

N.º 60 - Junio del 2024

Cuadernos de la Cátedra CaixaBank de
Sostenibilidad e Impacto Social

Hacia una economía descarbonizada. Estrategias para combatir el calentamiento global

Bruno Martínez

Joan Fontrodona

Hacia una economía descarbonizada. Estrategias para combatir el calentamiento global

Bruno Martínez

Asistente de investigación

Joan Fontrodona

Profesor de Ética Empresarial y Análisis de Situaciones de Negocio y titular de la Cátedra CaixaBank de Sostenibilidad e Impacto Social

Edición: Caja Alta Edición & Comunicación (www.cajaalta.es)

Diseño: IESE Business School – www.iese.edu

La Cátedra CaixaBank de Sostenibilidad e Impacto Social responde al compromiso de fomentar, promocionar y divulgar nuevos conocimientos sobre la Responsabilidad Social Empresarial (RSE). Todo esto, a través de la generación de ideas y conceptos innovadores en el ámbito de la responsabilidad social, dirigidos especialmente al sector empresarial.

Creada en 2005, la Cátedra desarrolla proyectos de investigación, participa en congresos y conferencias, y organiza mesas redondas y actividades de divulgación sobre la responsabilidad social de la empresa.

ÍNDICE

Introducción	4
El dióxido de carbono y el calentamiento global	5
La descarbonización: medidas regulatorias	10
Pacto Verde Europeo (2019)	10
Estrategias nacionales de descarbonización a largo plazo	12
Emisiones por sectores: opciones de descarbonización	13
Electricidad	15
Transporte	17
Industria	20
Agricultura	22
Conclusión	24
Referencias	25

Introducción

En las últimas décadas hemos experimentado cómo, a causa de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provocadas por las actividades de origen antropogénico, las temperaturas de nuestro planeta se han incrementado en 1 grado centígrado con respecto a las de la época preindustrial y amenazan con hacerlo en 1,5 grados para el 2030 (IPCC 2019). Si bien puede parecer un fenómeno sin demasiada relevancia, se ha comprobado que este aumento de las temperaturas genera un desequilibrio en nuestro entorno, cuyas manifestaciones resultan constantes en diversos aspectos: desde el aumento de la frecuencia de los episodios meteorológicos extremos hasta las afectaciones a la salud humana o, incluso, el mayor riesgo de pérdida de biodiversidad o la menor disponibilidad de recursos básicos para nuestra existencia, como el agua y los alimentos.

El incremento de la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero (GEI) y, en especial, de CO₂, da lugar a una mayor retención de la radiación solar y, como consecuencia, de un aumento de la temperatura terrestre. Frente a este escenario, se corre el riesgo de perder las condiciones naturales que garantizan el correcto desarrollo del planeta tal como lo conocemos. Para evitarlo, resulta fundamental emprender acciones destinadas a reorientar nuestro modo de vida hacia modelos más respetuosos y responsables. Con este propósito, el Protocolo de Kioto, en vigor desde el 2005, puso en funcionamiento la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que supuso la adopción de un acuerdo internacional para la descarbonización orientado específicamente a conseguir la transformación de las actividades económicas para adoptar prácticas menos contaminantes. Del mismo modo, con el Acuerdo de París en el 2015, 196 países se fijaron como objetivo limitar el calentamiento mundial a 1,5 grados, con especial énfasis en la importancia de reducir las emisiones de CO₂.

Tal como se verá a lo largo de las siguientes páginas, la reducción de los GEI liberados a la atmósfera ocupa hoy un lugar central en la reflexión sobre el cambio climático, por lo que se están planteando nuevas estrategias y propuestas de tipo regulatorio en esa dirección. Al respecto, en la 28.ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP28), celebrada en Dubái a finales del 2023, se insistió de forma unánime en la necesidad de abandonar los combustibles fósiles y se hizo explícita por primera vez la exigencia de reducir las emisiones de GEI en un 43% para el 2030 y en un 60% para el

2035. En este contexto, si bien las emisiones de metano y las de óxido nitroso también merecen una atención especial, el objetivo prioritario de la mayor parte de las iniciativas destinadas a la mitigación del cambio climático se centra en la reducción de las de CO₂.

En la actualidad nos encontramos en un momento clave en el que, si reaccionamos de forma inminente y revertimos la tendencia actual, sería posible frenar el aumento térmico y evitar que el incremento de las temperaturas de la Tierra llegue a los dos grados (IPCC 2019), cifra que, en caso de alcanzarse, implicaría una serie de consecuencias negativas aún peores de las que ya estamos experimentando. Por este motivo y ante la urgencia que requiere el tratamiento de esta cuestión, desde la Cátedra se dedica este cuaderno a la comprensión de cómo la escalada de las emisiones de CO₂ provocada por la actividad humana da pie al fenómeno del calentamiento global y se muestran, además, algunas opciones para corregir este rumbo.

Sin perjuicio de lo anterior, cabe mencionar que no todo el mundo comparte la visión de este escenario futuro. Existen posturas que minimizan o, incluso, niegan el cambio climático y su efecto en el planeta y en las condiciones de vida. Ante los datos de los que se dispone en estos momentos y considerando la gravedad de las posibles consecuencias, resulta preferible adoptar una actitud preventiva. Así como uno de los principios fundamentales de la contabilidad es la prudencia, que, bajo condiciones de incertidumbre, aboga por asumir cierto grado de precaución al formular los juicios necesarios para efectuar las estimaciones requeridas, de forma que los activos o los ingresos no se expresen en exceso y que los pasivos o los gastos no lo hagan en defecto, al contabilizar nuestro impacto en el planeta resulta conveniente ser prudentes en la previsión de los riesgos. Este es el enfoque adoptado en este cuaderno.

A nivel estructural, en primer lugar se pone el énfasis en comprender en qué consiste el calentamiento global, así como sus principales consecuencias en nuestro entorno. A continuación, se introduce la idea de la descarbonización y las distintas estrategias y propuestas regulatorias que se están implementando con el objetivo de reformular nuestro modelo económico actual con el fin de orientarlo hacia otro más respetuoso con el medioambiente. El análisis se centra en los sectores con mayores emisiones de CO₂, con el fin de comprender de qué manera contribuyen a esta problemática, y, al mismo tiempo, se describen algunas acciones o tecnologías que ya se están poniendo en práctica en cada uno de ellos para lograr su descarbonización.

El dióxido de carbono y el calentamiento global

El CO₂ “es un gas inodoro, incoloro, ligeramente ácido y no inflamable” (PRTR-España, s. f.), cuya función resulta fundamental para nuestro planeta, puesto que tiene la capacidad de atrapar el calor y mantener la temperatura necesaria para la vida. Es uno de los conocidos como *gases de efecto invernadero* o *GEI*, junto con el vapor de agua (H₂O), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y el ozono (O₃). El cometido de estos consiste, sobre todo, en absorber la radiación solar y retenerla cerca de la superficie terrestre con el fin de generar su calentamiento. Sin la presencia de los GEI, la Tierra se encontraría a unos -18 grados, mientras que, si su concentración fuera demasiado elevada, la situación sería semejante a la de Venus, donde la atmósfera, con altísimos niveles de estos elementos, mantiene una temperatura de alrededor de los 400 grados (Riebeek 2011).

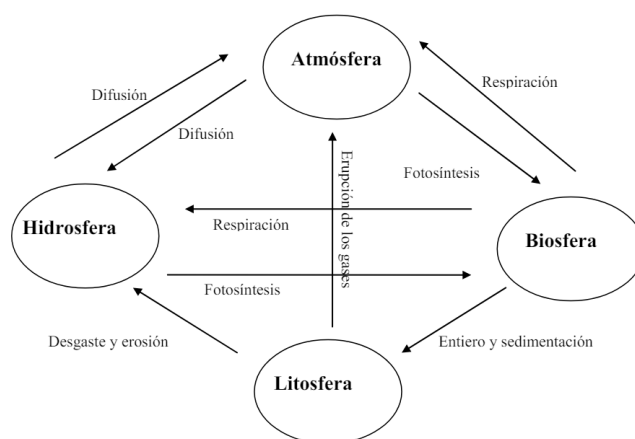
Pese a que el vapor de agua es el gas más presente en nuestra atmósfera y el que más contribuye al efecto invernadero –alrededor del 50%–, en la actualidad, el incremento del CO₂ –responsable, aproximadamente, del 20%– en la atmósfera es lo que provoca un desajuste que da lugar a una mayor retención de calor. Este fenómeno es el conocido como *calentamiento global*. A medida que aumenta la concentración de CO₂, la cantidad de radiación solar absorbida y retenida en nuestra atmósfera es más elevada, lo cual genera un incremento de las temperaturas, así como toda una serie de consecuencias en cadena que se analizarán a continuación. Todo ello ha supuesto que, desde 1880 hasta nuestros días, las temperaturas globales hayan devenido, de media, 0,8 grados más cálidas. Dicha cifra sería, incluso, mayor si no fuese porque parte de ese calor es absorbido por los océanos (Riebeek 2011), aunque –tal como se verá– esto también tiene efectos en el ecosistema marino.

Resulta importante señalar que el CO₂ se emite a través de distintos procesos naturales y que su presencia resulta beneficiosa para el planeta, siempre y cuando su concentración se encuentre dentro de determinados niveles. La principal fuente de emisión natural de este gas son los procesos fotosintéticos y, en concreto, el de la respiración, en el que los componentes alimentarios que se encuentran en los animales y las plantas se oxidan para la obtención de energía y dan lugar a la liberación de CO₂ y agua. Por otro lado, los volcanes también representan una fuente significativa, en la

medida en que generan entre 130 millones y 380 millones de toneladas de CO₂ al año (Riebeek 2011).

El CO₂ está compuesto de oxígeno y carbono¹. Este último es el cuarto elemento más abundante del universo. En nuestro planeta, la mayor parte se encuentra almacenado en las rocas, en torno a unos 65.500.000 millones de toneladas métricas, según la estimación más reciente (Riebeek 2011). El resto se ubica en otros reservorios como el océano, la atmósfera, las plantas, el suelo y los combustibles fósiles. Su repartición en estos depósitos se equilibra de manera natural a través del llamado *ciclo del carbono*, un proceso que establece los niveles adecuados en cada uno de ellos (véase la **Figura 1**). Así, gracias a este sistema natural de autorregulación, es posible garantizar la estabilidad térmica y evitar tanto un calentamiento provocado por la sobreabundancia de carbono en la atmósfera como un enfriamiento debido a su excesiva retención en las rocas.

Figura 1. Ciclo natural del carbono



Fuente: California Academy of Sciences (2008).

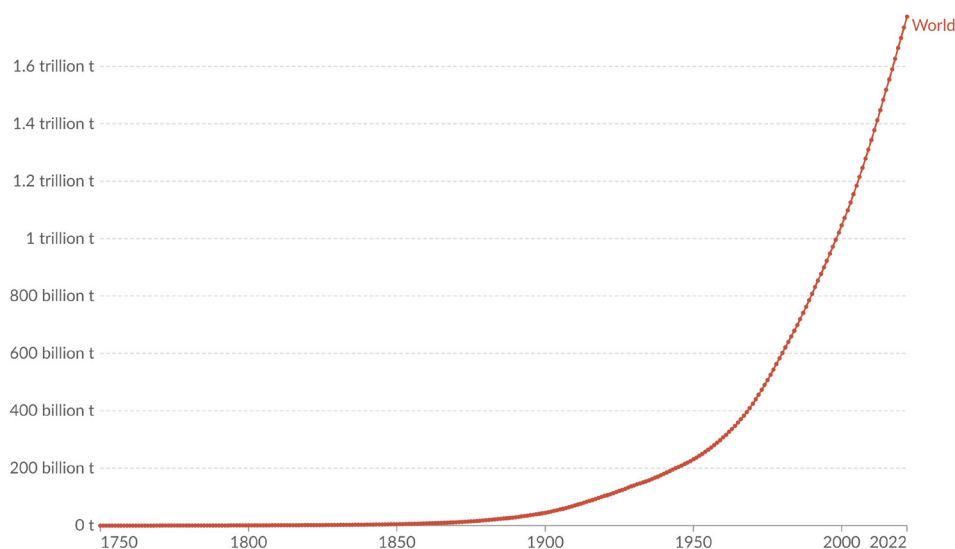
De este modo, cuando el ciclo natural del carbono sigue su curso sin alteraciones, permite mantener una concentración equilibrada de dicho elemento en cada uno de los reservorios –la atmósfera, la tierra, las plantas y el océano–. De hecho, así ha ocurrido de forma exitosa en nuestro planeta desde hace millones de años. Sin embargo, este ciclo natural se ha visto recientemente perturbado como consecuencia del impacto de las actividades antropogénicas, causantes de la liberación de enormes cantidades de carbono en la atmósfera cada año, que superan la capacidad

¹ Es importante comprender la diferencia entre el carbono y el CO₂. Por un lado, el carbono es un elemento químico esencial en la química orgánica, presente en todas las formas de vida y en diversas estructuras como los diamantes y el grafito. El CO₂, por su parte, es una molécula compuesta por un átomo de carbono y dos de oxígeno, resultante de procesos como la respiración y la combustión, y que constituye un importante gas de efecto invernadero. En este sentido, el carbono en su forma elemental no representa un peligro, sino que es mediante su combustión que se genera CO₂, que actúa como gas de efecto invernadero.

de absorción natural del planeta y, por tanto, generan un exceso de CO₂ en cada uno de los depósitos mencionados. En concreto, desde los inicios de la era industrial, se calcula que la actividad humana ha provocado un incremento del 50% en la concentración atmosférica de este gas. Ello se traduce en unos niveles actuales que representan el 150% de los registrados en el año 1750 (Riebeek 2011). En la **Figura 2** se muestra de un modo claro la magnitud de este aumento descontrolado de las emisiones.

