



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Estado del arte de la mitigación del cambio climático: Situación actual y perspectivas de futuro

Autor: Víctor Rodríguez Barcones

Tutora: Yolanda Sola Salvatierra

Curs acadèmic: 2017-2018

Màster en Energies Renovables i
Sostenibilitat Energètica

Dos Campus d'Excel·lència Internacional:



Índice

Objetivo del trabajo	3
1. Introducción.....	4
2. Posibles escenarios futuros.....	5
3. Escenario de referencia: Impulsores y tendencias.....	7
3.1. Evolución de las emisiones de GEI.....	7
3.2. Proyección de las emisiones de GEI	9
4. Acciones clave: situación actual y perspectivas.....	13
4.1. Reducción demanda energética.....	16
4.2. Descarbonización suministro energético	19
4.2.1. Nuevos vectores energéticos	20
4.2.2. Energías renovables.....	22
4.2.3. Energía nuclear	25
4.2.4. CCS: Captura y almacenamiento de carbono	26
4.2.5. BECCS: Bioenergía con captura/almacenamiento carbono	28
4.3. Usos del suelo	29
5. Conclusiones	31
6. Bibliografía.....	33
Abstract.....	37

Objetivo del trabajo

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es proporcionar, en un breve documento, una visión intersectorial y global de la mitigación del cambio climático durante el siglo XXI.

Analizando las vías de transformación e identificando la evolución de las acciones de mitigación, mayormente tecnológicas, se pretende responder a la pregunta: ¿Se está haciendo suficiente por mitigar el cambio climático?

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) constituido en 1988 tiene como objetivo evaluar la información científica, técnica y socioeconómica relacionada con el cambio climático (1). Por ello es el punto de partida ideal para el desarrollo de este trabajo.

Para la realización de este trabajo se ha tomado como referencia el informe “*Mitigation of Climate Change 2014*” del IPCC publicado en 2014 (2), además de publicaciones más recientes para actualizar la situación de la mitigación del cambio climático antes de la próxima publicación del IPCC en 2022 (3).

Los objetivos individuales del análisis de la bibliografía existente sobre la mitigación del cambio climático de este proyecto son:

- Proporcionar una visión general del cambio climático: concepto, causa y proyecciones a futuro. Objetivo basado en el estudio de los informes del IPCC y los artículos científicos relacionados.
- Identificar las acciones clave para mitigar el cambio climático e identificar su situación actual. Objetivo basado en el estudio de los informes de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) entre otros.
- Valoración de los esfuerzos de mitigación realizados hasta el momento con la información extraída de los anteriores dos objetivos.

1. Introducción

El cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima que puede identificarse mediante pruebas estadísticas y que persiste por un periodo prolongado. Se refiere a cualquier cambio en el clima debido a causas naturales o como resultado de la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global (4).

Desde la Revolución Industrial las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles y la deforestación, han causado la emisión de grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera. Debido a estas emisiones de origen antropogénico la concentración de dióxido de carbono, gas de efecto invernadero con mayor potencial calentamiento global (GWP), ha aumentado un 30 % desde las primeras mediciones en 1958 (5) (Ver Figura 1). Otros gases han aumentado en mayor medida su concentración en la atmósfera, como es el caso del metano que se ha duplicado.

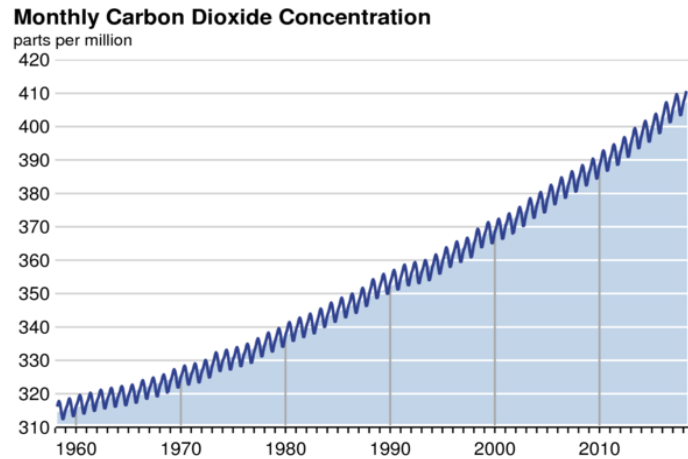


Figura 1: Evolución de la concentración de CO₂ en el observatorio Mauna Loa (Hawái) (Fuente: Scripps CO₂ Program)

A causa del aumento de GEI en la atmósfera el efecto invernadero se ha intensificado en los últimos años provocando un aumento de la temperatura media global. Según la Nasa Climate, la media mundial ha aumentado 0,9°C respecto valores de finales del siglo XIX (6). Valor similar a otros organismos, incluido el propio IPCC que indicó un aumento de 0,85°C en el informe de *Cambio Climático 2013: Bases físicas* (7) (Figura 2).

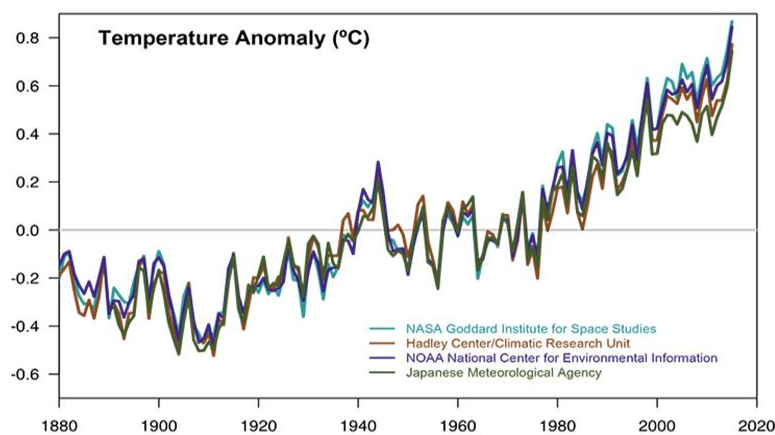


Figura 2: Evolución temperatura media global según diferentes organizaciones (Fuente: Nasa Climate)

Para reducir el cambio climático y evitar un calentamiento global mayor se requieren actuaciones de mitigación, definidas como las intervenciones humanas para reducir fuentes emisoras o mejorar sumideros de gases de efecto invernadero (2).

En la Conferencia de París sobre el clima de 2015, 195 países (8) firmaron como objetivo de mitigación del cambio climático mantener el aumento de temperatura media mundial por debajo de 2°C respecto niveles preindustriales, a ser posible por debajo de 1,5°C (9). Objetivo a lograr conjuntamente mediante los esfuerzos voluntarios de cada uno de los firmantes.

2. Posibles escenarios futuros

La mejor forma para definir los posibles escenarios futuros en referencia al cambio climático es dirigirse al IPCC. En su última publicación se analizaron los resultados de diferentes modelizaciones climáticas, teniendo en cuenta factores económicos, tecnológicos, demográficos, políticos... Y se definieron 4 posibles escenarios, denominados *Representative Concentration Pathways* (RCP) según el forzamiento radiativo en 2100 respecto niveles preindustriales. Entendiendo forzamiento radiativo como el cambio neto en el balance de radiación del sistema climático debido a alguna perturbación.

Tales escenarios de forzamiento radiativo se encuentran relacionados con unas concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a finales de siglo, y estas relacionadas a las emisiones acumuladas desde 2010 (2). En la Tabla 1 se identifican tales relaciones:

RCP	Forzamiento radiativo 2100 (W/m ²)	Concentración CO _{2eq} (ppm)	Emisiones totales CO ₂ acumuladas 2011-2100 (GtCO ₂)
RCP 2.6	2,3 – 2,9	430 – 480	< 950
RCP 4.5	3,9 – 5,1	600 – 750	1950 – 3250
RCP 6.0	5,1 – 6,8	750 – 1030	3250 – 5250
RCP 8.0	> 6,8	> 1030	> 5250

Tabla 1: Características de los escenarios de forzamiento radiativo. Nota 1: ppm=partes por millón. Nota 2: CO_{2eq} representa todos los GEI considerando su GWP. Nota 3: Gt representa gigatoneladas (Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IPCC).

En la Figura 3 se muestran los diferentes escenarios según forzamiento radiativo y concentración emisiones GEI en la atmósfera, ambos en 2100 (2). Dado que se indican rangos de concentraciones de GEI, las emisiones anuales se representan mediante un área sombreada.

