategic analysis from concept to case study. *International Journal of Energy Research*, 46(14), 20624–20649.
- Vakili, S., Schönborn, A., & Ölçer, A. I. (2022). Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind and hybrid electrification systems for stand-alone and grid-connected shipyard electrification in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132945.
- Valbuena Latorre, P. F., & Badillo Sarmiento, R. A. (2022). Biocombustibles y los derechos humanos al agua y la alimentación en Colombia: aplicación de los Principios Rectores sobre las Empresas y Derechos Humanos de la ONU. *Revista de Derecho Uninorte*, 54, 178–200.
- Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W. I. F., & Bowen, P. J. (2018). Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 63–102.
- Van Geem, K. M., Galvita, V. V., & Marin, G. B. (2019). Making chemicals with electricity. *Science*, 364(6442), 734–735.
- van Hoof, B., & Saer, A. (2022). Public Policy for Circular Economy: The Case of the National Strategy of Circular Economy in Colombia. In A. Alvarez-Risco, M. A. Rosen, & S. Del-Aguila-Arcentales (Eds.), *Towards a Circular Economy: Transdisciplinary Approach for Business* (pp. 169–186). Springer International Publishing.
- van Sluisveld, M. A. E., de Boer, H. S., Daioglou, V., Hof, A. F., & van Vuuren, D. P. (2021). A race to zero - Assessing the position of heavy industry in a global net-zero CO₂ emissions context. *Energy and Climate Change*, 2, 100051.
- Vermeulen, I., Van Caneghem, J., Block, C., Baeyens, J., & Vandecasteele, C. (2011). Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1–3), 8–27.
- Villamar, D., Soria, R., Rochedo, P., Szklo, A., Imperio, M., Carvajal, P., & Schaeffer, R. (2021). Long-term deep decarbonisation pathways for Ecuador: Insights from an integrated assessment model. *Energy Strategy Reviews*, 35, 100637.
- Viswanathan, V., & Knapp, B. M. (2019). Potential for electric aircraft. *Nature Sustainability*, 2(2), 88–89.
- Viviana, M., & Castillo, O. L. (2019). Colombian energy planning - Neither for energy, nor for Colombia. *Energy Policy*, 129, 1132–1142.
- Vo, T. T. E., Ko, H., Huh, J.-H., & Park, N. (2021). Overview of Solar Energy for Aquaculture: The Potential and Future Trends. *Energies*, 14(21), 6923.
- Vogl, V., Sanchez, F., Gerres, T., Lettow, F., Bhaskar, A., Swalec, C., Mete, G., Åhman, M., Lehne, J., Schenk, S., Witecka, W., Olsson, O., & Rootzén, J. (2021). *Green Steel Tracker: Lead it Group for Industry Transition*.
- Vogt-Schilb, A., & Hallegatte, S. (2014). Marginal abatement cost curves and the optimal timing of mitigation measures. *Energy Policy*, 66, 645–653.