Desde los inicios de la era industrial, se calcula que la actividad humana ha provocado un incremento del 50% en la concentración atmosférica de CO₂.

Figura 2. Emisiones globales de CO₂ (toneladas anuales)²



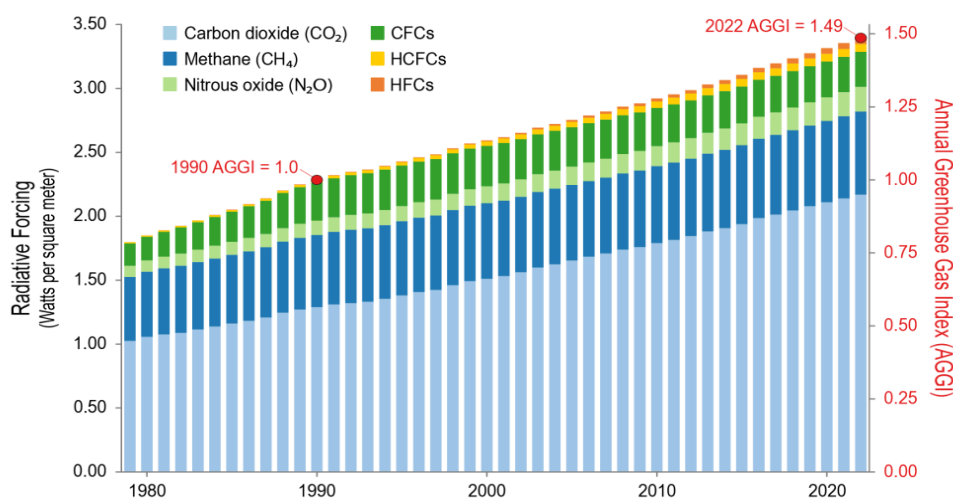
Fuente: Our World in Data 2023.

Hasta la fecha, aproximadamente el 55% de este excedente de carbono generado por las actividades humanas ha sido absorbido por las plantas y los océanos, mientras que, alrededor del 45% ha permanecido en la atmósfera. Con los índices actuales, se estima que la superficie terrestre y los océanos podrían llegar a absorber en un futuro la mayor parte del exceso de CO₂ generado hasta el momento, con las consecuencias negativas que esto provocaría en ambos ecosistemas. Asimismo, existe la certeza de que en torno al 20% no podría llegar a ser asimilado y, por tanto, quedaría en el aire, lo cual agravaría el calentamiento global (Riebeek 2011).

Tal como se ha mencionado, el CO₂ es un importante GEI, de modo que, un aumento de su concentración atmosférica comporta una mayor retención de la radiación solar y, en consecuencia, un incremento de la temperatura del planeta. Los datos disponibles demuestran que, a medida que ha crecido la

cantidad de GEI, también lo han hecho, simultáneamente, las temperaturas globales, en concreto, 0,8 grados desde 1880. Así, según la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA 2022), este fenómeno se ha agudizado de forma particular entre 1990 y el 2022, con un crecimiento del 49% en la retención de calor en la atmósfera entre ambos años. Cabe puntualizar, no obstante, que, si bien el exceso de CO₂ es el principal fenómeno responsable de la escalada de las temperaturas, otros GEI como el metano y el óxido nítrico también contribuyen (véase la **Figura 3**). Su incremento, pese a que es de menor escala, obedece igualmente a actividades humanas relacionadas con la producción y el consumo de energía, la industria, la agricultura y el manejo de los residuos. Asimismo, como consecuencia directa de este aumento térmico, también se genera una mayor concentración de vapor de agua en la atmósfera, lo que intensifica aún más la retención de radiación solar y el calentamiento terrestre.

² Debe tenerse en cuenta que el gráfico se encuentra en inglés, por lo que las cantidades señaladas como "billion" corresponden en español a miles de millones y las señaladas "trillion" al billón español.

Figura 3. Índice anual de gases de efecto invernadero

Fuente: NOAA, s. f.

Aunque ya se empiezan a percibir los efectos de esta problemática, sus consecuencias se están viendo atenuadas en gran medida por la absorción del calor por parte de los océanos. En este sentido, a pesar de los beneficios que este fenómeno brinda al resto del planeta, también comporta una serie de efectos altamente negativos en el medio marítimo y su biodiversidad. De entre los distintos problemas derivados del calentamiento del medio marino, destaca de modo especial la reducción del fitoplancton, que precisa agua a bajas temperaturas para su correcto desarrollo. Como resultado directo, se ve mermada la capacidad del océano para absorber carbono a través de estos organismos, lo que altera los ciclos naturales que mantienen el equilibrio de la Tierra.

Asimismo, esta asimilación de calor también contribuye al deshielo de los glaciares y al derretimiento de las capas de hielo. Este fenómeno ya se encuentra en un estado avanzado, tal como lo demuestra el caso particular del Ártico, donde las temperaturas han experimentado un aumento tres veces más rápido que en el resto del mundo y han provocado una pérdida del hielo terrestre en Groenlandia del 51% con respecto a 1970 (AMAP 2021). Todo ello se traduce en una elevación del nivel del mar que puede provocar tanto la pérdida de tierras bajas como la intrusión de agua salada en fuentes de agua dulce y la degradación de hábitats costeros. Los datos indican que, en caso de mantenerse la tendencia actual, Europa experimentará un aumento medio del nivel del mar de entre 60 y 80 centímetros a finales del siglo en curso (Comisión Europea, s. f. b).

En paralelo a lo anterior, tal como se ha mencionado, cerca del 30% del excedente de CO₂ en la atmósfera es absorbido por el océano. Este proceso natural de disolución del gas en el medio marino produce ácido carbónico, que aumenta la acidez del agua. Como resultado, desde 1750, el pH de la superficie oceánica ha disminuido en 0,1 puntos, lo cual ha provocado un incremento del 30% en acidez y ha afectado de forma grave a la calidad del agua (Riebeek 2011).

Por otro lado, en lo que respecta al resto de los ámbitos, los estudios recientes apuntan a que, con los niveles de CO₂ acumulados hasta la fecha, cabe esperar que, tal como ya se ha anticipado, la temperatura de la Tierra aumente en 1,5 grados, con elevada probabilidad de alcanzar, incluso, los 2 grados de incremento si se mantiene el ritmo actual de emisiones. Las consecuencias, que ya están afectando a nuestra vida en múltiples aspectos y lo seguirán haciendo en el futuro, se detallan a continuación:

- **Mayor riesgo y frecuencia de eventos meteorológicos externos.** El calentamiento global ha provocado un incremento en la frecuencia, la intensidad y la cantidad de dichos fenómenos. En este sentido, en distintas regiones del mundo se están produciendo dos situaciones graves y opuestas: mientras que, en algunas zonas, se experimenta un aumento del riesgo de precipitaciones intensas, en otras, por el contrario, tienen lugar importantes episodios de sequía. Respecto al primer escenario, en numerosas áreas el cambio climático está dando lugar a más precipitaciones, a la vez que las tormentas destructivas se han intensificado y son más habituales. Según se ha mencionado, las tempe-

raturas elevadas propician un mayor nivel de humedad atmosférica, lo que provoca que estos fenómenos sean más fuertes, con la consiguiente amenaza de inundaciones. Asimismo, el calentamiento de los océanos también afecta a la frecuencia y magnitud de las tormentas tropicales, dado que los ciclones, los huracanes y los tifones se alimentan de las aguas templadas de su superficie.

Por otra parte, muchas regiones de Europa hacen frente a la sequía, cada vez más frecuente, grave y prolongada. Esta se define como “un déficit inhabitual y temporal del agua disponible debido a la falta de precipitaciones, combinada con una mayor evaporación ocasionada por las altas temperaturas” (Comisión Europea, s. f. b). Por tanto, se trata de un concepto distinto a la mera escasez de este elemento, que consiste más bien en una falta estructural de agua dulce prolongada a causa de un consumo excesivo de esta. En cualquier caso, este fenómeno tiene efectos directos en una gran cantidad de ámbitos: en las infraestructuras de transporte, en la agricultura, en la silvicultura y la biodiversidad. En concreto, se estima que, en la actualidad, provoca pérdidas cercanas a 9.000 millones de euros cada año en la Unión Europea y unos 6.400 millones de dólares en Estados Unidos, con especial afectación a los sectores agrícola y energético y al abastecimiento público de agua. Además, entre 1970 y el 2019, la sequía ha sido uno de los fenómenos naturales que mayor número de muertes ha ocasionado en todo el mundo —aproximadamente 650.000—, y se calcula que afecta cada año a alrededor de 55 millones de personas (Vicente Serrano *et al.* 2023).

- **Impacto en la salud.** Investigaciones recientes demuestran que el calentamiento global también ha empezado a afectar a la salud de las personas, y se prevé que esta tendencia se intensifique con el aumento progresivo de las temperaturas. En la actualidad, se atribuye al cam-

bio climático el 37% de las muertes relacionadas con el calor. Estas se producen especialmente en las personas mayores de 65 años, cuya tasa de mortalidad por estos motivos ha experimentado un incremento del 70% en las dos últimas décadas. Asimismo, la disminución de la calidad del agua y la mayor insalubridad del medioambiente provocadas por este calentamiento global han disparado la inseguridad alimentaria, con 98 millones de afectados en el mundo más en el 2020 respecto a la media del periodo 1981-2010 (OMS 2023).

A su vez, la Organización Mundial de la Salud (OMS 2023) prevé unas 250.000 muertes adicionales al año en el mundo para la década del 2030 por motivos como la desnutrición, la malaria, la diarrea y el estrés ocasionado por el calor. Esta situación plantea un desafío particular para los países en vías de desarrollo, los cuales —a pesar de su contribución mínima a las emisiones globales— experimentan las consecuencias más severas en este ámbito. En las regiones más vulnerables, la tasa de mortalidad por fenómenos meteorológicos extremos en la última década ha sido 15 veces mayor que en aquellas que lo son menos. Asimismo, ante la previsión que estima que los costes derivados de los daños directos a la salud a causa del cambio climático oscilarán entre 2.000 millones y 4.000 millones de dólares anuales en el 2030, estas zonas, cuya infraestructura sanitaria es más débil, serán las que experimentarán un mayor número de dificultades a la hora de hacer frente a dicha situación.

Por otro lado, los cambios en las temperaturas y las precipitaciones también favorecen la propagación de enfermedades transmitidas por vectores —agentes u organismos transmisores de la enfermedad—, como la malaria y el dengue. Las condiciones climáticas cambiantes facilitan la proliferación de los elementos responsables



de la transmisión de estas afecciones, por lo que se prevé que, si no se implementan las medidas preventivas adecuadas, también se incrementarán las muertes ocasionadas por ellas, que hoy superan ya las 700.000 al año en el mundo (OMS 2023).

- **Migraciones climáticas.** Según los datos de la OMS (2023), en la actualidad, 3.600 millones de personas viven en zonas altamente vulnerables al cambio climático, y se espera que esta cifra siga creciendo. De hecho, se calcula que, entre el 2008 y el 2016, los sucesos relacionados con este –inundaciones, tormentas, incendios forestales y temperaturas extremas– han provocado ya el desplazamiento de alrededor de 21,5 millones de personas de media al año (ACNUR 2016). En concreto, según los últimos datos disponibles, solo en el 2021, unos 23 millones de personas se vieron desplazadas dentro de sus propios países por estas mismas causas (ACNUR 2022).

Por su parte, el Institute for Economics & Peace (IEP 2020) también destaca la importancia de tener en consideración un fenómeno que aún está por suceder y que puede comportar igualmente desplazamientos masivos de población: la subida del nivel del mar. Esta circunstancia hace cada vez más inminente para los miembros de las comunidades costeras y las situadas en áreas bajas la amenaza de la pérdida de su hogar. Por todo ello, se estima que, para el 2050, el 25% de la población mundial podría estar expuesta, al menos, a un peligro ecológico, lo que provocaría el traslado de unos 1.200 millones de personas.

- **Impacto en la biodiversidad.** El cambio climático puede afectar a las especies de plantas y animales, al alterar su hábitat natural. Ello genera un mayor riesgo de extinción de algunas de ellas y, por tanto, de pérdida de la biodiversidad. De hecho, en el mundo actual, estas desaparecen a un ritmo mil veces mayor que en cualquier otra época de la que se tenga constancia en la historia y un millón de ellas están en riesgo de hacerlo en las próximas décadas (ONU, s. f.). Tal como señalan desde la Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (2020), la proporción de especies en peligro de extinción en la actualidad es, de media, un 23,7% de cada grupo taxonómico. Además, el tamaño de las poblaciones de vertebrados de todo el mundo es, aproximadamente, menos de un tercio del registrado en 1970 y menos de un quinto en el caso de las especies de agua dulce.

En este sentido, pese a que la causa principal de esta situación es la desaparición de los bosques y los pastizales

(...) en la actualidad, 3.600 millones de personas viven en zonas altamente vulnerables al cambio climático, y se espera que esta cifra siga creciendo.

naturales a causa de la agricultura y la ganadería intensivas, el calentamiento global está agravando la situación, al provocar un mayor número de incendios forestales, un clima cada vez más extremo y una mayor frecuencia de plagas invasoras y enfermedades. De hecho, según se apunta desde el Consejo Europeo (2024a), en la actualidad tan solo el 15% de los hábitats están en buen estado, por lo que se prevé que, en las condiciones futuras que se esperan, aunque algunas especies podrán adaptarse geográficamente, una gran parte de ellas no lo logre.