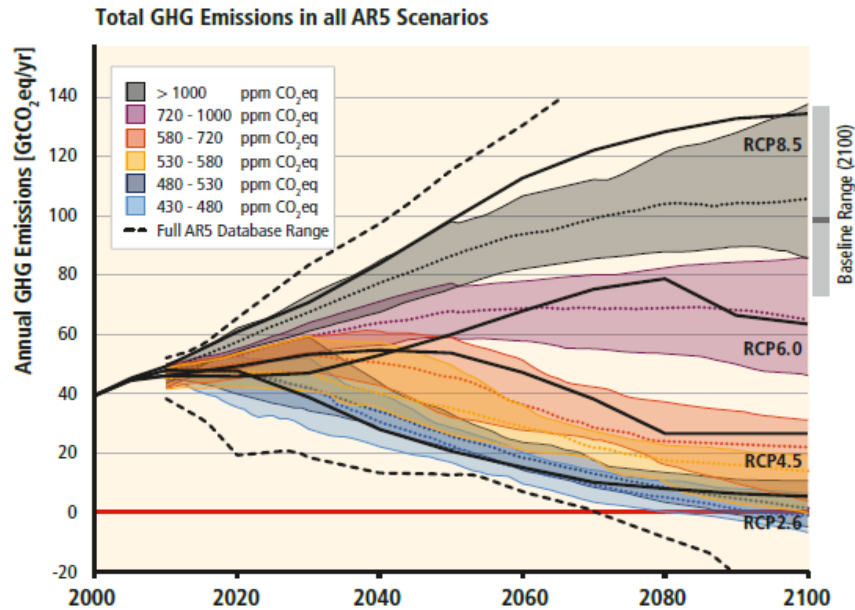


Figura 3: Emisiones anuales GEI según escenario RCP y concentración CO_{2eq} a final de siglo. (Fuente: IPCC)

Como se puede observar, todos los escenarios por debajo de 720 ppm CO_{2eq} requieren una reducción en las emisiones antropogénicas anuales. El momento en el cual se alcanza el pico de emisiones y se comienza a reducir es crucial para lograr los objetivos finales en los escenarios más restrictivos.

Si el pico de las emisiones anuales se retrasa, se requiere en un futuro actuar con mayor rapidez a un coste mucho mayor e incluso depender en mayor medida de las tecnologías de emisiones negativas como la producción de bioenergía con captura de dióxido de carbono (10)(11), explicada en el capítulo 4.2.5. Además, se puede dar lugar a un aumento de la temperatura media del planeta transitorio en el caso de exceder el nivel de concentración de GEI a largo plazo (2).

Por lo tanto, si se requiere evitar el retraso en el pico de emisiones se debe conseguir una rápida reducción antes de 2030 (10). No lograrlo implicaría un mayor coste de la mitigación del cambio climático y un mayor riesgo en no alcanzar los objetivos del Acuerdo de París.

Un incremento en el forzamiento radiativo causa un aumento de la temperatura del planeta, provocando un calentamiento global. Tal aumento de temperatura se sitúa entre 1,5°C en el escenario más optimista RCP2.6 y 4,5°C en el escenario más pesimista RCP8.5 (Ver Figura 4). Aunque normalmente en la literatura científica se expresa el rango de probabilidad de superar cierta temperatura, dado que las modelizaciones deben tener en cuenta diferentes factores y realimentaciones, como por ejemplo el deshielo Ártico o el ciclo del carbono, e inequívocamente existe cierta incertidumbre en ellas (2).

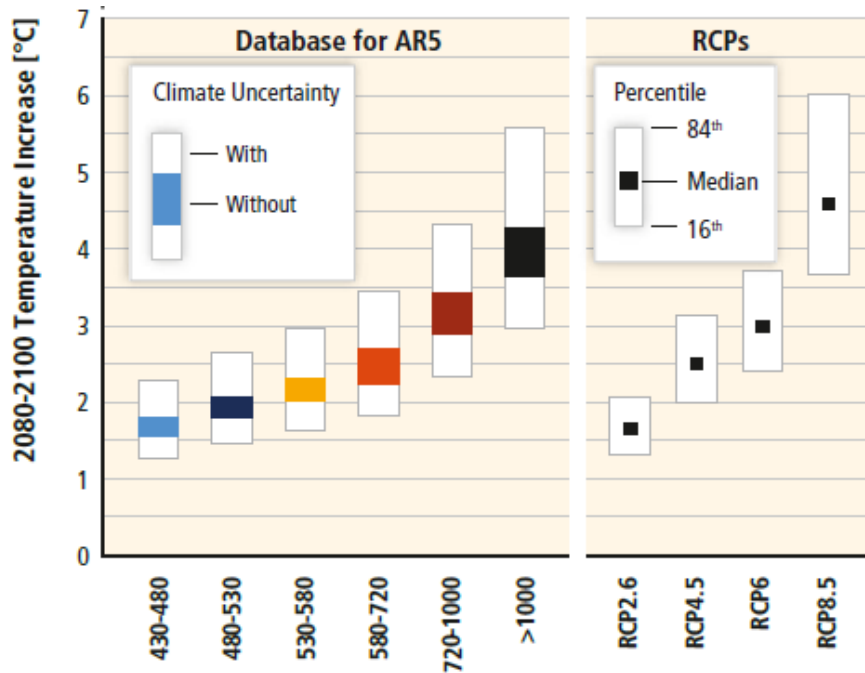


Figura 4: Aumento de temperatura a finales s.XXI para cada escenario RCP y concentraciones de GEI en la atmósfera. (Fuente: IPCC)

3. Escenario de referencia: Impulsores y tendencias

3.1. Evolución de las emisiones de GEI

Entre 1970 y 2010 las emisiones de gases de efecto invernadero aumentaron un 80%, de 27 GtCO_{2eq}/año a 49 GtCO₂/año (2). Con un crecimiento anual cercano al 2% que se mantiene hasta 2014, último año con evaluación de las emisiones GEI por parte de World Watch (12).

Tal crecimiento y cantidad de emisiones se debe principalmente al dióxido de carbono emitido por la obtención de energía mediante la combustión de recursos fósiles: carbón, gas y petróleo. En 2016 se registraron 32,16 GtCO₂ emitidos por energía fósil, donde cabe destacar una mayor contribución de los países en desarrollo, como por ejemplo China o India con 29% y 7% del total respectivamente (13) (14) (Ver Figura 5).

En un segundo lugar, pero con mucha menos importancia, destacan las emisiones antropogénicas debido a los usos del suelo, sector denominado en inglés *Agriculture, Forestry and Other Land Use* (AFOLU). Las emisiones del uso de suelo representan entre 10 y 12 GtCO_{2eq}. Aunque que si se consideran las acciones de reforestación, mayoritariamente en países desarrollados, el balance neto de fuentes y sumideros es bastante inferior. En 2015 se registraron 3,06 GtCO_{2eq} teniendo en cuenta estas emisiones negativas por el secuestro de dióxido de carbono de nuevas áreas forestales (15).

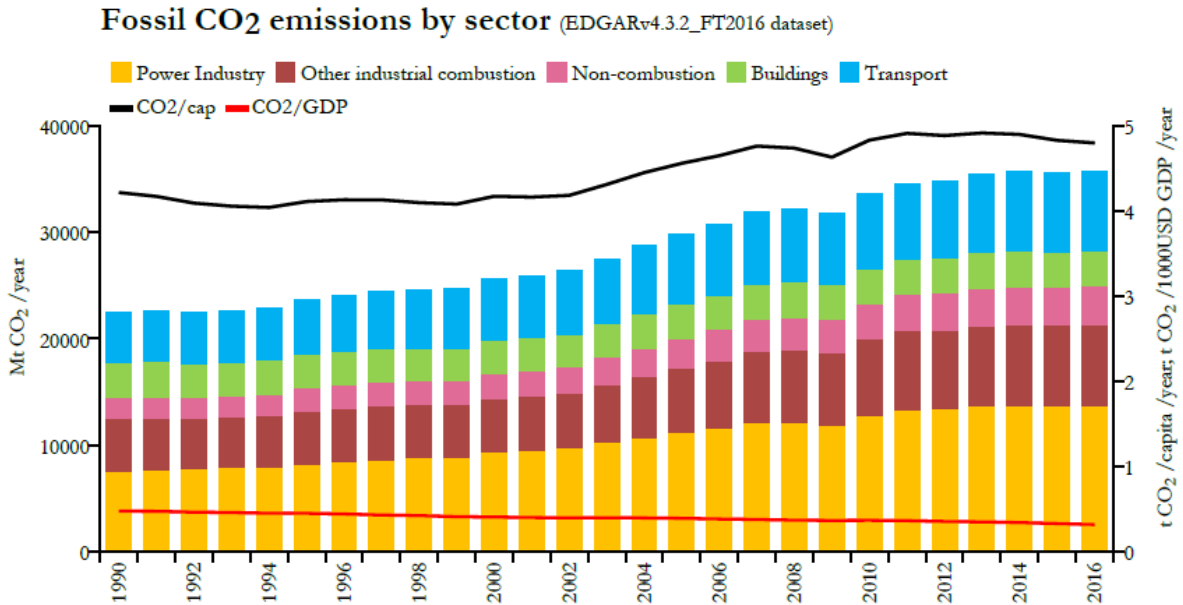


Figura 5: Evolución de las emisiones de CO₂ de la combustión de recursos fósiles. (Fuente: EDGAR)

Mediante el método de *la Identidad de Kaya* (16) se puede identificar cuáles han sido las causas del aumento de emisiones del último siglo y pronosticar cual será la evolución durante el siglo XXI. La identidad de Kaya descompone las emisiones de dióxido de carbono de la energía fósil, principal emisión de GEI, en cuatro parámetros que determinan su evolución:

$$Emisiones\ CO_2 = Población \cdot \frac{PIB}{Población} \cdot \frac{Energía}{PIB} \cdot \frac{CO_2\ Emis}{Energía}$$

Estos cuatro parámetros de Kaya son la población mundial, la riqueza de esta población (PIB/cápita), la energía necesaria para producir esta riqueza conocida como intensidad energética (Energía/PIB) y las emisiones asociadas a la energía conocida como intensidad de carbono en la energía (CO₂ emisiones/Energía).