- Walker, S., & Rothman, R. (2020). Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: A review. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121158.
- Walling, E., & Vaneekhaute, C. (2020). Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: A review of emission factors and their variability. *Journal of Environmental Management*, 276, 111211.
- Walsh, C., Lazarou, N.-J., Traut, M., Price, J., Raucci, C., Sharmina, M., Agnolucci, P., Mander, S., Gilbert, P., Anderson, K., Larkin, A., & Smith, T. (2019). Trade and trade-offs: Shipping in changing climates. *Marine Policy*, 106, 103537.
- Watson, R. A., Nichols, R., Lam, V. W. Y., & Sumaila, U. R. (2017). Global seafood trade flows and developing economies: Insights from linking trade and production. *Marine Policy*, 82, 41–49.
- Watson, R. A., Nowara, G. B., Hartmann, K., Green, B. S., Tracey, S. R., & Carter, C. G. (2015). Marine foods sourced from farther as their use of global ocean primary production increases. *Nature Communications*, 6(1), 7365.
- Weber, G., & Cabras, I. (2021). Environmental Justice and Just Transition in the EU's Sustainability Policies in Third Countries: The Case of Colombia. *The International Spectator*, 56(3), 119–137.
- Weidenkaff, A., Wagner-Wenz, R., & Veziridis, A. (2021). A world without electronic waste. *Nature Reviews Materials*, 6(6), 462–463.
- Welsby, D., Solano, B., Pye, S., & Vogt-Schilb, A. (2021). High and Dry: Stranded Natural Gas Reserves and Fiscal Revenues in Latin America and the Caribbean.
- Winslow, K. M., Laux, S. J., & Townsend, T. G. (2018). A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 263–277.
- Wojciechowska, P. (2021). Fibres and textiles in the circular economy. In *Fundamentals of Natural Fibres and Textiles* (pp. 691–717). Elsevier.
- World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation, & McKinsey & Company. (2016). *The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics*.
- World Steel Association. (2021). *Fact Sheet: Advanced Steel Applications*.
- Wren, B. (2022). Sustainable supply chain management in the fast fashion Industry: A comparative study of current efforts and best practices to address the climate crisis. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 4, 100032.
- Wu, R. S. S. (1995). The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4–12), 159–166.
- Yáñez, É., Meerman, H., Ramírez, A., Castillo, É., & Faaij, A. (2022). Fully integrated CO₂ mitigation strategy for an existing refinery: A case study in Colombia. *Applied Energy*, 313, 118771.
- Yáñez, E., Ramírez, A., Núñez-López, V., Castillo, E., & Faaij, A. (2020). Exploring the potential of carbon capture and storage-enhanced oil recovery as a mitigation strategy in the Colombian oil industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 94, 102938.
- Ye, Y., Barange, M., Beveridge, M., Garibaldi, L., Gutierrez, N., Anganuzzi, A., & Taconet, M. (2017). FAO's statistic data and sustainability of fisheries and aquaculture: Comments on Pauly and Zeller (2017). *Marine Policy*, 81, 401–405.
- Yellishetty, M., Mudd, G. M., Ranjith, P. G., & Tharumarajah, A. (2011). Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects. *Environmental Science & Policy*, 14(6), 650–663.
- Younis, A., Benders, R., Delgado, R., Lap, T., Gonzalez-Salazar, M., Cadena, A., & Faaij, A. (2021). System analysis of the bio-based economy in Colombia: A bottom-up energy system model and scenario analysis. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(2), 481–501.
- Yu, S., Lehne, J., Blahut, N., & Charles, M. (2021). 1.5 °C Steel: Decarbonizing the Steel Sector in Paris-Compatible Pathways.
- Yuan, J., Xiang, J., Liu, D., Kang, H., He, T., Kim, S., Lin, Y., Freeman, C., & Ding, W. (2019). Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture. *Nature Climate Change*, 9(4), 318–322.

Zambrano-Monserrate, M. A., & Alejandra Ruano, M. (2020). Do you need a bag? Analyzing the consumption behavior of plastic bags of households in Ecuador. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104489.

Zheng, J., & Suh, S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nature Climate Change*, 9(5), 374–378.

Ziegler-Rodriguez, K., Margallo, M., Aldaco, R., Vázquez-Rowe, I., & Kahhat, R. (2019). Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 229, 989–1003.

Zincir, B. (2022). Environmental and economic evaluation of ammonia as a fuel for short-sea shipping: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(41), 18148–18168.

Este informe explora las vías para lograr una producción industrial neutra en carbono en tres grandes economías andinas: Colombia, Ecuador y Perú. Examina las opciones para lograr cero emisiones netas en los sectores del plástico, textil, automovilístico y pesquero, cuatro sectores posicionados para desempeñar un papel clave en las economías de la región en el futuro. El informe analiza las barreras y oportunidades para lograr una industria con cero emisiones netas en estos países y sectores a la luz de las políticas industriales, energéticas y medioambientales existentes, y teniendo en cuenta los avances logrados hasta la fecha. El análisis sostiene que, a pesar de la presencia de múltiples barreras y desafíos para la implementación, las perspectivas de establecer un sector de la manufactura limpio a escala son prometedoras. Sin embargo, para llevar a cabo tales cambios transformadores se requieren las siguientes condiciones: (i) una visión estratégica y la autoridad legal subyacente para defender y lograr una transición hacia cero emisiones netas; (ii) una mayor coordinación entre los diversos departamentos gubernamentales para reducir la fragmentación en la elaboración de políticas; (iii) inversiones que aprovechen el rápido cambio tecnológico para construir una red eléctrica con cero emisiones y utilizar combustibles sintéticos bajos en carbono en la industria (como el hidrógeno verde o el amoníaco verde); (iv) inversiones extranjeras directas en el sector del suministro de energías limpias; (v) mandatos reguladores e incentivos económicos para que las poderosas empresas de petróleo y gas cambien los combustibles fósiles por combustibles sintéticos y de cero emisiones; y (vi) prácticas de gestión de residuos muy mejoradas para permitir una economía mucho más circular que reutilice y recicle los materiales.