- **Escasez de recursos hídricos.** Tal como se ha visto, el cambio climático incrementa la frecuencia y duración de las sequías, lo que supone menor disponibilidad de agua para el consumo humano, la agricultura y la industria. Asimismo, el aumento de las temperaturas provoca tanto unas elevadas tasas de evaporación del agua de la superficie terrestre como una aceleración del ciclo hidrológico, lo que reduce de forma drástica la disponibilidad de este recurso (Martínez y Fontrodona 2024).

Lo anterior puede conducir a una sobreexplotación de las fuentes de agua dulce y a un incremento del estrés hídrico de muchas regiones. Según el IEP (2020), se estima que, hoy en día, 2.600 millones de personas en el mundo experimentan las altas temperaturas o el estrés hídrico extremo, y que para el 2040, esta cifra ascenderá a 5.400 millones. Una clara evidencia de esta situación es el número de conflictos e incidentes violentos relacionados con este valioso recurso registrado durante la última década, que ha aumentado en un 270% en todo el mundo respecto a la década anterior –en particular, en las regiones de Yemen e Irak–.

- **Afectaciones en el sector agrícola.** La agricultura representa un sector especialmente afectado por el calentamiento global, debido a las alteraciones en los patrones de precipitaciones y la mayor frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, como las olas de calor, la sequía, las tormentas y las inundaciones. El aumento del riesgo de incendios forestales también representa un peligro importante para las tierras de cultivo

y los pastizales (EPA 2023). Además, la menor disponibilidad de agua y su peor calidad perjudica de modo grave la producción agrícola, lo cual también podría provocar una crisis de seguridad alimentaria. Por otro lado, tal como ya se ha mencionado, a medida que el clima deviene más extremo, se incrementa la probabilidad de aparición de plagas invasoras muy perjudiciales para los cultivos.

En este sentido, la agricultura constituye un sector especialmente importante, por dos motivos principales: el primero es la gran preocupación en torno a las posibles afectaciones en la producción, ya que ello traería consigo problemáticas de gran magnitud tanto en el ámbito económico como en el social; el segundo radica en el hecho de que la actividad agrícola puede desempeñar un papel clave no solo con la reducción de sus emisiones de GEI, sino también gracias a su capacidad de mitigar en gran medida la situación a través de la captura de carbono por los cultivos, los setos y los árboles que se encuentran en las tierras dedicadas a ella (EPA 2023).

En definitiva, como consecuencia de la actividad humana se ha producido un exceso de emisiones de CO₂ que ha provocado la alteración del equilibrio que brindan al planeta los ciclos naturales del carbono. Según se ha podido comprobar, esto desencadena un desajuste que afecta en gran medida a nuestro medio y nuestra vida, de una forma directa y apremiante. Así las cosas, a continuación, se analiza cómo, ante tal panorama, ha comenzado a arraigar en los distintos organismos internacionales el convencimiento de la necesidad de tomar medidas y reformular nuestras actividades con el objetivo de reducir las emisiones y la concentración de CO₂.

La descarbonización es aquel proceso mediante el cual los países u otras entidades tratan de instaurar una economía con bajas emisiones de CO₂ y las personas procuran asimismo reducir su huella de carbono.

La descarbonización: medidas regulatorias

Frente al escenario descrito en el apartado anterior, se ha hecho evidente la necesidad de replantear nuestra forma de vida, por lo que, en las últimas décadas, ha emergido el concepto de *descarbonización*. En palabras del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2014), esta hace referencia al proceso mediante el cual los países u otras entidades tratan de instaurar una economía con bajas emisiones de CO₂ y las personas procuran asimismo reducir su huella de carbono. En la misma línea, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) complementa esta definición al afirmar que, con este mismo propósito, la descarbonización representa una búsqueda de alternativas a nuestro estilo de vida (Meza 2022). Para ello, se considera primordial un cambio radical del actual modelo económico centrado en el crecimiento a toda costa, lo cual implica transformar diversos aspectos: el modo en que generamos la energía y las distintas fuentes que utilizamos; la forma en la que construimos o nos desplazamos; e, incluso, la gestión de los recursos naturales.

No obstante, para lograr la descarbonización efectiva de nuestra economía y revertir la tendencia hoy dominante, resulta fundamental una acción política capaz de coordinar la ejecución de un conjunto de medidas orientadas a dicho propósito. En este sentido, tal como se expone a continuación, este objetivo ha empezado a ganar relevancia en el ámbito legislativo. Dada la urgencia de la situación actual, la voluntad de reducir las emisiones de carbono y de reformular para ello nuestras actividades ocupa un lugar central en las estrategias políticas enfocadas a abordar el cambio climático y sus consecuencias. Por ello, en este contexto, se están implementando regulaciones orientadas de forma específica a la descarbonización de las principales actividades antropogénicas responsables de ese indeseado fenómeno.

Pacto Verde Europeo (2019)

En el 2019 la Comisión Europea puso en marcha el Pacto Verde Europeo (PVE), un paquete de iniciativas políticas orientadas a la revisión de la normativa existente sobre asuntos climáticos y a la introducción de nuevas regulaciones. Su creación responde a la intención de elaborar una hoja de ruta para la transición ecológica de la UE, con el objetivo último de alcanzar la neutralidad climática en el 2050. Así, el PVE se centra en dos metas principales: la transformación de la región en un emisor cero neto de GEI para la referida fecha y la reformulación de la economía de tal modo que quede garantizado su desarrollo sin necesidad de incrementar el uso de los recursos naturales (Comisión Europea 2023).

Dado el carácter esencial de la problemática relativa a las emisiones de GEI, en el marco del PVE se incluyen diversas iniciativas enfocadas de modo específico a esta cuestión, entre las que destacan dos: la taxonomía medioambiental europea y el paquete de medidas conocido como *Objetivo 55*.

La taxonomía medioambiental, tal como ya se señaló con anterioridad en esta Cátedra, pretende ser, a grandes rasgos, “una clasificación de actividades económicas según su grado de sostenibilidad desde el punto de vista ambiental” (Muller y Fontrodona 2021), cuya finalidad es la de facilitar un lenguaje común entre inversores, empresas y Gobiernos. Así pues, ha llevado a definir en qué condiciones una actividad económica puede ser oficialmente considerada “sostenible”. En este sentido, se ha establecido como criterio fundamental que cualquier actividad económica que busque financiación sostenible debe contribuir a cualquiera de los seis objetivos climáticos establecidos por la UE: la mitigación del cambio climático, la adaptación a este, la protección de los recursos hídricos y marinos, la transición hacia una economía circular, la prevención y el control de la contaminación y la protección y recuperación de la biodiversidad y los ecosistemas.

En lo que respecta al primero de ellos, se orienta al control de las emisiones de GEI, así como a la generación, distribución y uso de energías renovables, la mejora de la eficiencia energética, la movilidad limpia, el desarrollo de la tecnología de almacenamiento de carbono y, más en general, el aumento de los sumideros de carbono^{3,4}.

Por su parte, el Objetivo 55 tiene por objeto una revisión de la legislación de la UE en materia climática con el fin de volcar en ella los nuevos propósitos establecidos por el PVE en la materia. Cabe destacar, no obstante, que el Consejo Europeo ya había fijado en el 2014, en el conocido como *Marco 2030*, el ambicioso objetivo de reducir las emisiones de GEI en, al menos, un 40% con respecto a 1990 antes del 2030. Tras la implantación del PVE, los líderes europeos acordaron incrementar esta cifra hasta, al menos, un 55%. Para la consecución de esta nueva meta, la Comisión Europea consideró necesario plantear un conjunto de propuestas, agrupadas en el Objetivo 55, destinadas a revisar y actualizar la normativa climática vigente (Consejo Europeo 2024b):

- **Aumento de la eficiencia energética.** Se establece una serie de nuevas normas destinadas a incrementar el ahorro obligatorio de energía anual y reducir el consumo energético de los edificios del sector público.

Tras la implantación del Pacto Verde Europeo en 2019, los líderes europeos acordaron establecer el objetivo de reducir las emisiones de GEI en, al menos, un 55% con respecto a 1990 antes de 2030.

- **Creación de un fondo para apoyar a los ciudadanos y las empresas más afectados.** Conocido como *Fondo Social para el Clima*, está destinado sobre todo a proporcionar medidas de apoyo e inversiones dirigidas a hogares, microempresas y usuarios del transporte.
- **Cumplimiento de los objetivos climáticos en los sectores del uso de la tierra y la silvicultura.** Se establece una serie de nuevas normas acerca de la reducción de las emisiones y sobre la absorción de carbono en dichos sectores.
- **Establecimiento de un reglamento específico para la reducción de las emisiones de metano.** Se trata de un conjunto de medidas que afectan de modo específico al sector de la energía.
- **Gestión de las emisiones externas de la UE.** Para ello, se pretende desarrollar el mecanismo de ajuste en frontera por carbono (MAFC), con el que fijar un precio justo al carbono emitido durante la producción de las mercancías que son importadas a la UE. Su finalidad es lograr que los esfuerzos de reducción de emisiones en la UE no se vean contrarrestados por el aumento de las procedentes de fuera de sus fronteras debido a la deslocalización de la producción en otros países o al incremento de las importaciones de productos intensivos en carbono.
- **Potenciación de la energía renovable.** Para el 2030, se aumenta a un mínimo del 40% el objetivo previo (32%) de utilización de fuentes de energía renovables en la combinación energética global.
- **Promoción de combustibles más ecológicos en los sectores marítimo y de la aviación.** Para el primero de ellos, se fija el objetivo de reducir las emisiones de GEI deriva-

³ Por sumidero de carbono se entiende cualquier sistema o proceso mediante el cual se captura CO₂ de la atmósfera, se absorbe y se retiene una mayor cantidad de la que es liberada nuevamente. Es el caso, por ejemplo, de sumideros de carbono de origen natural como las formaciones vegetales, los océanos o el suelo (MITECO, s.f.)

⁴ Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de junio del 2020, relativo al establecimiento de un marco para facilitar las inversiones sostenibles y por el que se modifica el Reglamento (UE) 2019/2088, Diario Oficial de Unión Europea L198, 26 de junio del 2020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852>.

dos de los combustibles utilizados por los buques hasta un 80% de aquí al 2050. Por su parte, los proveedores de carburantes para aeronaves se verán obligados a aumentar de forma gradual la cantidad de los de tipo sostenible, con el fin de alcanzar el 70% en la misma fecha.

- **Reforma del régimen de comercio de los derechos de emisión de la UE con el fin de hacerlo más ambicioso.** Este régimen se basa en la asignación a las grandes empresas europeas del derecho a producir cierta cantidad de emisiones. Aquellas deben ajustarse de forma anual al límite así establecido; de lo contrario, se les imponen duras sanciones económicas.
- **Revisión de la fiscalidad de la energía.** Se pretende que los combustibles más contaminantes se graven con los tipos impositivos más elevados, a la vez que se ofrecen incentivos a productores, usuarios y consumidores para que adopten prácticas sostenibles.
- **Sustitución del gas fósil por los gases renovables e hipocarbónicos.** Esta propuesta incluye un conjunto de medidas que tienen por objetivo reducir la huella de carbono del mercado del gas, mediante la sustitución gradual del gas natural por otros renovables e hipocarbónicos y el impulso a la implantación de estos últimos en la UE de aquí al 2030.
- **Transformación ecológica de la construcción.** Se obliga, por un lado, a que todos los edificios nuevos sean de tipo cero emisiones de aquí al 2030 y, por otro, a que los ya existentes adquieran dicha condición, como máximo, para el 2050.
- **Transición hacia un transporte más sostenible.** Esta propuesta pretende garantizar que la ciudadanía y las empresas tengan acceso a una red suficiente de infraestructuras para la recarga o el repostaje de los vehículos terrestres y los buques con combustibles alternativos.

Estrategias nacionales de descarbonización a largo plazo

A raíz de lo estipulado en el Acuerdo de París del 2015, en el que se estableció como objetivo de la UE reducir de forma sustancial las emisiones de GEI, los Estados miembros se vieron obligados a desarrollar sus propias estrategias nacionales para lograr dicha reducción y cumplir así con el propósito de la neutralidad climática. Esto se llevó a cabo mediante los Planes Nacionales Integrados de Energía y Clima (PNIEC), en los que se estipulaba, para el periodo 2021-2030, el deber

de disminuir de forma obligatoria un 40%, como mínimo, las emisiones de GEI en el conjunto de la economía y aumentar la eficiencia energética, al menos, un 27% (MITECO 2020). Sin embargo, tras la revisión de los acuerdos alcanzados en el 2019 a través del PVE, los objetivos se hicieron más ambiciosos y se prolongaron hasta el 2050.

En este sentido, los Estados miembros debieron reformular sus PNIEC y adoptar las nuevas estrategias nacionales de descarbonización a largo plazo, las cuales debían mantener la coherencia con las anteriores. De hecho, estas podían beneficiarse de las iniciativas ya emprendidas. Por esta razón, España –en calidad de miembro de la UE– también se vio obligada a poner en marcha nuevas políticas encaminadas a conseguir la neutralidad en carbono antes del 2050, en la conocida como *Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo: 2050 (ELP)*. Se trata, básicamente, de una hoja de ruta para avanzar hacia la referida neutralidad climática en el periodo estipulado, con algunos hitos intermedios en el 2030 y el 2040, dirigida a proporcionar “señales a medio y largo plazo a los inversores, a los agentes económicos, sociales y medioambientales, y al conjunto de la sociedad española, para el periodo 2021-2050” (MITECO 2020).