Entre 1970 y 2010 se produjo el mencionado aumento de emisiones de GEI debido en gran medida al espectacular crecimiento de 108 % de las emisiones de CO₂ de la energía fósil. Tal crecimiento fue impulsado por una casi duplicación de los dos primeros términos de la identidad de Kaya: Población (+87%) y PIB/Cápita (+103 %) (2).

También es cierto que durante tal periodo se mejoró la eficiencia energética global permitiendo reducir la intensidad energética (Energía/PIB) un 35% y el despliegue de las energías renovables dio lugar a una reducción de la intensidad de carbono de la energía (Emisiones CO₂/Energía) de un 15 % (2). Conjuntamente estas reducciones causaron una disminución de las emisiones por unidad de riqueza (Emisiones CO₂/PIB), tal como se puede observar en la Figura 5 (línea roja). En 2014 este parámetro alcanzó el valor de 0,491 kg CO₂/\$, reduciéndose un 37 % desde 1970 (17).

Estas mejoras en el uso y producción de la energía no pudieron compensar el rápido y persistente crecimiento de la riqueza y de la población. Solo considerando el crecimiento del PIB/cápita, los esfuerzos en reducir el consumo y producir con bajas emisiones se vieron reducidos, tal como se puede observar en la Figura 5 (línea negra) donde las emisiones per cápita (CO₂/cap) han mantenido una tendencia creciente entre 1990 y 2010. Teniendo en cuenta todos los parámetros se identifican con facilidad los impulsores de las emisiones de GEI y el pequeño impacto que supusieron las mejoras en eficiencia y producción (2)(Figura 6):

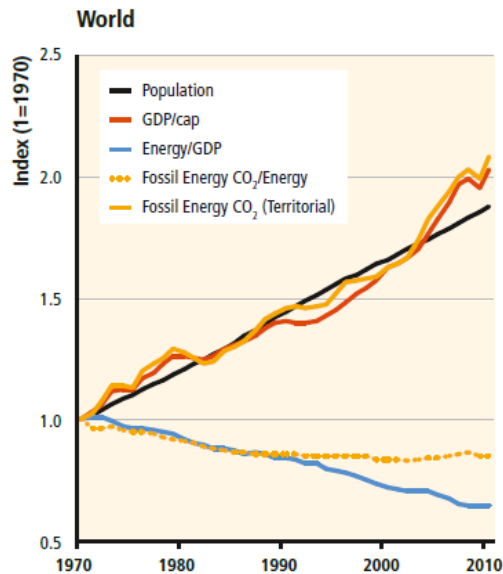


Figura 6: Descomposición de las emisiones de combustión de recursos fósiles en los parámetros de la identidad de Kaya. (Fuente: IPCC)

3.2. Proyección de las emisiones de GEI

Para empezar a discernir la proyección futura de las emisiones y consecuentemente del cambio climático, se debe otorgar una importancia especial a las emisiones de la energía fósil. Estas representan la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico, por ejemplo en 2012 representaron el 67,5 % del total (13).

Igual que se ha analizado la evolución de las emisiones en el periodo 1970-2010, mediante la descomposición de la identidad de Kaya se puede pronosticar la evolución de las emisiones futuras analizando las proyecciones de los parámetros de la identidad. Cabe destacar que estas proyecciones consideran las políticas actuales de mitigación y no tiene en cuenta futuros esfuerzos extraordinarios. Además los pronósticos dependen de muchos otros factores y por ello tiene una incertidumbre asociada, que dada la brevedad de este trabajo no será considerada.

Actualmente viven en el planeta Tierra aproximadamente 7.550 millones de personas y continúa el crecimiento demográfico a un ritmo de 1,1 %/año, es decir, 83 millones de personas anualmente (18).

Recientemente se actualizaron las proyecciones de crecimiento de la población para poder considerar el fenómeno de ímpetu demográfico, por el cual una población mayormente joven tiende a crecer debido a que hay un número más grande de personas en edad reproductiva y por lo tanto el número de nacimientos continua superando el total de muertes pese a que la tasa de fertilidad decaiga hasta el nivel de reemplazo. Debido a este fenómeno pueden pasar dos o tres generaciones hasta que la natalidad se iguale con la mortalidad y el nivel demográfico se mantenga constante (19).

Considerando el ímpetu demográfico las proyecciones estimadas de población muestran un inevitable crecimiento demográfico hasta finales del siglo XXI, alcanzando los 11.000 millones de personas (18) (Figura 7).

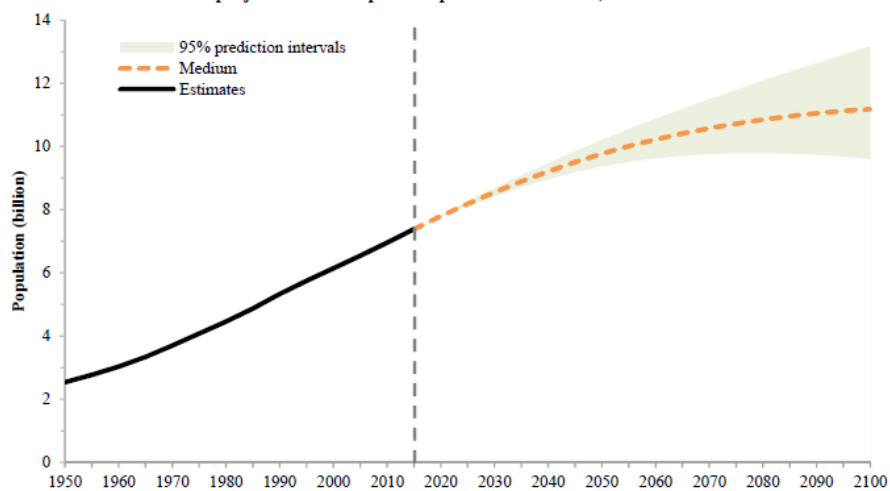


Figura 7: Estimación del crecimiento demográfico mundial. (Fuente: Naciones Unidas)

La riqueza de la población (PIB per cápita) siempre ha crecido a un ritmo histórico de 1,4 % anual y se prevé que tal crecimiento se mantenga a lo largo del siglo XXI (Ver Figura 8). En 2016 se situó en 10.400 \$/cap y de seguir al ritmo actual se situaría en 6 veces los valores registrados en 2010 (20). Aunque algunos modelos proyectan una tasa de crecimiento superior justificando un mayor peso de las economías emergentes en la producción mundial (2).



Figura 8: Evolución del PIB/cápita global durante siglo XXI. (Fuente: World Bank)

La reducción en la intensidad energética se acelerará relativamente, mejorando su media histórica debido a mejoras en la eficiencia tecnológica y cambios estructurales en la demanda de la energía. Ambas impulsadas por el progreso tecnológico y los precios de la energía (2)(Ver izquierda Figura 9).

En las proyecciones de referencia la intensidad de carbono no varía mucho debido a una compensación entre el aumento de tecnologías bajas en CO₂ combinada con el alto precio de los combustibles fósiles en un futuro, contra una ampliación de los recursos fósiles con nuevos descubrimientos con una mayor intensidad en carbono, como por ejemplo las arenas bituminosas (2) (Ver derecha Figura 9).

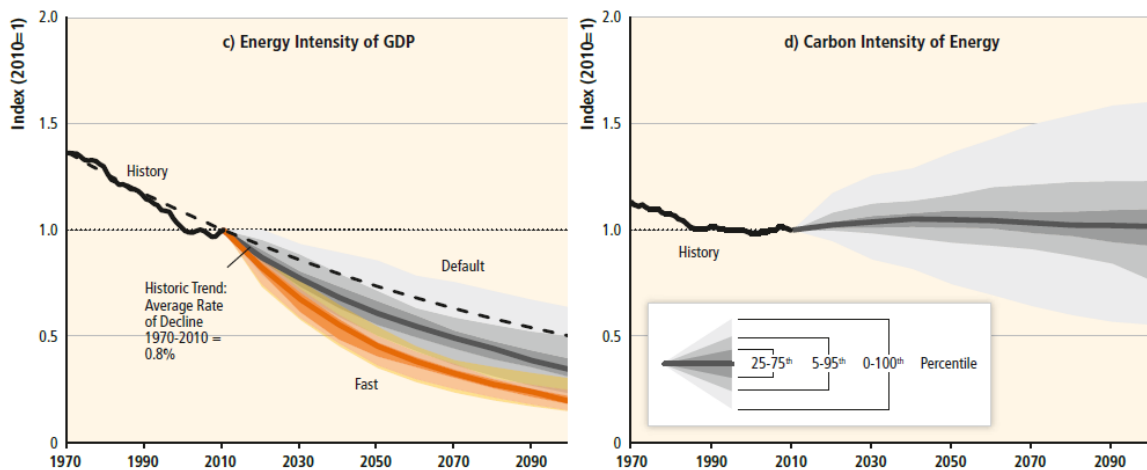


Figura 9: Proyección de referencia para la intensidad energética y la intensidad de carbono en la energía. (Fuente: IPCC)

Considerando estas proyecciones de referencia para los parámetros de la identidad de Kaya el grupo de investigación del IPCC determinó en 2014 el escenario de referencia para las emisiones GEI de la combustión de recursos fósiles e industria. En este escenario de referencia se aprecia una continuación en el crecimiento constante de estas emisiones, llegando a una cifra superior a las 100 GtCO₂/año (2)(Figura 10).

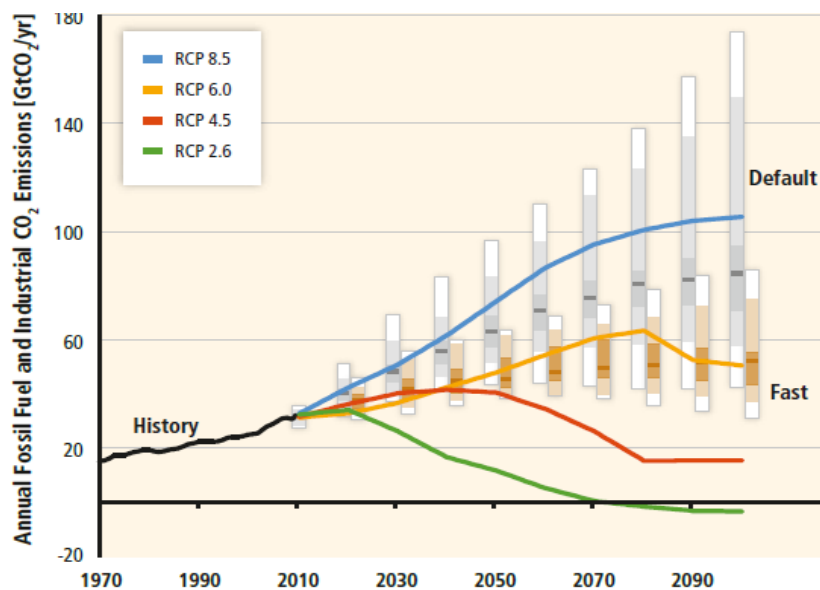


Figura 10: Proyección de referencia para las emisiones de los combustibles fósiles e industria. (Fuente: IPCC)

En cambio, las emisiones del uso del suelo tienen una proyección de referencia que indica una clara disminución a largo plazo. Incluso alcanzando valores negativos que representan un mayor secuestro de carbono que emisión, debido a que se tiene prevista una disminución en la deforestación para tierras de cultivo por la estabilización en la población (2).

Como resultado de estas proyecciones de referencia basadas en la situación actual y las previsiones de futuro, el forzamiento radiativo se situaría entre los escenarios RCP 6.5 y RCP 8.5 (Figura 11).

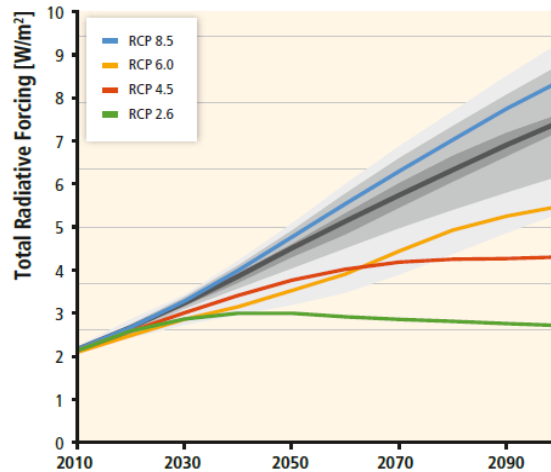


Figura 11: Escenario de referencia para el forzamiento radiativo. (Fuente: IPCC)

Cabe destacar que esta proyección de referencia del informe *“Mitigation of Climate Change”* del IPCC consideró que el crecimiento de la población sufría una moderación hasta alcanzar la estabilización alrededor de 9.000 millones de personas a mitad de siglo, cuando realmente este valor alcanzó los 11.000 millones debido al ímpetu demográfico recientemente evaluado y considerado (Ver Figura 7).

En los modelos evaluados por el IPCC con un mayor crecimiento demográfico se puede observar como el forzamiento radiativo es mayor que en otros con la previsión de estabilización. A continuación se muestran los resultados del escenario de referencia del modelo AMPERE 3 que considera un crecimiento de la población hasta 10.120 millones de personas: +8 W/m² y +4,67°C (21)(Figura 12)(Figura 13).

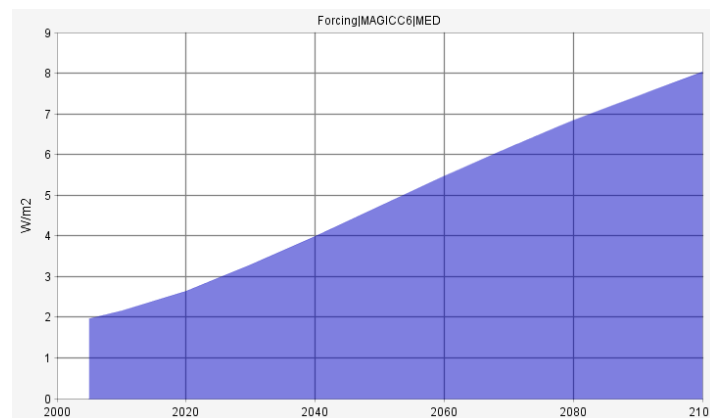


Figura 12: Evolución del forzamiento radiativo en el escenario de referencia AMPERE 3. (Fuente: AR5 Scenario Database)

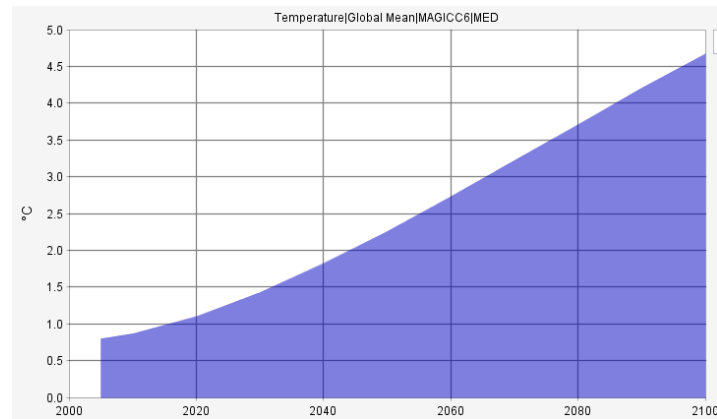


Figura 13: Evolución de la temperatura en el escenario de referencia AMPERE 3. (Fuente: AR5 Scenario Database)

Por lo tanto, en el próximo informe del IPCC los escenarios base serán reevaluados para considerar esta nueva proyección en el crecimiento de la población, además de los avances en la reducción de la intensidad energética e intensidad de carbono en la energía que se consigan hasta 2022 y que son avanzados en el siguiente capítulo.

4. Acciones clave: situación actual y perspectivas

Dado que el crecimiento de la población y su riqueza no se pueden frenar, solo acelerando la reducción en la intensidad energética y la intensidad de carbono en la energía se puede lograr una disminución de las emisiones de CO₂ en el sector energético.

Para alcanzar los objetivos de concentración de emisiones más ambiciosos, RCP 2.6 y RCP 4.5, es totalmente necesaria la eliminación de los combustibles fósiles que emiten libremente, es decir, reducir la intensidad de carbono a un valor próximo a cero. Esta eliminación de los combustibles fósiles se debe realizar de forma gradual y el momento de realización depende del objetivo RCP a largo plazo (22).

Según los escenarios de referencia evaluados, la escasez de recursos fósiles de fácil extracción no ayudará a realizar la transformación hacia un sistema con bajo carbono. Serán requeridos esfuerzos políticos que impulsen las nuevas tecnologías que sustituyan los combustibles fósiles que emiten libremente. Recalcar que en un futuro podría continuar la combustión de recursos fósiles, si se usan en combinación con técnicas de captura de dióxido de carbono (23)(24)(Ver capítulo 4.2.4).