La ELP declara tener un triple objetivo:

- Cumplir con los compromisos del Acuerdo de París.
- Anticipar y planificar la transición hacia una economía climáticamente neutra, teniendo en cuenta los retos y el debate social, empresarial y político sobre sus implicaciones y necesidades.
- Ofrecer un objetivo claro a largo plazo, lo que ayudará a anticipar las líneas de actuación necesarias y, por tanto, a maximizar y a aprovechar las oportunidades derivadas de la transición energética, con reducción de los riesgos.

En conclusión, en la actualidad, la ELP representa en el ámbito nacional el principal plan de actuación para la consecución de la neutralidad climática en España. En ella se establecen como metas la eficiencia energética y la implementación de las energías renovables en cuanto principales medios para alcanzar el objetivo de reducción de emisiones de GEI en el 2050 en un 90% con respecto a 1990. Asimismo, se fija el marco para llevar a cabo actuaciones coordinadas enfocadas a alcanzar esa neutralidad climática en los diferentes sectores económicos de nuestro país y se abordan factores transversales que pueden resultar cruciales para lograr dicho propósito, como el papel de la ciudadanía, la digitalización y la investigación y la innovación sostenibles (MITECO 2020).



En el caso concreto de nuestro país, en el marco al que nos venimos refiriendo, ha recibido especial atención la transición energética. El sector eléctrico representa en la actualidad el segundo con mayores emisiones de CO₂ en el ámbito nacional, tan solo superado por el del transporte (Ritchie, Rosado y Roser 2024a). La electricidad es un recurso cuyo uso está muy extendido, y se emplea tanto por la industria como para uso doméstico. Por ello, se consideró necesario centrarse de forma directa en dicho sector, para lo cual se aprobó la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de Cambio Climático y Transición Energética, también conocida como *ley del cambio climático*⁵. En ella se establecieron cuatro metas fundamentales:

- Reducir para el 2030 las emisiones de GEI del conjunto de la economía española en, al menos, un 23% respecto del año 1990.
- Alcanzar en el 2030 una penetración de energías de origen renovable en el consumo final de, al menos, un 42%.
- Alcanzar en el 2030 un sistema eléctrico con, al menos, un 74% de generación a partir de energías de origen renovable.
- Mejorar la eficiencia energética mediante la disminución del consumo de energía primaria en, al menos, un 39,5%, con respecto a la base establecida conforme a normativa comunitaria.

Así pues, en el campo legislativo se está promoviendo una reformulación de nuestras principales actividades económicas con el fin de reducir de forma drástica las emisiones de CO₂ tanto en el ámbito nacional como en el internacional. No obstante, si bien los objetivos son claros de forma ge-

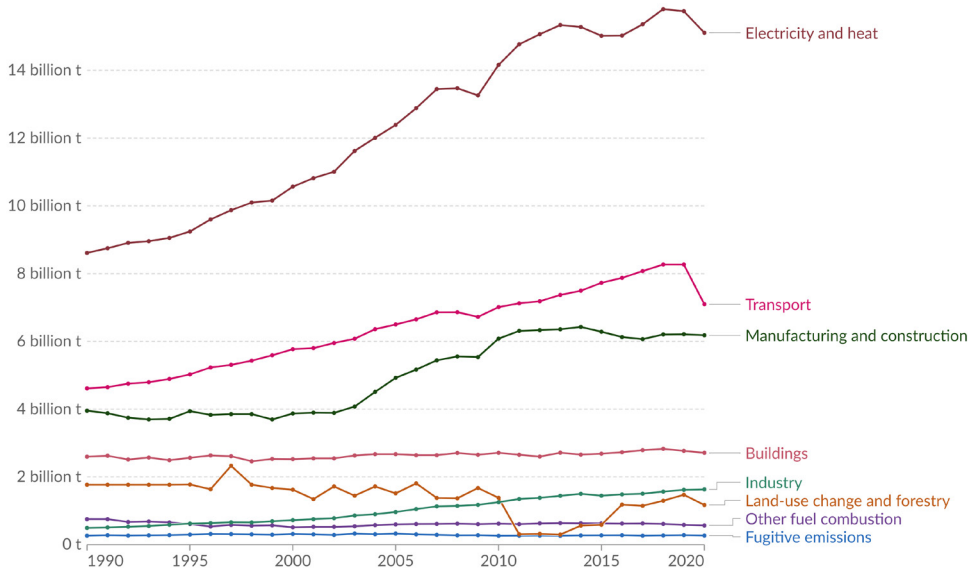
neral, resulta fundamental establecer medidas regulatorias y hojas de ruta específicas para cada uno de los sectores y actividades que conforman la economía –como en el caso de la ley de cambio climático–. Para ello, según se verá a continuación, deviene esencial comprender de qué modo particular esos distintos sectores contribuyen a la emisión de CO₂ y qué alternativas existen para reducir el impacto de esta última.

Emisiones por sectores: opciones de descarbonización

A la vista de la gravedad de la situación actual, resulta fundamental observar qué actividades humanas generan mayor cantidad de emisiones de CO₂. Según los datos recogidos por Ritchie, Rosado y Roser (2024a) (véase la **Figura 4**), de los aproximadamente 37.000 millones de toneladas emitidos en el mundo en el 2020, la producción y consumo de electricidad fue la actividad que aportó mayor volumen, con un total de unos 15.000 millones de toneladas (alrededor del 41% del total). Le siguen el transporte (7,29%), la construcción (6,22%) y la industria (3,13%). Esta información, no obstante, puede variar según el escenario, ya que, por ejemplo, en el caso de España (véase la **Figura 5**), la principal actividad emisora de CO₂ durante el mismo periodo fue el transporte.

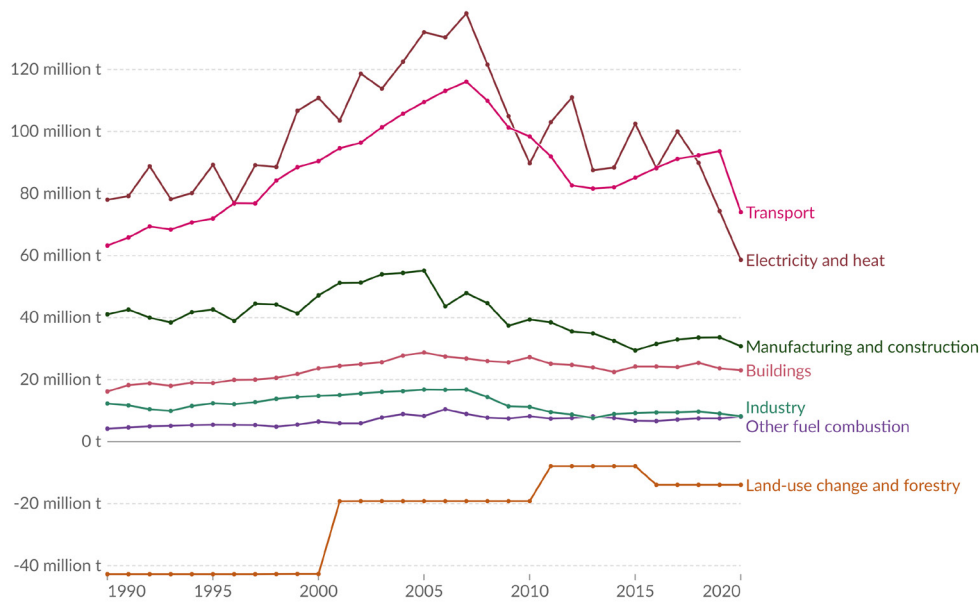
⁵ La norma fue publicada en el Boletín Oficial del Estado n.º 121 de 21 de mayo del 2021 (<https://www.boe.es/buscar/pdf/2021/BOE-A-2021-8447-consolidado.pdf>).

Figura 4. Emisiones globales de CO2 por sectores en el mundo⁶



Fuente: Ritchie, Rosado y Roser (2024a).

Figura 5. Emisiones de CO2 por sectores en España



Fuente: Ritchie, Rosado y Roser (2024a).

⁶ Debe tenerse en cuenta que ambas figuras (4 y 5) están en inglés, por lo que las cantidades señaladas como “billion” corresponden en español a miles de millones y las señaladas “trillion” al billón español.

En los apartados siguientes, nos centraremos en los sectores que aparecen como principales emisores de CO₂, con el fin de comprender cuáles de sus actividades son especialmente nocivas. Además, se ofrecerán ejemplos de algunas prácticas y tecnologías que se están implementando en cada uno de ellos y que pueden resultar de interés para la descarbonización gradual e, incluso, total de cada actividad.

Electricidad

Tal como se ha visto, según los datos proporcionados por Ritchie, Rosado y Roser (2024a), la producción y consumo de electricidad fue, en el 2020, la actividad humana con mayor volumen mundial de emisiones de CO₂, con un 41% del total. Cabe destacar, no obstante, que en esta cifra se incluyen las derivadas de la producción de la electricidad posteriormente utilizada por otros sectores, como los hogares, las empresas o las fábricas. Por tanto, si este sector registra un porcentaje mayor que el resto se debe, en cierta medida, al hecho de que las emisiones no se asignan a las actividades que, en realidad, utilizan la electricidad generada. En este sentido, según indica la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA 2024), también resultaría de interés realizar un análisis que tuviera en cuenta el sector de uso final, con el fin de comprender mejor estos datos.

En cualquier caso, los elevados niveles de emisiones de CO₂ en este ámbito derivan sobre todo de la quema de combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural, para la producción de electricidad. La extracción de energía procedente de estas fuentes representa casi un 60% del total requerido y es especialmente nociva no solo a causa del CO₂ generado, sino también porque es responsable de la liberación de grandes cantidades –si bien algo menores que las anteriores– de otros GEI como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O).

En las **centrales eléctricas de carbón**, el proceso consiste en la quema de esta sustancia fósil en el interior de una turbina, lo cual provoca una corriente de gases calientes que la hacen girar. Al mismo tiempo, esta está conectada a un generador al que, a su vez, hace también girar para crear así una corriente eléctrica. La electricidad generada en este tipo de plantas representó el 35% de la producción mundial total en el 2022 (Ritchie y Rosado 2024).

Por su parte, las **centrales eléctricas de gas natural** funcionan de un modo muy similar a las anteriores. La diferencia es que en ellas se hace girar la turbina mediante el vapor de agua generado gracias a la combustión de gas natural. Además, con el calor residual resultante del giro de la turbina de la primera fase, se alimenta una caldera que produce va-

por de agua, que después es utilizado para hacer mover una segunda turbina, cuya actividad produce también electricidad. La producción eléctrica por este medio representó en el 2022 un 22,5% del total (Ritchie y Rosado 2024).

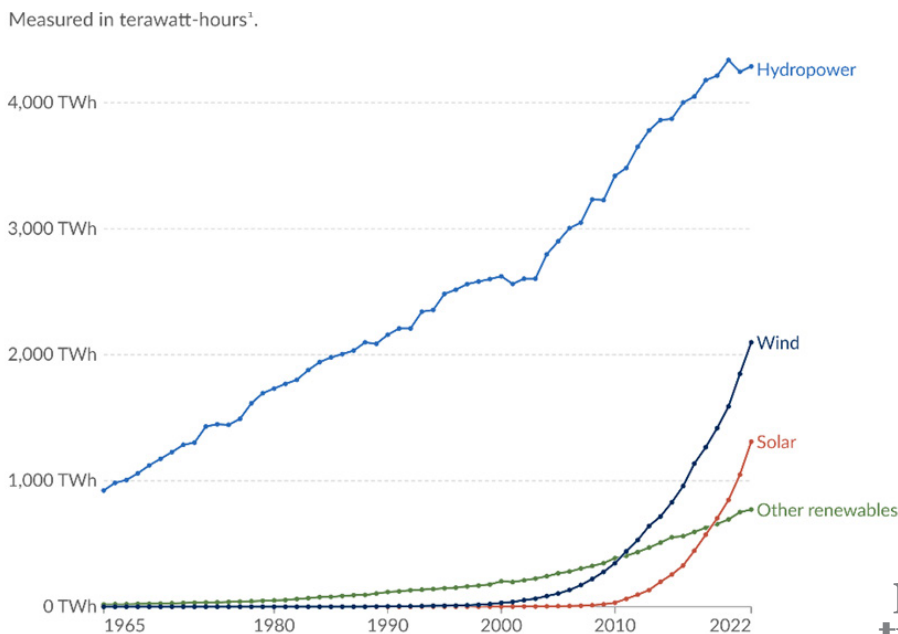
La problemática que presentan ambos procesos radica, principalmente, en que tanto la combustión de carbón como la de gas natural, además de producir energía térmica, generan al mismo tiempo grandes cantidades de CO₂. A este factor hay que añadir el hecho de que se trata de actividades con graves consecuencias medioambientales en distintos ámbitos, puesto que ambos procesos emiten contaminantes atmosféricos adicionales y generan residuos sólidos y líquidos. Asimismo, aquellos requieren una enorme cantidad de agua para el enfriamiento de la maquinaria, lo cual afecta también a la disponibilidad de este recurso.

Sin embargo, parece que se está consolidando en el sector una alternativa a los combustibles fósiles: la obtención de electricidad a partir de combustibles no fósiles como la energía nuclear y otras de tipo renovable como la hidroeléctrica, la biomasa, la eólica o la solar. En el 2022, la producción eléctrica a través de estas fuentes representó el 38% del total, e, incluso, alcanzó el 90% en Suecia, Noruega, Francia, Paraguay, Islandia y Nepal, entre otros países (Ritchie y Rosado 2024).