Las diferentes simulaciones para escenarios de bajas emisiones recopiladas por el IPCC indican que para alcanzar un sistema libre de emisiones se deben aplicar estrategias para la reducción de la demanda y la descarbonización del sistema energético. En la Figura 14 se puede observar como para alcanzar una concentración de GEI en la atmósfera por debajo de 580 ppm CO_{2eq}, se requiere que la demanda energética no crezca en exceso y que las energías primarias bajas en CO₂ dominen la producción de energía (2).

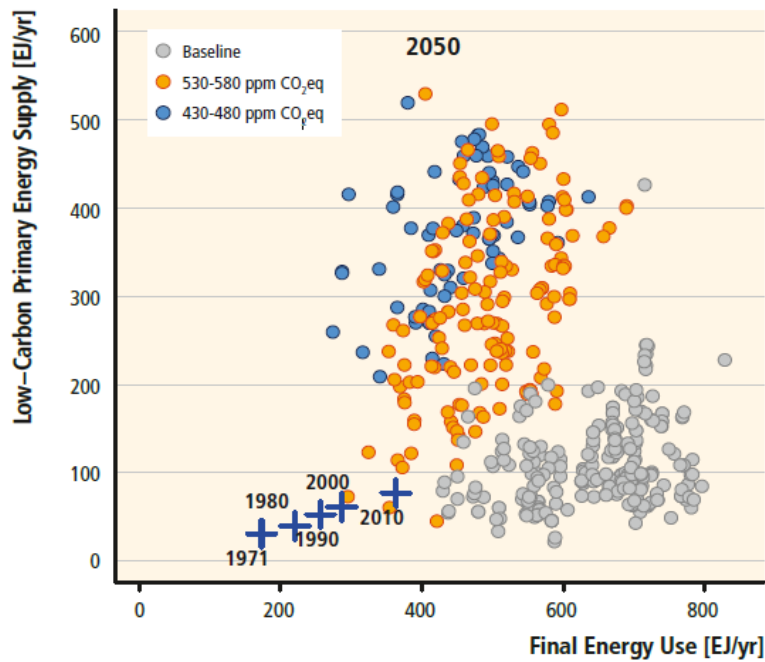


Figura 14: Demanda final de energía y energía primaria baja en carbono para diferentes escenarios de concentración y escenario de referencia. (Fuente: IPCC)

Dado el tiempo de transición que requiere modificar todo el sistema energético y lograr la completa descarbonización, la reducción de la demanda juega un papel importante en la primera mitad del siglo cuando el sistema aun dependa en gran parte de la energía fósil. La descarbonización cobra mayor importancia en la reducción de emisiones aproximadamente a mitad de siglo (25) (Ver Figura 19).

No existe un consenso científico respecto a la distribución de las tecnologías bajas en CO₂ para una futura descarbonización. Hay múltiples combinaciones de energías renovables, energía nuclear y tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (22). Aunque las tecnologías de captura de carbono en la producción de bioenergía (BECCS) son fundamentales para los escenarios con emisiones más bajas y totalmente esenciales en caso de retrasar las acciones de mitigación (2)(Ver capítulo 4.2.5).

Por otro lado, la descarbonización también incluye un cambio y mejora en los vectores energéticos no eléctricos, dado que estos pueden suponer un cuello de botella para la transformación. Al contrario del sector eléctrico, la descarbonización de otros sectores como el transporte es típicamente más lenta. La inserción de nuevos vectores limpios como la electricidad puede suponer una gran reducción en estas áreas.

En resumen, la reducción de emisiones del sector energético, principal contribuyente de las emisiones globales, se realiza mediante las estrategias de reducción de demanda, sustitución de combustibles e implementación de energías bajas en emisiones de CO₂ como las energías renovables, nuclear y CCS. Recientemente la Agencia Internacional de la Energía realizó una propuesta sobre la contribución en la reducción de emisiones de cada una de las acciones mencionadas para lograr evitar un aumento de la temperatura media del planeta por encima de 2°C respecto valores preindustriales, objetivo denominado 2DS (26)(Figura 15).

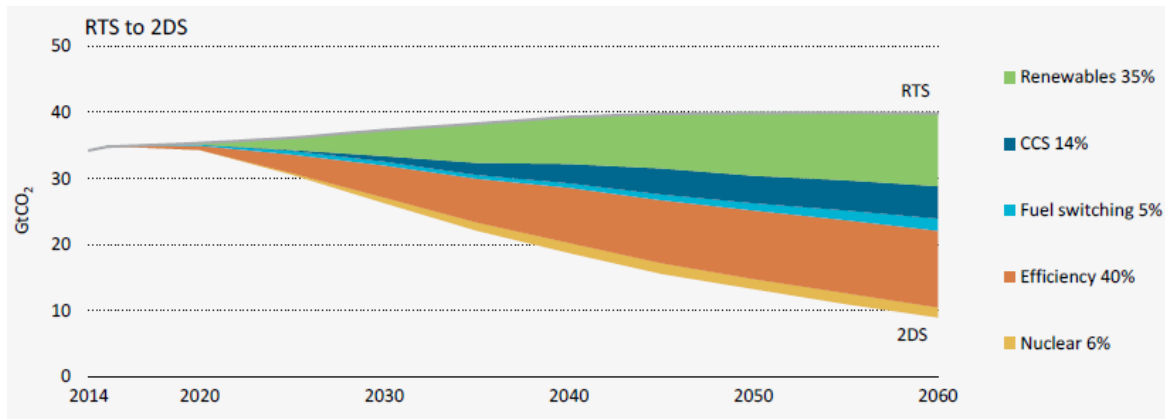


Figura 15: Contribución a la reducción de emisiones del sector energético necesaria para no aumentar la temperatura media global 2°C. (Fuente: IEA)

Actualmente parece ser que la reducción en la demanda y la descarbonización se están empezando a realizar globalmente. En 2017 se presenció, tras dos años de estancamiento, un crecimiento de las emisiones del sector energético de solo 1,4 % respecto 2016 (Figura 16). Un valor muy por debajo del histórico crecimiento anual de 2 % gracias a la reducción de emisiones por PIB y una desaceleración en el PIB/cápita (27).

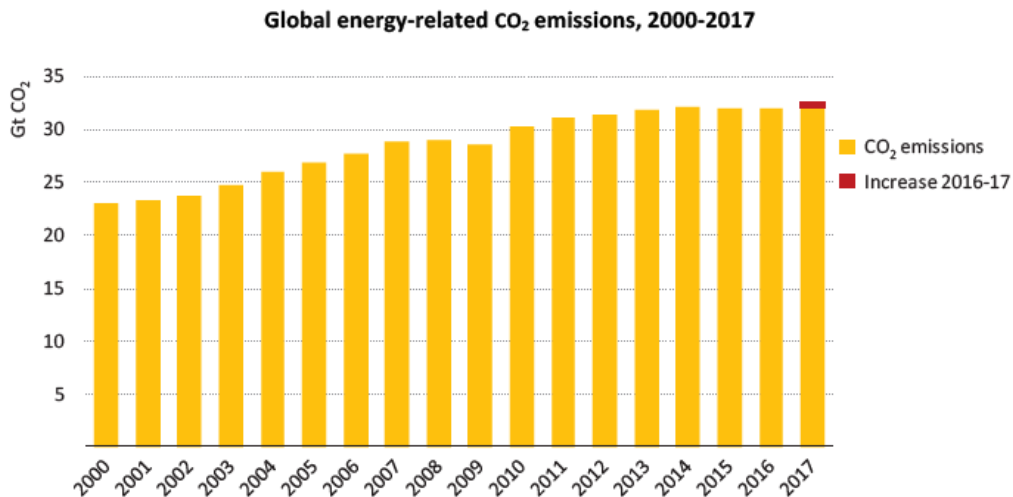


Figura 16: Evolución de las emisiones de CO₂ del sector energético global. (Fuente: IEA)

Fuera del sector energético existe un gran potencial para reducir las emisiones de GEI en la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (AFOLU). La acción de mitigación más directa de este sector consiste en crear sumideros de carbono terrestre, por ejemplo mediante la reforestación.

Además, este sector se encuentra vinculado al anterior por la bioenergía. Adquiriendo una gran importancia cuando se considera en la combinación de bioenergía con técnicas de captura y almacenamiento de carbono (BECCS) capaces de producir energía con emisiones negativas.