Respecto a los distintos tipos de energía renovable, según se puede apreciar en la **Figura 6**, la hidroeléctrica es actualmente la principal fuente de origen en el mundo (51%) y representa, además, una de las más antiguas. A esta le siguen la eólica (25%) y la solar (15%). El 9% restante proviene de otras fuentes de energía renovables como la biomasa, producida a través de la quema de carbón vegetal, desechos orgánicos y residuos de los cultivos, o la geotérmica, obtenida del aprovechamiento del calor interno de la Tierra (Ritchie, Rosado y Roser 2024b).

La producción y consumo de electricidad fue, en el 2020, la actividad humana con mayor volumen mundial de emisiones de CO₂, representando un 41% del total.

Figura 6. Generación de energía renovable por fuente



Fuente: Ritchie, Rosado y Roser 2024b.

De forma paralela, también se trabaja para desarrollar la energía nuclear, la cual, a pesar de su tendencia decreciente desde 1985 y de representar hoy tan solo un 10% de la producción mundial (Ritchie y Rosado 2024), constituye todavía una alternativa sostenible sobre la que se depositan grandes expectativas.

En lugar de utilizar combustibles fósiles, para producir la electricidad, la energía nuclear se libera desde el núcleo de los átomos a través de dos procedimientos distintos:

- **Fisión.** Fenómeno que sucede con la división de los átomos en dos o más núcleos menores. Cada vez que esta reacción ocurre, se produce una liberación de energía en forma de calor y radiación. Este calor se convierte en electricidad en una central nuclear de un modo similar al expuesto más arriba para los combustibles fósiles como el carbón y el gas. Es decir, calienta el agente refrigerante del reactor, normalmente agua, para producir un vapor que después se canaliza hacia las turbinas, que comienzan a girar. Este movimiento activa un generador eléctrico conectado a ellas y crea así electricidad con bajas emisiones de carbono (Galindo 2022).
- **Fusión.** Proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros se combinan para formar uno más pesado, liberando enormes cantidades de energía. Desde que se estableció

En el 2022, la producción eléctrica a través de combustibles no fósiles como la energía nuclear y otros de tipo renovable como la hidroeléctrica, la biomasa, la eólica o la solar representó el 38% del total.

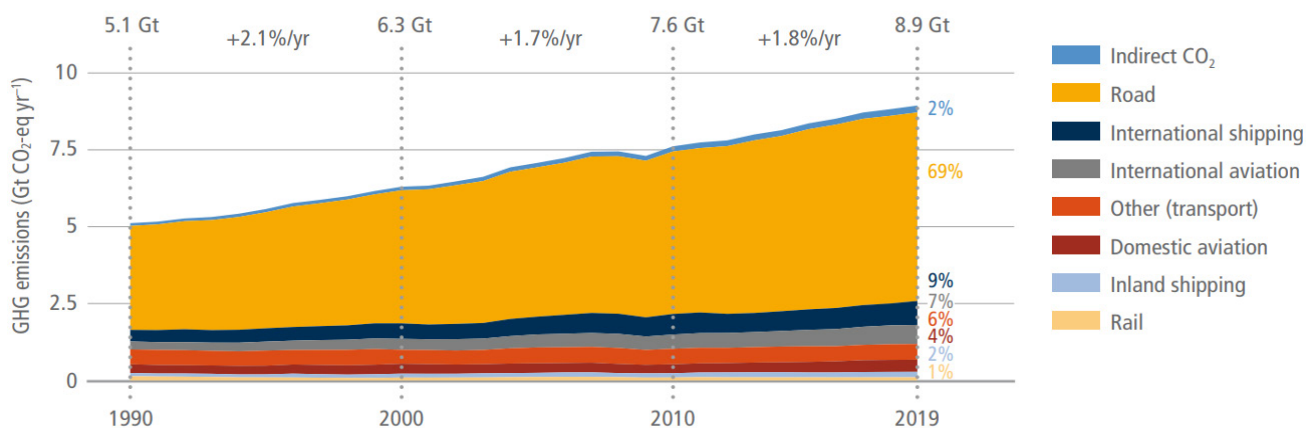
la teoría de la fusión nuclear en la década de 1930, ha existido un gran interés por recrearla y aprovecharla, ya que, en caso de poder replicarse a escala industrial, constituiría una fuente de energía limpia, segura, asequible y prácticamente ilimitada, que satisfaría con creces la demanda mundial. En este sentido, podría generar cuatro veces más energía por kilogramo de combustible que la fisión (utilizada en las centrales nucleares) y casi cuatro millones de veces más que la quema de petróleo o carbón. Ante estas prometedoras previsiones, en el 2020 se inauguró en Francia la instalación internacional de fusión más grande del mundo, llamada *ITER*. Se trata de un proyecto que tiene como objetivo demostrar la viabilidad científica y tecnológica de este proceso para la producción de energía y poner a prueba la tecnología y los conceptos para futuras plantas. Se prevé que comience a realizar sus primeros experimentos a mediados de esta década y que, a partir del 2036, se lleven a cabo los experimentos con la máxima potencia (Barbarino 2023).

Transporte

El transporte es otra de las actividades humanas que genera mayor cantidad de GEI, sobre todo debido a la quema de combustibles fósiles. En este sector, más del 94% del carburante utilizado procede del petróleo –gasolina, diésel y otros derivados–, cuya combustión da lugar a grandes cantidades de CO₂ que van a parar de forma directa a la atmósfera. Según los datos de Ritchie, Rosado y Roser (2024a), representa aproximadamente el 20% de las emisiones mundiales de este gas. En concreto, si se toman como referencia los datos recogidos en el 2019 por el IPCC (2022), la mayor fuente de emisiones dentro del sector fue con gran diferencia el transporte por carretera de pasajeros y mercancías, con un 69% del total. El transporte marítimo internacional fue la segunda, con el 9%, y la aviación internacional ocupó el tercer lugar con el 7% (véase la **Figura 7**).

En el sector del transporte, más del 94% del carburante utilizado procede del petróleo –gasolina, diésel y otros derivados–, cuya combustión da lugar a grandes cantidades de CO₂ que van a parar de forma directa a la atmósfera.

Figura 7. Emisiones globales de GEI en el sector del transporte



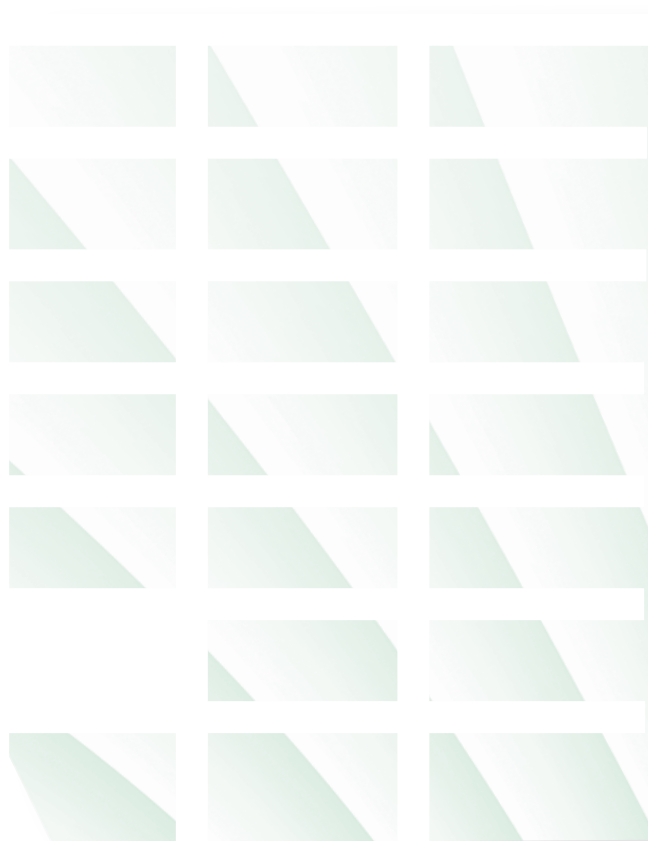
Fuente: IPCC (2022).

A causa de esta gran diferencia, las estrategias de descarbonización que se aplican al transporte se enfocan de un modo especial a los turismos y los vehículos comerciales ligeros. En la UE, el Parlamento Europeo y el Consejo⁷ adoptaron el Reglamento (UE) 2023/851, que pretende reforzar las normas de comportamiento en materia de emisiones de CO₂ para los referidos tipos de vehículos nuevos. La regulación establece el objetivo de eliminar las generadas por estos medios de transporte antes del 2035 y, para lograrlo, se incide tanto en el aumento significativo del desarrollo y la

popularidad de los vehículos limpios como en la promoción del uso de combustibles alternativos.

Respecto al primer aspecto, los coches eléctricos representan hoy el vehículo limpio más desarrollado. Dentro de esta categoría se incluyen tanto los vehículos eléctricos de batería o BEV (battery electric vehicle) como los vehículos eléctricos híbridos enchufables o PHEV (plug-in hybrid electric vehicle). Ambos están penetrando de forma gradual en el mercado de la UE: desde su lanzamiento, se ha experimentado un incremento

⁷ Reglamento (UE) 2023/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de abril del 2023, por el que se modifica el Reglamento (UE) 2019/631 en lo que respecta al refuerzo de las normas de comportamiento en materia de emisiones de CO₂ de los turismos nuevos y de los vehículos comerciales ligeros nuevos, en consonancia con la mayor ambición climática de la Unión, *Diario Oficial de la Unión Europea* L110, 25 de abril del 2023, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0851>.



constante en el número de nuevas matriculaciones, desde las apenas 600 que tuvieron lugar en el 2010 hasta alrededor de las 1.740.000 en el 2021, lo cual representa un 18% del total. Estas cifras siguieron creciendo en el 2022, cuando casi el 22% de los turismos matriculados fueron eléctricos (AEMA 2023).

A pesar de estos datos, los BEV representan en la actualidad tan solo un 1,2% del todo el parque automovilístico europeo (AEMA 2023). Para promover su utilización, desde distintas instancias se están implementando diversas medidas. Así, por ejemplo, el Parlamento Europeo ha aprobado una normativa que dispone que, en el 2026, haya una estación de recarga para estos vehículos con una potencia mínima de 400 kilovatios cada 60 kilómetros, que se incrementa a 600 kilovatios para el 2028 (Parlamento Europeo 2023c).

Sin embargo, los vehículos eléctricos no están exentos de controversia, ya que, tal como señalan desde el MIT Climate Portal (Moseman 2022), a pesar de que muchos de ellos llevan distintivos de cero emisiones, tal afirmación no es del todo cierta. Aunque, al ser únicamente eléctricos no emiten GEI a través de sus tubos de escape, sí que generan cantidades considerables de CO₂ durante su proceso de producción

y carga, en particular durante la fabricación de sus grandes baterías de litio. La extracción y la fundición de minerales como el litio, el cobalto y el níquel, fundamentales para aquellas, requieren la utilización de combustibles fósiles y producen alrededor de un 80% más de emisiones que las derivadas de la construcción de un automóvil de gasolina.

No obstante, este hecho no impide que los vehículos eléctricos constituyan una opción interesante para lograr la descarbonización parcial del sector automovilístico. También de acuerdo con el MIT Climate Portal (Moseman 2022), pese a que su fabricación implica mayores emisiones, resulta importante considerar que la mayor parte del CO₂ generado por los automóviles de gasolina se origina durante su vida útil, tras salir de la planta de producción. Los datos proporcionados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE s.f.) muestran que, mientras que las emisiones de un coche de gasolina ascienden a 12.594 libras, las de un PHEV son de 4.763 libras –de las cuales 1.824 corresponden a la parte eléctrica y 2.939, a la de gasolina– y las de los BEV, de 2.727 libras. Así, estos últimos representan una opción menos perjudicial, al compensar a lo largo de su ciclo de vida la mayor liberación de CO₂ asociada a su producción.

Por otro lado, en lo que respecta al segundo de los aspectos recogidos en el citado Reglamento (UE) 2023/851 –los combustibles alternativos–, tan solo el 5,4% de los coches y furgonetas que circulan hoy en la UE los utilizan (Comisión Europea 2024). El Parlamento Europeo reconoce que estos “sirven, al menos parcialmente, de sustituto de los combustibles fósiles en el suministro de energía para el transporte, contribuyen a su descarbonización y mejoran el rendimiento medioambiental del sector del transporte” (Directiva 2014/94/UE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre del 2014, relativa a la Implantación de una Infraestructura para los Combustibles Alternativos)⁸. Asimismo, desde esta instancia se reconocen –además de la electricidad, ya mencionada– seis tipos de combustibles alternativos:

- **Biocombustibles.** Estos combustibles biodegradables se fabrican a partir de aceites vegetales, grasas animales o grasas recicladas. Entre los de tipo alternativo, son, en la actualidad, de los más importantes, puesto que representan el 4,4% del combustible en el transporte de la UE (Comisión Europea 2024).
- **Combustibles sintéticos y parafínicos.** Se fabrican con la utilización de biomasa o gas natural, así como de aceites vegetales o grasas animales. Sus características

⁸ Publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea L307/1, 28 de octubre del 2014 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0094>).

técnicas son las mismas que las de los combustibles convencionales y son totalmente compatibles con los sistemas de combustión existentes. No obstante, su elevado coste de producción actual limita su introducción en el mercado (Comisión Europea, s. f. a).

- **Gas licuado de petróleo (GLP).** Se obtiene del petróleo y el gas natural. A diferencia del GNC y el GNL, no tiene el metano como base, sino que consiste en una mezcla de butano (40%) y propano (60%). Emite un 35% menos de CO₂ que el carbón y un 12% menos que el petróleo, y casi no genera partículas finas peligrosas (Parlamento Europeo 2023a). En la actualidad, se trata del combustible alternativo más utilizado en el mundo, ya que representa casi un 50% de los de este tipo que alimentan los vehículos de carretera en la UE (Comisión Europea 2024).
- **Gas natural licuado (GNL).** Procede de la purificación del gas natural (normalmente, metano), que se sobre-enfría para convertirlo en líquido. En fechas recientes, se ha determinado que carece de potencial significativo para reducir las emisiones, por lo que ha sido descartado en la UE para su uso en el transporte por carretera (Parlamento Europeo 2023a).
- **Gas natural comprimido (GNC).** Se produce mediante la compresión del gas natural, por lo general, metano. Representa casi un 8% del total de combustibles alternativos en la UE (Comisión Europea 2024).
- **Hidrógeno.** En la actualidad, su implementación como tal se encuentra en la fase inicial. En la UE se cuenta solo con un centenar de vehículos pesados de carretera, a modo de prueba piloto. Este elemento químico se puede extraer tanto del agua como de compuestos orgánicos, y su impacto medioambiental depende, en gran medida, de cómo se produzca; es decir, si se hace a través de fuentes renovables como la energía solar, la eólica o el biogás, o bien mediante la utilización de combustibles fósiles (Parlamento Europeo 2023a).

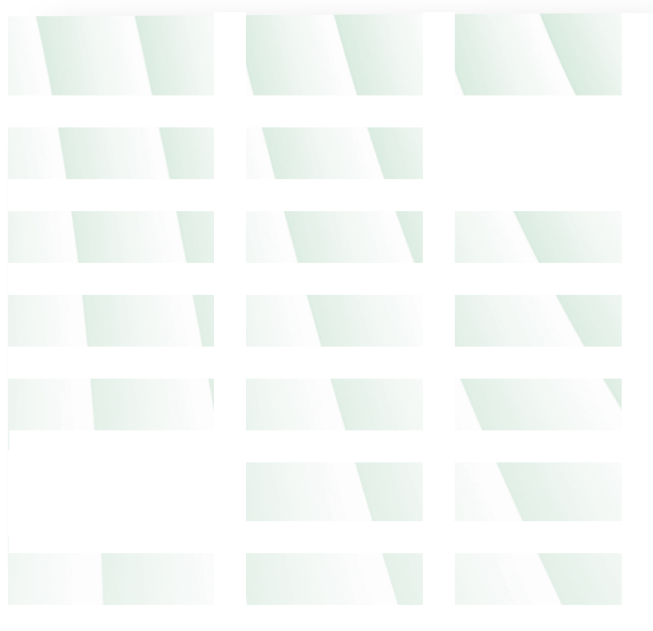
Por su parte, la aviación representa el 13,4% de las emisiones totales de CO₂ del transporte de la UE (Parlamento Europeo 2024). Entre las principales estrategias de descarbonización implementadas en esta área, destaca la introducida por el Parlamento Europeo conocida como *comercio de emisiones de la aviación*. Se trata de un sistema a través del cual los participantes deben pagar costes adicionales en caso de exceder las emisiones de GEI permitidas. Además, también se está promoviendo el uso de combustibles sostenibles. Desde el Parlamento y el Consejo Europeo se pretende fomentar

la utilización de estos carburantes, entre ellos, el hidrógeno procedente de fuentes de energía renovables, otros de origen no biológico (por ejemplo, el amoníaco verde) y los biocombustibles avanzados. El objetivo fijado al respecto es lograr que, para el 2050, el 70% de todo el combustible de la aviación en los aeropuertos de la UE sea sostenible (Parlamento Europeo 2023b).

Por último, en lo que respecta al transporte marítimo, también se prevé la creación de un sistema de comercio de emisiones propio. Asimismo, a pesar de representar el menor de los emisores de GEI en la UE, desde el Parlamento Europeo se han propuesto una serie de medidas orientadas a lograr la descarbonización en esta área (Parlamento Europeo 2023b), entre ellas, la eliminación progresiva de los fuelóleos pesados, fomentada mediante exenciones fiscales para los combustibles alternativos; la descarbonización, digitalización y automatización de los puertos europeos; el acceso regulado a los puertos de la UE para los buques más contaminantes; y otras mejoras técnicas como la optimización de la velocidad de los buques, las innovaciones en hidrodinámica o los nuevos sistemas de propulsión.

En definitiva, el transporte es responsable de cerca de una cuarta parte de las emisiones de CO₂ en la UE (Comisión Europea, s. f. d). Es por ello por lo que, tal como se ha visto, este sector ocupa un lugar prioritario en las distintas estrategias de descarbonización que se plantean. Al respecto, en abril del 2023 entró en vigor el Reglamento (UE) 2023/851 mencionado, en el que se estipuló de forma generalizada una “reducción interna de las emisiones netas de gases de efecto invernadero de, al menos, un 55% con respecto a los niveles de 1990, de aquí al 2030”. Para lograr la neutralidad climática, se incide de modo concreto en la necesidad de centrarse en la descarbonización del sector del transporte, para el cual se ha establecido como objetivo la reducción de sus emisiones en un 90% para el 2050.

En abril del 2023 entró en vigor el Reglamento (UE) 2023/851 en el que se estipuló el objetivo de reducir las emisiones del sector del transporte en un 90% para el 2050.



Industria

Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA 2023), las emisiones industriales de CO₂ se han incrementado alrededor de un 70% desde el 2000, como consecuencia, principalmente, de la creciente demanda mundial de bienes. La problemática radica en que la gran mayoría de los procesos de esta naturaleza dependen de la utilización de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. Al mismo tiempo, requieren un gran consumo de energía, lo que contribuye de forma indirecta a las emisiones derivadas de la producción de electricidad. Asimismo, dentro del sector existen también numerosos procesos que, si bien no implican combustión, producen CO₂ a través de reacciones químicas.

Sin embargo, a la hora de explorar la industria, resulta fundamental centrarse, en concreto, en la manufacturera, la cual representa entre el 82% y el 96% de las emisiones de CO₂ del sector (Sizirici *et al.* 2021) y el 17% de las totales mundiales (Ritchie, Rosado y Roser 2024a). En ella, destacan de forma especial los procesos para la obtención de materiales de construcción (minerales no metálicos, petróleo, mortero de cemento, hierro, acero u hormigón), así como su transporte. En particular, entre las actividades que generan mayor cantidad de estas emisiones, se encuentran las destinadas a la producción de los siguientes materiales (Sizirici *et al.* 2021):

- **Cal.** Su fabricación requiere el procesamiento térmico a elevada temperatura de la piedra caliza (CaCO₃) para, más tarde, transformarla en cal viva (CaO) de gran pureza, proceso que libera grandes cantidades de CO₂ como resultado de la reacción química.

- **Cemento.** En el ámbito global, su elaboración representa el 5% de las emisiones totales de CO₂. Estas surgen, en su mayoría, en la fase de obtención del clínker, un producto intermedio a partir del cual se fabrica el cemento, que se produce mediante la mezcla de cal viva y arcilla y su posterior cocción en hornos a alta temperatura, que dan lugar a la mayor parte de las emisiones.
- **Asfalto.** Esta sustancia se utiliza sobre todo como aglutinante de los materiales de pavimento. La producción de estos ligantes asfálticos comporta un elevado consumo de energía en las distintas fases que conforman el proceso, desde la extracción del petróleo crudo, su transporte y su refinación hasta la mezcla y el calentamiento finales. Ello requiere, a su vez, una gran producción de electricidad, lo cual provoca de manera indirecta las emisiones de CO₂, en este caso, implícitas.
- **Acero.** Su producción comienza con la reacción entre el mineral de hierro y un agente reductor, el carbón coqueable, en los altos hornos. De ahí surge el hierro fundido, que se convierte en acero en una etapa posterior. La fase inicial es el principal contribuyente a las emisiones de CO₂ (aproximadamente, entre el 70% y el 80%) de todo este proceso. La fabricación de acero representa el 6% de las emisiones mundiales.

El principal problema que presenta la industria manufacturera consiste en que, tal como señala el Global CCS Institute (2022), posee unas características específicas que hacen difícil su descarbonización. En este sentido, forma parte de las industrias llamadas *hard-to-abate*. Un ejemplo paradigmático de ello es el caso de la producción de cemento, en la cual el CO₂ es un subproducto químico inevitable de la reacción de calcinación, la cual constituye el núcleo del proceso. Además, este material se fabrica a temperaturas superiores a los 600 grados, que se generan con la quema de combustibles fósiles. Lo complejo de la situación reside en que, aún en el caso de que se utilizasen en los hornos de cemento biocombustibles u otras fuentes de calor con bajas emisiones de carbono asociadas, este CO₂ seguiría liberándose. La doble procedencia del gas, así como la enorme demanda mundial del producto final, hacen que, tal como se ha visto, las de esta industria sean tan elevadas.

Por esta razón, se está trabajando para desarrollar e instaurar en este sector una novedad tecnológica que resulta aplicable también a otros y que se conoce como *captura y el almacenamiento de carbono o CCS (carbon capture and storage)*. Consiste en un conjunto de tecnologías destinadas a capturar, transportar y almacenar de forma permanente el CO₂ que, de otro modo, se liberaría en la atmósfera (Comi-

sión Europea, s. f. c). El proceso consta de dos etapas fundamentales: en la primera, se lleva a cabo la captura del gas producido durante distintos procesos industriales, antes de que este llegue a la atmósfera. Para ello, existen tres tipos de procedimientos diferentes:

- **Precombustión.** Tal como su nombre indica, consiste en un método a través del cual se separa y captura el CO₂ de los combustibles fósiles antes de su combustión. Para tal fin, en primer lugar, el combustible es gasificado y da lugar a lo que se conoce como un gas de síntesis, compuesto por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂). Después, este es sometido a una reacción química a través de la cual el CO se convierte en CO₂. A continuación, se utiliza un disolvente físico para separar el H₂ y el CO₂. De este modo, es posible capturar el CO₂ de los combustibles fósiles antes de que se produzca su combustión. Todo ello redundará en fuentes de energía más limpias y con menores emisiones de GEI (C2ES, s. f.). Este procedimiento se utiliza sobre todo en la producción de fertilizantes, combustibles gaseosos químicos y energía (BGS, s. f.).
- **Postcombustión.** Se refiere a la separación del CO₂ de los demás gases derivados de la combustión de los combustibles fósiles. Su complejidad consiste en que la quema de estos produce una mezcla de gases compuesta por dinitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y oxígeno (O₂), así como una gran cantidad de óxidos de azufre (SOx) o de nitrógeno (NOx) y metales pesados, entre otros compuestos. En primer lugar, una parte de estos componentes se elimina gracias a determinados tipos de tecnologías y, después, mediante disolventes químicos, se separa de forma selectiva el CO₂ de la mezcla de gases restante (Global CCS Institute 2012b).
- **Oxicombustión.** En este proceso se quema el combustible utilizando oxígeno puro en lugar de aire. Para ello, resulta necesario llevar a cabo un proceso previo en el que se elimina el nitrógeno del aire para generar el oxígeno puro. Como resultado, el gas emitido en la combustión está compuesto por un 90% de CO₂. Pese a que el 10% restante está formado por otros elementos (oxígeno [O₂], dinitrógeno [N₂] y argón [Ar]), estos pueden separarse fácilmente del CO₂ mediante la reducción de esta composición resultante a una temperatura a la que el CO₂ se condensa, pero las impurezas no (Global CCS Institute 2012a).

En la segunda etapa del proceso de CCS, tras la captura exitosa del CO₂, resulta fundamental transportarlo de un modo seguro hasta la ubicación destinada a su almacenamiento. Para facilitar esta tarea, con independencia del método de captura que se haya utilizado, el gas se suele comprimir hasta

llevarlo a un estado líquido, lo cual reduce su volumen con respecto a la forma gaseosa. El CO₂ líquido se traslada entonces mediante tanques, tuberías y embarcaciones hasta el lugar de almacenamiento.

Pese a sus importantes implicaciones técnicas y a la gran precisión que requiere su ejecución, este proceso presenta un elevado nivel de seguridad, ya que el CO₂ no forma mezclas inflamables o explosivas con el aire, como sí ocurre, por ejemplo, con el petróleo y el gas. Además, aquel no es tóxico para los seres humanos ni para la vida silvestre cuando se libera en el aire, excepto en el caso muy improbable de que la liberación sea muy rápida y en cantidades extremadamente altas. No obstante, tal como apunta el Global CCS Institute (s. f. b), si el procedimiento ya se lleva a cabo a diario en muchas partes del mundo, su implementación a escala mundial no se está produciendo al ritmo esperado, ya que requiere una gran inversión en infraestructuras de transporte.

Por último, una vez que el CO₂ ha sido transportado, resulta fundamental culminar el proceso con su almacenamiento de un modo seguro que evite su liberación a la atmósfera. Para ello, se recurre a una técnica que funciona de forma efectiva desde hace décadas: el almacenamiento geológico, que consiste, básicamente, en inyectar el CO₂ capturado en formaciones rocosas –conocidas como *formaciones de almacenamiento*– bajo tierra, en general a profundidades superiores a un kilómetro.

Las formaciones de almacenamiento suelen poseer las siguientes características (Global CCS Institute, s. f. a):

- **Porosidad.** Presentan huecos de tamaño milimétrico que permiten el almacenamiento del CO₂.
- **Permeabilidad.** Los poros de las rocas están conectados, de modo que el CO₂ se mueve y se expande por toda la formación de un modo veloz.
- **Carácter permanente.** Incluyen una capa de roca o barrera extensa alrededor de la formación que ayude a garantizar que el CO₂ se contiene en ella de forma permanente.