A continuación se muestra un diagrama propio con las acciones clave en la mitigación del cambio climático que se han extraído del estudio de toda la literatura científica analizada en este proyecto. En los siguientes subcapítulos se procede a detallar cada una de estas acciones (Figura 17):

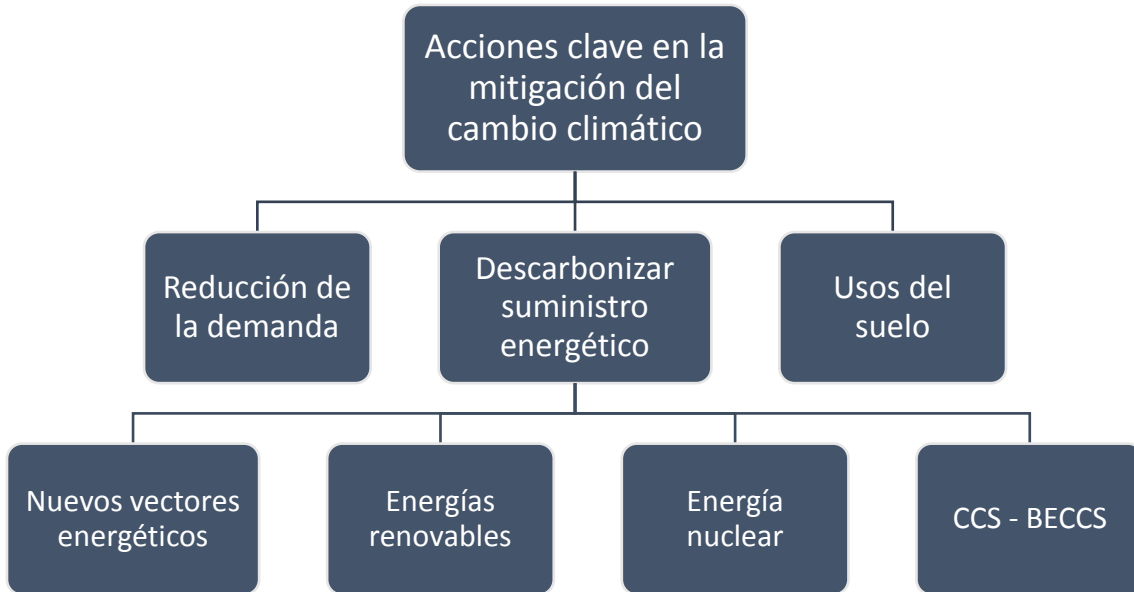


Figura 17: Diagrama de las acciones clave para la mitigación del cambio climático. (Fuente: Elaboración propia a partir del estudio de la literatura científica analizada)

4.1. Reducción demanda energética

La demanda energética mundial siguió creciendo en 2017 con un incremento del 2,1 % hasta alcanzar los 14.050 millones de toneladas de petróleo equivalente (Mtoe), mientras que la intensidad energética se redujo un 1,7 % ese mismo año. Por lo tanto, se muestra una tendencia creciente en la eficiencia energética (Energía/PIB) que aún no es suficiente para compensar el crecimiento de la riqueza (27). Aunque cabe destacar positivamente a favor de la reducción de emisiones una aceleración en la intensidad energética en la última década (28)(Figura 18):

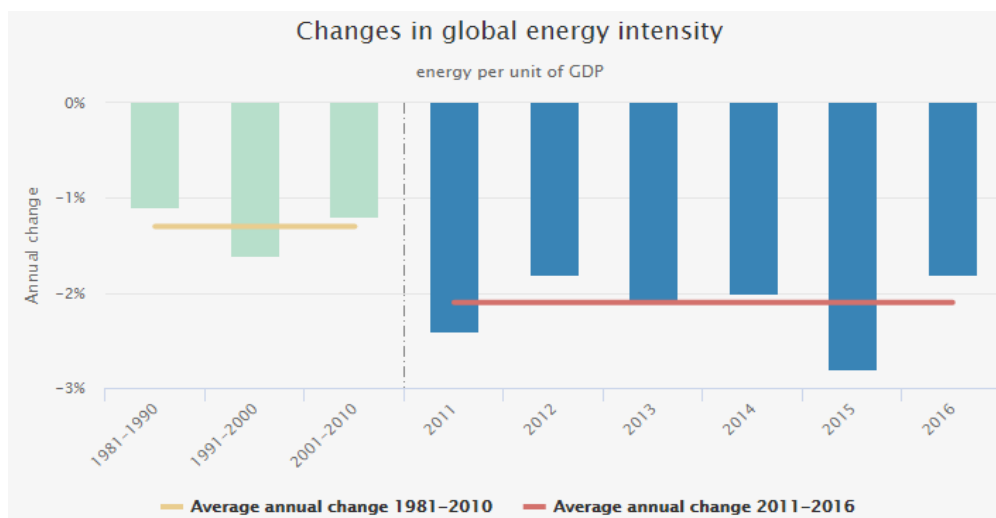


Figura 18: Cambio porcentuales anuales en la intensidad energética (energía/PIB). (Fuente: IEA)

Como se ha mencionado con anterioridad, la reducción de la demanda para disminuir la intensidad energética juega un papel importante a corto plazo dado que el suministro aún depende en gran medida de la energía fósil durante la primera mitad de siglo. Es mejor aplicar estrategias de eficiencia energética para reducir emisiones GEI cuando el mix energético tiene una intensidad de carbono mayor (Ver Figura 19).

Los escenarios de referencia simulados por diferentes modelos demuestran que los objetivos de eficiencia energética, es decir reducción de la intensidad energética, relacionados con bajas emisiones a largo plazo estarán cerca de alcanzarse a lo largo de este siglo (2)(Figura 19).

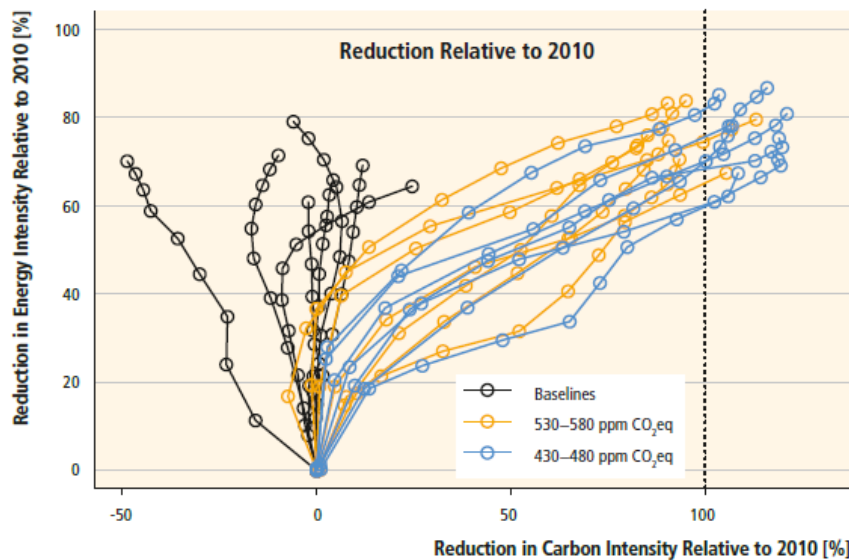


Figura 19: Evolución de la intensidad energética e intensidad de carbono. Nota 1:Cada marcador de cada línea es una división temporal en décadas. Nota 2: La desviación a la izquierda muestra descarbonización del sistema y la evolución ascendente eficiencia energética (Fuente: IPCC).

A continuación se indican algunas acciones para la reducción de la demanda en los principales sectores consumidores:

- Suministro energético

El principal consumidor de energía es el propio sistema de suministro energético, con sus pérdidas y consumo para generación. La diferencia entre la energía primaria producida (TPES) y la energía final consumida (TFC) en 2015 fue de un 31,2 % (29). Por ello es muy importante mejorar la eficiencia del sistema para reducir las emisiones de forma intersectorial.

Uno de los puntos donde se producen más pérdidas en el suministro energético es en el transporte y distribución del vector energético. En concreto la electricidad presenta unas grandes pérdidas en las redes de transporte y distribución, alcanzando 6,3 % en países pertenecientes OCDE y 9,6 % en países no pertenecientes según datos de 2015. En algunos casos extremos como Honduras, Congo o Paraguay estas pérdidas pueden alcanzar el 25 % (30).

- Transporte

El sector del transporte mantiene un crecimiento anual del 2,5 % desde 2010 y es responsable del 23 % de las emisiones de CO₂ asociadas al consumo energético (26). Las acciones potenciales para reducir la demanda son un cambio en la modalidad de transporte conjunto un cambio en el comportamiento, mejoras en el rendimiento de los motores e inversiones en infraestructuras.

Se espera que la mejora en el rendimiento de los vehículos se sitúe entre un 30 -50% dependiendo del tipo de vehículo (31). Y el desarrollo urbano con planificación integrada para promover el transporte en bicicleta o caminando permita reducir la intensidad en carbono del transporte en un 20-50 % (2).

Sin intervenciones políticas las emisiones del sector del transporte pueden ir aumentando hasta finales de siglo debido al rápido crecimiento de la demanda previsto. Pero los diferentes escenarios que consideran acciones políticas muestran que las emisiones del transporte no afectarán a la consecución de los objetivos de concentraciones a largo plazo más ambiciosos (2).

- Industria

El sector industrial es donde más se ha desarrollado la eficiencia energética debido al cobeneficio económico que conlleva reducir el consumo energético. Su consumo de energía presenta una tendencia creciente aunque ralentizada en los últimos años, en 2014 creció un 1,3 % alcanzado 145 EJ (26).

La intensidad energética del sector industrial se podría reducir hasta un 25 % con respecto niveles de 2010 si se procede a una actualización, reemplazo y despliegue de las mejoras tecnológicas ya disponibles, particularmente en sectores no intensivos en energía y países en vías de desarrollo (2). Además, suponiendo una reducción adicional en la intensidad energética del 20 % gracias a la futura innovación, se logrará cumplir los objetivos de reducción pese a aumentar la producción (32).

Las mejores oportunidades de inversión y desarrollo de la eficiencia energética se encuentran en países en vías de desarrollo, dado que las nuevas instalaciones ofrecerán un salto tecnológico y evitarán el uso de tecnologías más contaminantes.

- Edificios

El consumo de energía en las viviendas sigue creciendo a un ritmo de un 1 % desde 1990 pese a la multitud de países que han implementado políticas al respecto. Los países desarrollados disminuyen su consumo promedio per cápita mientras que los países en vías de desarrollo lo aumentan (26).

En los países desarrollados los cambios en el comportamiento pueden ayudar a reducir la demanda un 20 % en el corto plazo respecto los niveles actuales sin apenas apreciar reducción del bienestar (33). En cambio, en los países en desarrollo cobra mayor importancia la implementación ambiciosa de eficiencia energética en viviendas, dado que larga vida útil de los edificios puede provocar un bloqueo para la reducción de la intensidad energética (2).

4.2. Descarbonización suministro energético

Si se observa conjuntamente la evolución del PIB (GDP en inglés), demanda de energía y emisiones de CO₂ del sector energético en los últimos años, se puede intuir como ha evolucionado la eficiencia energética y la descarbonización del sector energético. Por una parte, un crecimiento del PIB superior al crecimiento del consumo de energía indica que la intensidad energética ha mejorado, como se ha comprobado anteriormente (Ver capítulo 4.1). En cambio, las emisiones del sector crecen por encima del consumo indicando una mayor intensidad de carbono de la energía (Ver Figura 20). Aunque esta tendencia parece cambiar desde 2015, mostrando un clara tendencia global hacia la descarbonización del sector (27).

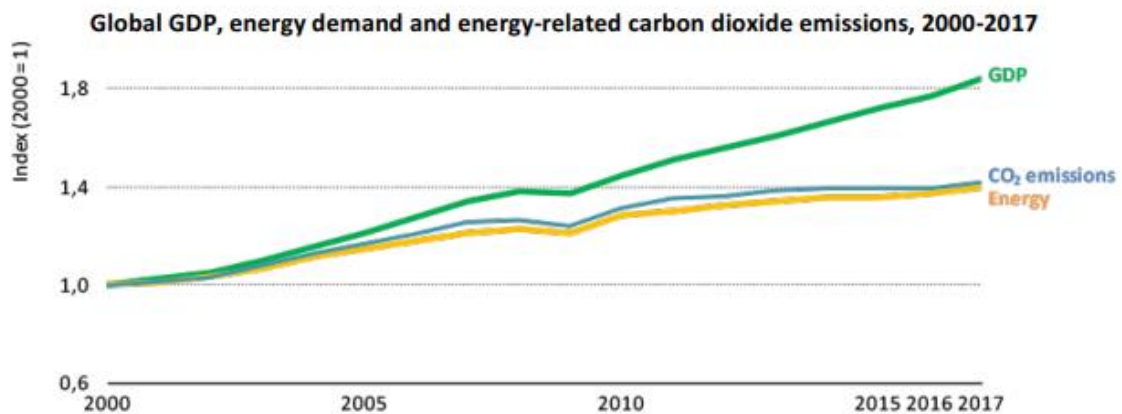


Figura 20: Evolución del PIB, demanda de energía y emisiones del sector energético en el periodo 2000-2017. (Fuente: IEA)

Como se ha mencionado en el capítulo 3.2, la idea de una descarbonización del sector energético por falta de recursos fósiles es errónea debido a que tal escasez no se producirá durante el siglo XXI. Nuevos descubrimientos de yacimientos fósiles y la mejora tecnológica para convertir tales recursos en técnicamente y económicamente explotables ha provocado que las reservas probadas mundiales aumenten. Según datos de *British Petroleum*, entre 2006 y 2016 las reservas probadas en volumen aumentaron un 23 % para petróleo y un 18 % para el gas natural (34).

Las modelizaciones de los futuros escenarios realizadas por la comunidad científica demuestran que existe, o se desarrollará en el futuro, tecnología suficiente para descarbonizar el sector energético para lograr los objetivos de bajas emisiones a largo plazo más ambiciosos (2). Aunque el cumplimiento de tales objetivos dependerá de la implicación de políticas climáticas para desarrollar la necesaria transformación en el sector energético.

A continuación se describe de manera breve el estado del arte de las tecnologías o estrategias para lograr la descarbonización del suministro energético (Ver Figura 17):

4.2.1. Nuevos vectores energéticos

Para lograr una descarbonización completa del sistema energético se deben eliminar los combustibles fósiles utilizados en multitud de sectores, como por ejemplo el transporte o la calefacción en viviendas. En algunos de estos sectores los combustibles fósiles de uso directo en el lugar de consumo son mayoritarios, por ello su eliminación a escala global supone un gran reto.

Como vectores energéticos para sustituir los combustibles fósiles se presenta la electricidad con un gran desarrollo por la rápida descarbonización en su producción prevista y la bioenergía jugando un papel importante como biocombustible. Algunos estudios identifican el hidrógeno como un potencial sustituto a largo plazo, aunque aún se encuentra en fase de desarrollo e investigación (2)(Ver transporte en Figura 24).

La electricidad adquiere un rol importante en la sustitución de los combustibles fósiles debido a la rápida descarbonización que se espera en su producción. En los escenarios con objetivos más ambiciosos el 80 % de la producción de electricidad es baja en emisiones para 2050 y 100 % en 2100 (2)(Ver Figura 21). Para lograr esta descarbonización el sistema se debe transformar en una combinación de las tecnologías que se detallan en los siguientes capítulos.

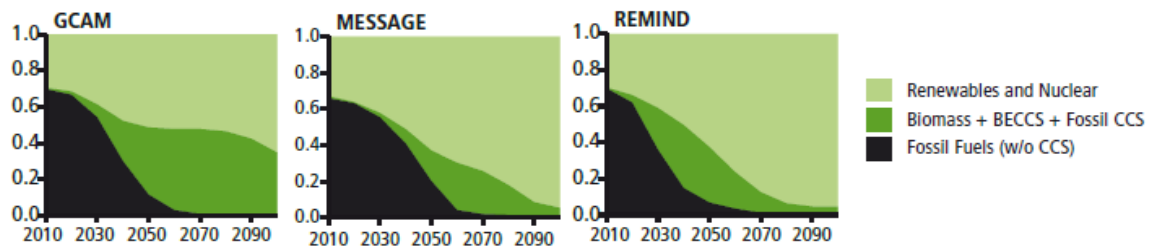


Figura 21: Resultados de la distribución de la producción de electricidad para lograr concentración 450-530 ppm de tres modelizaciones de referencia. (Fuente: IPCC)

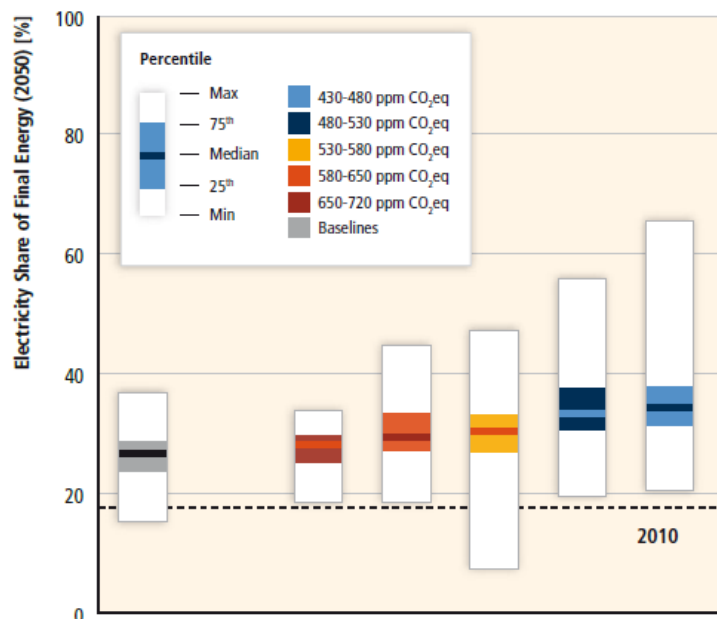


Figura 22: Porcentaje electricidad en el consumo final de energía según diferentes escenarios de concentración. (Fuente: IPCC)

La electrificación se está llevando a cabo pero es un proceso lento, sobre todo en sectores donde los combustibles fósiles son más competitivos y rentables. En 2015 la electricidad fue el vector energético del 18,5 % del consumo mundial, doblando el 9,4 % de 1973 (29). El objetivo marcado por los escenarios más exigentes es superior al 35 % de la electricidad en el consumo total de energía (Ver Figura 22)(2).