Una vez se ha identificado el lugar ideal para realizar la inyección, el CO₂ en estado líquido se bombea a través de un pozo hasta la formación de almacenamiento seleccionada. Una vez allí, gracias a varios procesos y reacciones químicas, acaba convirtiéndose en un mineral sólido de forma permanente. Cabe destacar que, tal como aseguran desde Global CCS Institute (s. f. a), casi todas las regiones del mundo –aunque en diferente medida– disponen en su subsuelo de zonas aptas para retener el CO₂.

En la actualidad, ya se han inyectado con éxito cerca de 300 millones de toneladas de CO₂ en formaciones de almacenamiento subterráneas, y se sabe que hay más recursos de almacenamiento subterráneo de los necesarios para cumplir los objetivos climáticos. Según estimaciones recientes, la capacidad del subsuelo del planeta es superior a 14.000 gigatoneladas de CO₂. Para poner esta cifra en contexto, téngase en cuenta que, en el 2022, las emisiones mundiales de CO₂ ascendieron a 37 gigatoneladas. (Global CCS Institute, s. f. a)

Asimismo, frente a las dudas acerca de la seguridad de estas prácticas, un estudio reciente (Kivi *et al.* 2022) ha demostrado que inyectar miles de millones de toneladas de CO₂ bajo tierra presenta un riesgo muy bajo de escape a la superficie y que, en el peor de los casos, según las simulaciones, este permanecería en las profundidades del subsuelo durante millones de años, incluso si las rocas se fracturaran (CSIC 2023).

Sin perjuicio de lo anterior, también existe la posibilidad de que el CO₂ capturado, en lugar de almacenarse bajo tierra, se reutilice. Por un lado, puede emplearse para la producción de combustibles sintéticos, como el metano o el metanol, o líquidos, como el diésel o la gasolina sintética, los cuales podrían constituir alternativas a los combustibles fósiles más tradicionales. Por otro lado, puede aprovecharse para la fabricación de algunos materiales de construcción, como el cemento, o de ciertos productos químicos, como los materiales poliméricos. Asimismo, es posible su utilización en procesos industriales, como la producción de bebidas carbonatadas, o en la industria alimentaria, para impulsar la carbonatación de diversos productos. También puede resultar de utilidad en la elaboración de productos químicos y materiales, por ejemplo, plásticos y polímeros, o en instalaciones agrícolas o invernaderos para mejorar el crecimiento de las plantas a través de la fotosíntesis, lo que permitiría, además, reducir el uso de fertilizantes.

El almacenamiento de carbono consiste en un conjunto de tecnologías destinadas a capturar, transportar y almacenar subterráneamente el CO₂ que, de otro modo, se liberaría en la atmósfera.

Sin embargo, pese a los evidentes beneficios de este proceso, su implementación –tanto si el CO₂ es almacenado como reutilizado– se enfrenta hoy a barreras de distinta índole: tecnológicas, económicas, institucionales, ecológicas, ambientales y socioculturales. Por este motivo, en la actualidad, las tasas mundiales de implementación del CCS están muy por debajo de las necesarias para limitar el calentamiento global a un máximo de entre 1,5 y 2 grados. Tales barreras, tal como afirma el IPCC (2022), se podrían reducir si se establecieran condiciones favorables como instrumentos políticos, mayor apoyo público e innovación tecnológica.

Agricultura

Este sector y el uso de la tierra son también responsables de una parte importante de las emisiones de GEI, tal como ya se ha señalado, por diversos motivos. Por ejemplo, la producción ganadera genera un gran volumen de metano. El ganado rumiante, como vacas, ovejas y cabras, produce dicho gas durante la digestión entérica. Este proceso implica un sistema de fermentación que tiene lugar en su estómago, en concreto, en el rumen, durante el cual los microorganismos presentes en este descomponen los alimentos fibrosos. Como subproducto se genera el metano, que posteriormente es liberado a la atmósfera a través de las flatulencias de los animales. Para abordar esta problemática se están desarrollando tanto investigaciones sobre posibles dietas alimenticias para el ganado que reduzcan la producción de este gas como tecnologías innovadoras más eficientes para la gestión del estiércol.

En lo que respecta a la agricultura, por un lado, la utilización de fertilizantes químicos implica un aumento de las concentraciones de óxido nitroso en la atmósfera, además de provocar efectos adversos en el medio acuático y causar la degradación del suelo. En este sentido, cabe incidir en que, en relación con el calentamiento global, la salud de la tierra resulta fundamental, ya que esta puede servir como un importante sumidero de carbono. Por otro lado, la cuestión más importante es que, a causa del incremento de la demanda en la industria alimentaria, la desaparición de ecosistemas naturales es cada vez mayor. Tal como muestra la ONU (Meza 2022), la destrucción de los bosques tropicales para cultivar soja destinada a la alimentación animal, así como para crear pastos para el ganado, aumenta a un ritmo alarmante. Esta creciente deforestación no solo disminuye la capacidad de absorción del CO₂ atmosférico, sino que también provoca la liberación de grandes cantidades de dicho gas –se estima que serían casi 9.000 millones de toneladas anuales–, que queda almacenado tanto en la vegetación como en el suelo de estos ecosistemas (Meza 2022).

Hoy en día, casi la mitad (44%) de la tierra habitable del planeta se utiliza para la agricultura, lo cual representa una extensión total de alrededor de 5 veces el tamaño de Estados Unidos. Esta superficie se dedica a dos usos principales: el cultivo (31%) y los pastizales (69%), que incluyen los prados y pastos destinados a la cría de ganado. No obstante, si se añaden a estos últimos las tierras de cultivo utilizadas para la alimentación animal, la ganadería representa en realidad el 80% del uso de la tierra agrícola (Ritchie y Roser 2024). Asimismo, se prevé que el suelo mundial dedicado a la agricultura se incremente en unos 200 millones de hectáreas entre el 2015 y el 2050, con el fin de satisfacer la demanda de una población creciente. Tal como menciona la Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (2020), junto con la expansión urbana y otros cambios, lo anterior puede suponer la pérdida de alrededor de 300 millones de hectáreas de bosques y otros ecosistemas naturales.

Frente a esta situación, la ONU trata de fomentar, como primer paso lógico, una transición hacia dietas locales basadas en vegetales (Meza 2022). Según se ha indicado, el 80% de la tierra agrícola se dedica a la alimentación del ganado. Sin embargo, en el ámbito mundial, este representa solo el 17% de las calorías y el 38% de las proteínas consumidas (Ritchie y Roser 2024). Asimismo, se apunta a la problemática relativa a las subvenciones sectoriales (Meza 2022). Estas últimas superan cada año los 700.000 millones de dólares; sin embargo, solo alrededor del 15% de dicho importe se invierte en lograr efectos positivos en el capital natural, la biodiversidad, la estabilidad laboral a largo plazo y los medios de vida. En este sentido, se considera fundamental utilizar tales ayudas en esa dirección, con el fin de animar a los agricultores industriales a gran escala a adoptar prácticas de producción de alimentos más sostenibles y respetuosas con el clima.

Por otra parte, recientemente ha ganado popularidad una corriente que surgió en la década de los 80, conocida como *agricultura regenerativa*. Consiste en un conjunto de prácticas agrícolas que permiten extraer grandes cantidades de CO₂ de la atmósfera y retenerlas en el suelo. De hecho, según la principal institución precursora de esta modalidad, el Rodale Institute (2014), se calcula que, con una agricultura regenerativa extendida de forma global, se podría capturar más del 100% de las emisiones anuales actuales de CO₂.

Esta propuesta gira en torno a la idea de evitar que el suelo quede al descubierto, situación perjudicial tanto para el secuestro de carbono como para la salud de aquel en general. En otras palabras, los suelos agrícolas que se dejan en barbecho o se labran de forma intensiva quedan expuestos al viento y al agua, lo que provoca la erosión de su capa superior, rica en carbono. Esto provoca, de forma inevitable, que este carbono se libere a la atmósfera como GEI (CO₂). Asimismo,

se considera que las prácticas agrícolas como la labranza, enfocadas a dejar el suelo descubierto, socavan aún más el secuestro de carbono del suelo al dificultar el crecimiento de microorganismos como los hongos, importantes a largo plazo debido a su papel en la formación de los agregados del suelo, fundamentales para evitar su degradación (Rodale Institute 2014). Al respecto, la agricultura regenerativa pretende reformular las prácticas agrícolas con el fin de reducir o eliminar las que se consideran perjudiciales, garantizar que la tierra no quede desnuda y que, por tanto, el carbono del suelo pueda ser capturado, en lugar de perderse. Entre las distintas acciones que se proponen para lograr estos objetivos, destacan las siguientes (Rodale Institute 2014):

- **Labranza cero.** Consiste en priorizar la labranza reducida o nula, con el fin de minimizar la alteración mecánica del suelo. En estos casos, los residuos de los cultivos se dejan en el campo y la siembra posterior se realiza sin alteración previa alguna de la tierra.
- **Cultivos de cobertura.** Se trata de aquellos que se plantan fuera de la temporada de crecimiento principal para cubrir el suelo, lo que ayuda a mejorar su salud, disminuir su erosión, reducir la lixiviación y escorrentía de nitratos y mejorar la presión de las plagas y las malezas. Asimismo, la integración de estos cultivos es un medio poderoso para aumentar el carbono del terreno gracias a los sistemas de raíces profundas de muchas de estas plantas perennes. Además, dan como resultado una cobertura continua, lo que también incrementa el carbono de la biomasa microbiana del suelo al garantizar la disponibilidad de energía y raíces hospedantes para bacterias y hongos.
- **Retención de residuos.** Los cultivos de cobertura desempeñan, a su vez, un papel importante en el secuestro de CO₂ en el suelo. Para ello, resulta fundamental que, cuando estos vayan a dejar paso al cultivo principal, los residuos de sus plantas y raíces se retengan, en lugar de eliminarse o quemarse, ya que son los precursores de la materia orgánica del suelo. Aunque la eliminación en estos casos se ha hecho común, desafortunadamente esta práctica agota la referida materia orgánica. Por el contrario, su retención puede ser un importante impulsor de la acumulación de carbono.
- **Compost.** Las plantas o una porción de sus residuos —ya sean de cultivos de cobertura o principales— también se pueden convertir en abono para mejorar la salud del suelo y el secuestro de carbono, ya que este aumenta la biodiversidad del suelo y la biomasa microbiana. Además, favorece su productividad, al tiempo que se reducen las necesidades de agua o fertilizantes.

La agricultura regenerativa parece haberse consolidado hoy como una práctica útil a la hora de capturar el carbono de un modo rápido. Tal como destaca el Rodale Institute (2014), un ensayo de producción de maíz sin labranza demostró que los métodos regenerativos que utilizan estiércol compostado aumentaron el carbono del suelo en 4,1 toneladas métricas por hectárea anuales en solo 2 años. Sin embargo, aún es pronto para asegurar la capacidad de la agricultura regenerativa de retener el carbono capturado en el suelo a largo plazo.

Conclusión

El calentamiento global constituye una problemática seria y urgente que nuestra sociedad enfrenta en la actualidad. La falta de consenso respecto a la magnitud y urgencia del problema supone una dificultad adicional. En un extremo del espectro, algunas perspectivas adoptan un enfoque catastrófico y dibujan un panorama desolador e inevitable de un futuro marcado por los desastres naturales, los cambios climáticos extremos y la pérdida de biodiversidad. En el otro extremo, existen posturas negacionistas que minimizan o incluso niegan la realidad del cambio climático y sus efectos.

En este contexto polarizado, se ha optado por una postura constructiva que, basada en datos científicos, reconoce los riesgos plausibles del calentamiento global y propone acciones concretas para mejorar la situación actual y las perspectivas de futuro.

La Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, firmada en 1992, enunció el principio de precaución, el cual establece que “cuando existan amenazas de daños graves o irreversibles, la falta de certeza científica total no se utilizará como motivo para posponer medidas rentables para prevenir la degradación ambiental” (ONU 1992). Este principio es una herramienta esencial en la toma de decisiones cuando nos enfrentamos a situaciones donde existe la posibilidad de un daño, aunque no haya un amplio conocimiento científico sobre la materia en cuestión.

La esencia de la precaución radica en tener cuidado por adelantado, en ser cautelosos en un contexto de incertidumbre. Implica reconocer una responsabilidad social destinada a proteger al público de la exposición al daño cuando la investigación científica ha identificado un riesgo plausible. Se trata de anticipar el perjuicio antes de que ocurra, adoptar medidas correctoras y ajustarlas en función de las evidencias que surjan. En definitiva, consiste en vivir el principio según el cual más vale prevenir que curar. No nos podemos permitir permanecer pasivos ante la posibilidad de un futuro incierto y peligroso.

Al respecto, la descarbonización se presenta como una solución crucial en esta lucha, en la que todos debemos participar de forma activa. De hecho, las empresas desempeñan un papel esencial tanto a través de sus actividades como a lo largo de su cadena de suministro. Para ello, resulta fundamental la incorporación en la toma de decisiones de consideraciones en torno a esta cuestión, así como el establecimiento de unos requisitos mínimos en términos de emisiones a la hora de establecer relaciones comerciales. Además, para facilitar esta tarea, existen herramientas de gran utilidad como la huella de carbono, a través de la cual pueden evaluarse y cuantificarse las emisiones de CO₂ de los proveedores.

La transición hacia una economía baja en emisiones de carbono requiere de un compromiso claro por parte de las empresas para reducir su huella ambiental y adoptar prácticas más sostenibles. En este sentido, la presión que las compañías pueden ejercer sobre sus proveedores se configura, sin duda, como una buena palanca para expandir ese movimiento a favor de la descarbonización.

Del mismo modo, resulta esencial contar con la participación activa de la sociedad. En el ámbito particular, se debe asumir la propia responsabilidad individual y adquirir conciencia acerca de la necesidad de reformular nuestras acciones cotidianas en esta misma dirección. Para ello, tanto la adopción de prácticas de eficiencia energética en los hogares como el uso sostenible del transporte son dos de las principales acciones con las que la ciudadanía puede contribuir a la descarbonización. Este enfoque, fundamentado en la responsabilidad individual y la conciencia colectiva, puede constituir, sin duda, un paso significativo que marque la diferencia en la lucha contra el cambio climático.

En definitiva, tal como se ha visto a lo largo de este cuaderno, la descarbonización promueve un cambio de paradigma a través de la reformulación de nuestro actual modo de vida. No se trata de renunciar de manera absoluta a nuestras actividades, sino de adaptarlas a través de prácticas y tecnologías respetuosas con el medioambiente, sin alterar el equilibrio que, de forma natural, nos brinda el planeta.

En última instancia, el camino hacia la descarbonización y la mitigación del cambio climático requiere un esfuerzo colectivo y coordinado. Solo a través de la colaboración entre Gobiernos, empresas y ciudadanos cabe esperar que se aborde de forma eficaz este desafío global. Por ello, adoptar una mentalidad proactiva y comprometida es fundamental para asegurar un futuro sostenible para las generaciones venideras.

Referencias

ACNUR (Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados). 2022. *Tendencias globales. Desplazamiento forzado en 2021*. <https://www.acnur.org/sites/default/files/2023-04/13866.pdf>

— 2016. “Preguntas frecuentes sobre el desplazamiento causado por el cambio climático y los desastres naturales”. 6 de noviembre del 2016.

<https://www.acnur.org/es-es/noticias/historias/preguntas-frecuentes-sobre-el-desplazamiento-causado-por-el-cambio-climatico-y#:~:text=Un%20promedio%20anual%20de%2021,%2C%20incendios%20forestales%2C%20temperaturas%20extremas>

AEMA (Agencia Europea de Medio Ambiente). 2023. “New Registrations of Electric Vehicles in Europe”. 24 de octubre del 2023. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/new-registrations-of-electric-vehicles>

AMAP (Programa de Monitorización y Evaluación del Ártico). 2021. *Cambio climático en el Ártico: actualización 2021: tendencias e impactos clave*. <https://www.amap.no/documents/download/6829/inline>

BARBARINO, Matteo. 2023. *What is Nuclear Fusion?*. IAEA (Organismo Internacional de la Energía Atómica). 3 de agosto del 2023. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion>

BGS (British Geological Survey). s. f. “Understanding Carbon Capture and Storage”. Acceso el 10 de mayo del 2024. <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/climate-change/carbon-capture-and-storage/>

CALIFORNIA Academy of Sciences. 2008. *Cartel del Ciclo del Carbono*. https://www.calacademy.org/sites/default/files/assets/docs/pdf/049_carboncycleposterspanish.pdf.

COMISIÓN Europea. 2023. “Cumplir el Pacto Verde Europeo”. Dirección General de Comunicación. Actualizado el 9 de octubre del 2023. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_es

— 2024. “European Alternative Fuels Observatory”. Dirección General de Movilidad y Transportes. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>

— s. f. a. “Alternative Fuels”. Dirección General de Movilidad y Transportes. Acceso el 10 de mayo del 2024. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/general-information/alternative-fuels>

— s. f. b. “Consecuencias del cambio climático”. Dirección General de Acción por el Clima. Acceso el 10 de mayo del 2024. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_es

— s. f. c. “Industrial Carbon Management”. Dirección General de Energía. Acceso el 10 de mayo del 2024. https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/carbon-capture-storage-and-utilisation_en

— s. f. d. “Transporte y el Pacto Verde”. Dirección General de Comunicación. Acceso el 10 de mayo del 2024. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/transport-and-green-deal_es

CONSEJO Europeo. 2024a. “¿Cuál es la situación de la naturaleza en la UE?”. Actualizado el 27 de enero del 2024. <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/state-of-eu-nature/>.

— 2024b. “Objetivo 55”. Actualizado el 12 de abril del 2024. <https://www.consilium.europa.eu/es/polices/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

CSIC. 2023. “Almacenar CO₂ bajo tierra podría ser una solución segura para mitigar el cambio climático, según un estudio del CSIC”. 31 de enero del 2023. <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/almacenar-co2-bajo-tierra-podria-ser-una-solucion-segura-para-mitigar-el-cambio>

C2ES (Center for Climate and Energy Solutions). s. f. “Carbon Capture”. Acceso el 10 de mayo del 2024. <https://www.c2es.org/content/carbon-capture/>

DOE (U.S. Department of Energy). s.f. “Emissions from Electric Vehicles”. Acceso el 10 de mayo de 2024. <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-emissions>

EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). 2023. “Climate Change Impacts on Agriculture and Food Supply”. Actualizado el 16 de noviembre del 2023. <https://www.epa.gov/climateimpacts/climate-change-impacts-agriculture-and-food-supply#:~:text=Climate%20change%20can%20make%20conditions,seasons%20in%20almost%20every%20state.&text=A%20longer%20growing%20season%20can,negative%20impacts%20for%20raising%20food>

- 2024. “Sources of Greenhouse Gas Emissions”. Actualizado el 15 de mayo del 2024. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#electricity>
- GALINDO, Andrea. 2022. “What is Nuclear Energy? The Science of Nuclear Power”. OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica). 15 de noviembre del 2022. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power#:~:text=Nuclear%20energy%20is%20a%20form,fusion%20%E2%80%93%20when%20nuclei%20fuse%20together>
- GLOBAL CCS Institute. 2012a. *CO₂ Capture Technologies. Oxy Combustion with CO₂ Capture*. Enero del 2012. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/29761/co2-capture-technologies-oxy-combustion.pdf>
- 2012b. *CO₂ Capture Technologies. Post Combustion Capture (PCC)*. Enero del 2012. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/29721/co2-capture-technologies-pcc.pdf>
- 2022. *Global Status of CCS 2022*. https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/11/Global-Status-of-CCS-2022_Download.pdf
- s. f. a. *Understanding CCS. Storage*. Acceso el 10 de mayo del 2024. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/07/Factsheet_CCS-Explained_Storage.pdf
- s. f. b. *Understanding CCS. Transport*. Acceso el 10 de mayo del 2024. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/07/Factsheet_CCS-Explained_Transport.pdf
- IEA (International Energy Agency). 2023. “Industry”. Actualizado el 11 de julio del 2023. <https://www.iea.org/energy-system/industry>
- IEP (Institute for Economics & Peace). 2020. “Over One Billion People at Threat of Being Displaced by 2050 Due to Environmental Change, Conflict and Civil Unrest”. Nota de prensa. 9 de septiembre del 2020. <https://www.economicsandpeace.org/wp-content/uploads/2020/09/Ecological-Threat-Register-Press-Release-27.08-FINAL.pdf>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2014. *Anexo II. Glosario*. En *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, 127-141. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/AR5_SYR_Glossary_es.pdf
- 2019. *Calentamiento global de 1,5 °C*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf
- 2022. *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf
- KIVI, I. R., R. Y. Makhnenko, C. M. Oldenburg, J. Rutqvist y V. Vilarrasa. 2022. “Multi-Layered Systems for Permanent Geologic Storage of CO₂ at the Gigatonne Scale”. *Geophysical Research Letters* 49 (24). <https://doi.org/10.1029/2022GL100443>
- MARTÍNEZ, Bruno y Joan Fontrodona. 2024. “La gestión empresarial de la huella hídrica: clave para un desarrollo sostenible”. *Cuadernos de la Cátedra CaixaBank de Sostenibilidad e Impacto Social* 58 (enero). <https://www.iese.edu/media/research/pdfs/ST-0651>
- MEZA, Andrea. 2022. “La descarbonización no puede esperar.” ONU (Organización de las Naciones Unidas). <https://unfccc.int/es/news/la-descarbonizacion-no-puede-esperar>
- MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). 2020. *Estrategia de descarbonización a largo plazo. 2050*. https://ec.europa.eu/clima/sites/lts/lts_es_es.pdf
- s.f. *Sumideros de carbono*. Acceso el 10 de mayo del 2024. <https://www.miteco.gob.es/eu/cambio-climatico/temas/mecanismos-de-flexibilidad-y-sumideros/sumideros-de-carbono.html>
- MOSEMAN, Andrew. 2022. “Are Electric Vehicles Definitely Better for the Climate Than Gas-powered Cars?”. MIT Climate Portal (página web). 13 de octubre del 2022. <https://climate.mit.edu/ask-mit/are-electric-vehicles-definitely-better-climate-gas-powered-cars>
- MULLER, Philip y Joan Fontrodona. 2021. “Taxonomía medioambiental y productos financieros verdes. Finanzas para una nueva Europa”. *Cuadernos de la Cátedra CaixaBank de Sostenibilidad e Impacto Social* 50 (septiembre). <https://iese.edu/media/research/pdfs/ST-0617>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2022. “Greenhouse Gas Pollution Trapped 49% More Heat In 2021 Than In 1990, NOAA Finds”. NOAA Research (página web). 23 de mayo del 2022. <https://research.noaa.gov/2022/05/23/greenhouse-gas-pollution-trapped-49-more-heat-in-2021-than-in-1990-noaa-finds/>

— s. f. “Annual Greenhouse Gas Index”. US Global Change Research Program (página web). Acceso el 10 de mayo del 2024. <https://www.globalchange.gov/indicators/annual-greenhouse-gas-index#:~:text=In%202022%2C%20the%20AGGI%20was,largest%20contributor%20to%20radiative%20forcing>

OMS (Organización Mundial de la Salud). 2023. “Climate change”. 12 de octubre del 2023. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>

ONU (Organización de las Naciones Unidas). 1992. Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>

— s. f. “Causas y efectos del cambio climático”. Acceso el 10 de mayo del 2024. <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

OUR World in Data. 2023. “Share of global CO₂ emissions from gas”. Acceso el 10 de mayo de 2024. <https://ourworldindata.org/grapher/share-global-co2-gas>

PARLAMENTO Europeo. 2023a. “Combustibles alternativos para automóviles: cómo aumentar su uso”. Actualizado el 28 de septiembre del 2023. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20221013STO43019/combustibles-alternativos-para-automoviles-como-aumentar-su-uso>

— 2023b. “Cutting Emissions from Planes and Ships: EU Actions Explained”. Actualizado e 21 de septiembre del 2023. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20220610STO32720/cutting-emissions-from-planes-and-ships-eu-actions-explained#:~:text=The%20EU%20has%20taken%20steps,allowances%20to%20cover%20their%20emissions>

— 2023c. “Reducing Car Emissions: New CO₂ Targets for Cars and Vans Explained”. Actualizado el 8 de agosto del 2023. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180920STO14027/reducing-car-emissions-new-co2-targets-for-cars-and-vans-explained>

— 2024. “Reducir las emisiones de carbono: objetivos y políticas de la UE”. https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/3/story/20180305STO99003/20180305STO99003_es.pdf

PRTR-ESPAÑA (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes). s. f. “CO₂ (dióxido de carbono)”. Acceso el 10 de mayo del 2024. <https://prtr-es.es/co2-dioxido-de-carbono,15590,11,2007.html>

Riebeek, Holli. 2011. “The Carbon Cycle”. The Earth Observatory (página web). 16 de junio del 2011. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>

RITCHIE, Hannah y Max Roser 2024. “Land use”. Our World in Data (página web). Actualizado en mayo del 2024. <https://ourworldindata.org/land-use>

RITCHIE, Hannah y Pablo Rosado. 2024. “Electricity Mix”. Our World in Data (página web). Actualizado en enero del 2024. <https://ourworldindata.org/electricity-mix#article-citation>

RITCHIE, Hannah, Pablo Rosado y Max Roser. 2024a. “Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector”. Our World in Data (página web). Actualizado en enero del 2024. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

— 2024b. “Renewable Energy”. Our World in Data (página web). Actualizado en enero del 2024. <https://ourworldindata.org/renewable-energy>

RODALE Institute. 2014. *Regenerative Organic Agriculture and Climate Change*. <https://rodaleinstitute.org/wp-content/uploads/rodale-white-paper.pdf>

SECRETARÍA del Convenio sobre la Diversidad Biológica. 2020. *Perspectiva mundial sobre la diversidad biológica 5*. <https://www.cbd.int/gbo/gbo5/publication/gbo-5-es.pdf>

SIZIRICI, Banu, Yohanna Fseha, Chung-Suk Cho, Ibrahim Yildiz y Young-Ji Byon. 2021. “A Review of Carbon Footprint Reduction in Construction Industry, from Design to Operation”. *Materials* 14 (20): 6094. <https://doi.org/10.3390/ma14206094>

VICENTE Serrano, Sergio Martín, Santiago Beguería Portugués, Virginia Hernández Santana, Juan José Durán Valsero, Miguel Ángel Rosales Villegas y Jesús Julio Camarero Martínez, coords. 2023. *Seqúias*. Madrid: Editorial CSIC. https://www.eitfood.eu/files/05_S4P_SEQUIAS_DIGITAL.pdf

www.iese.edu

Barcelona
Madrid
Munich
New York
São Paulo



A Way to **Learn**. A Mark to **Make**. A World to **Change**.