Para la descarbonización del suministro de combustibles líquidos, principalmente planteado para el transporte, la bioenergía mediante bioetanol o biodiesel más el gas natural se ofrecen como soluciones factibles para evitar el uso de derivados del petróleo (2). Cabe recalcar la variación en la necesidad de combustibles líquidos entre las diferentes modelizaciones por la cual existe una diferenciación entre los objetivos de reducción de derivados del petróleo (Figura 23).

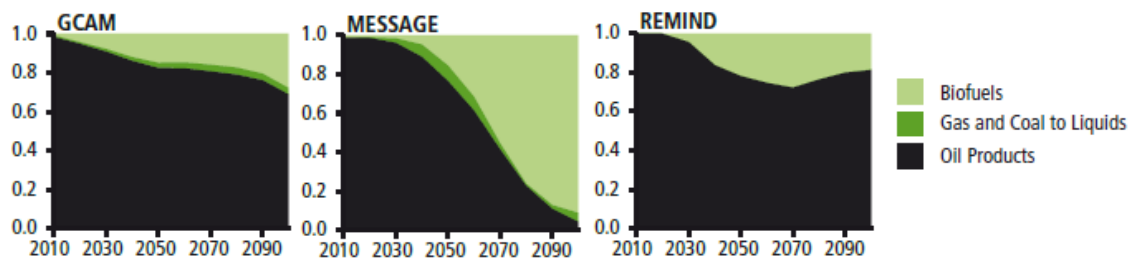


Figura 23: Resultados de la distribución del suministro de combustibles líquidos para lograr concentración 450-530 ppm de tres modelizaciones de referencia (Fuente: IPCC)

Realizando una visión sectorial se tiene que destacar el transporte. Responsable del 23 % de las emisiones relacionadas con la energía y sector donde los combustibles fósiles se encuentran más arraigados. Probablemente su descarbonización suponga un cuello de botella para el cumplimiento de los objetivos de bajas emisiones (26).

En 2016 los biocombustibles convencionales representaron un 4 % del combustible mundial para transporte de carretera, gracias a un rápido crecimiento que ahora se encuentra desacelerado por las posibles barreras de la bioenergía (26).

Además del desarrollo de los biocombustibles, la electrificación del transporte de carretera ha cogido impulso en los últimos años. En 2017 se registraron más de 3 millones de automóviles, 370.000 autobuses y 250 millones de vehículos a dos ruedas con electricidad como combustible (35).

Según los escenarios modelizados con objetivos de bajas emisiones, se empieza a observar una sustitución importante de los combustibles fósiles entre 2020-2030. En ellos la electricidad y los biocombustibles empiezan a adquirir importancia a mediados de siglo. Al final de siglo no existe una fuente de suministro predominante sino una combinación donde aparece el hidrógeno con una representación entre 20-30 % (2)(Ver Figura 24).

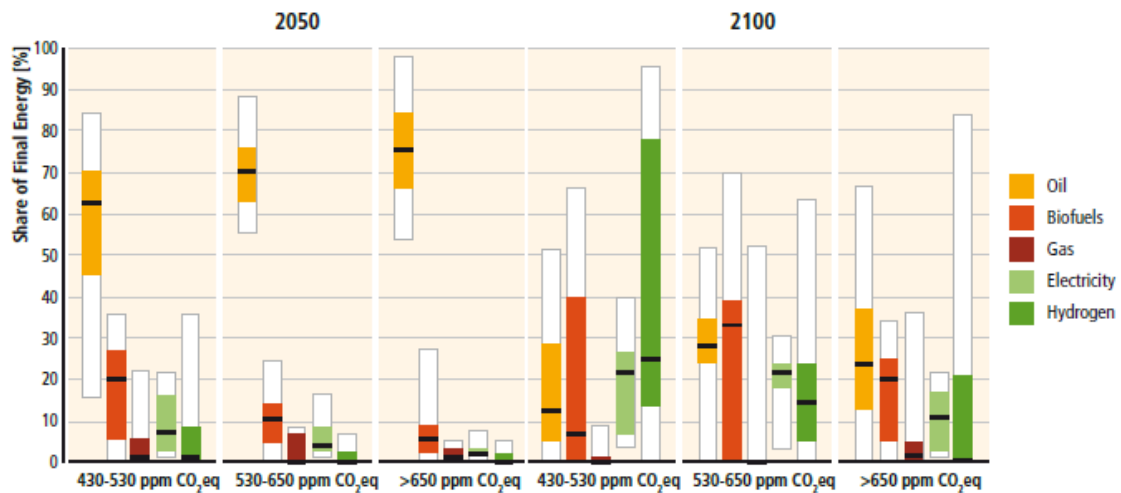


Figura 24: Modelizaciones de la distribución del suministro energético del transporte para diferentes objetivos de concentración. (Fuente: IPCC)

4.2.2. Energías renovables

Actualmente el mix energético mundial es dominado completamente por los recursos fósiles. En 2015 carbón, petróleo y gas representaron el 81,4 % de la demanda energética, reduciendo la contribución de las energías bajas en emisiones de CO₂ a un 18,6% con la gran contribución de la biomasa tradicional (Figura 25). Aunque su desarrollo ha aumentado rápidamente en las últimas décadas, su porcentaje en la energía primaria solo ha crecido 5,3 puntos porcentuales desde 1973 (29).

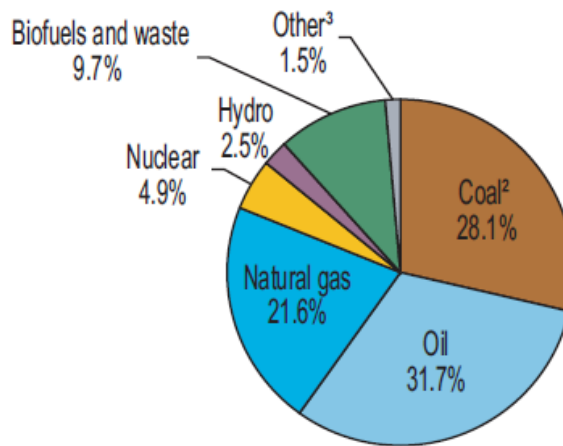


Figura 25: Distribución de energía primaria según tipo de producción en 2015. Nota: Las energías renovables se encuentran en la categoría *Other* (Fuente: IEA)

Al representar la distribución de tecnologías para la producción de electricidad, vector energético que debe expandirse en el futuro mediante la electrificación del sistema (Ver Figura 22), se identifica una mayor contribución de las tecnologías de generación bajas en emisiones de CO₂. La contribución de los recursos fósiles disminuye al 66,3 % aunque negativamente el carbón, recurso fósil con mayores emisiones, aumenta su peso en la producción de electricidad comparado con la energía primaria (30)(Ver Figura 26).

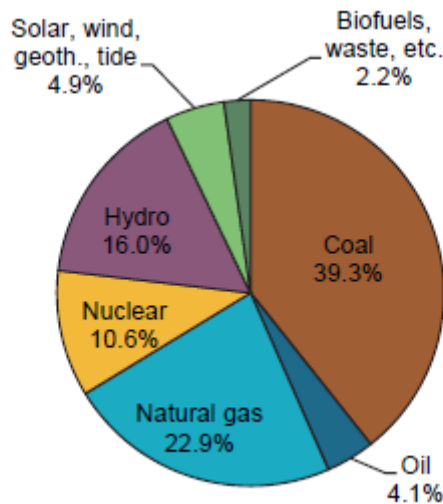


Figura 26: Distribución de la producción de electricidad según tipo de tecnología de generación en 2015. (Fuente: IEA)

Las energías renovables son una de las estrategias capaces de mitigar las emisiones del sector energético. Concretamente juegan un papel muy importante en la producción de electricidad (Ver Figura 21), dado que la mayoría de este conjunto de tecnologías se utiliza para su generación. Aunque la electricidad proporcione menos del 20 % de la energía total, se espera un crecimiento por la necesaria sustitución de los combustibles fósiles (Ver Figura 22). Por ello las energías renovables adquieren mayor importancia en un futuro en la reducción de emisiones.

Según diferentes estudios recopilados en el informe del IPCC *“Mitigation of Climate Change”* hasta ahora solo se ha utilizado una pequeña fracción del potencial técnico de las energías renovables. Un potencial técnico disponible que pese a la dificultad para realizar una estimación se ha identificado que es superior a la demanda global de energía (36)(Ver Figura 27).

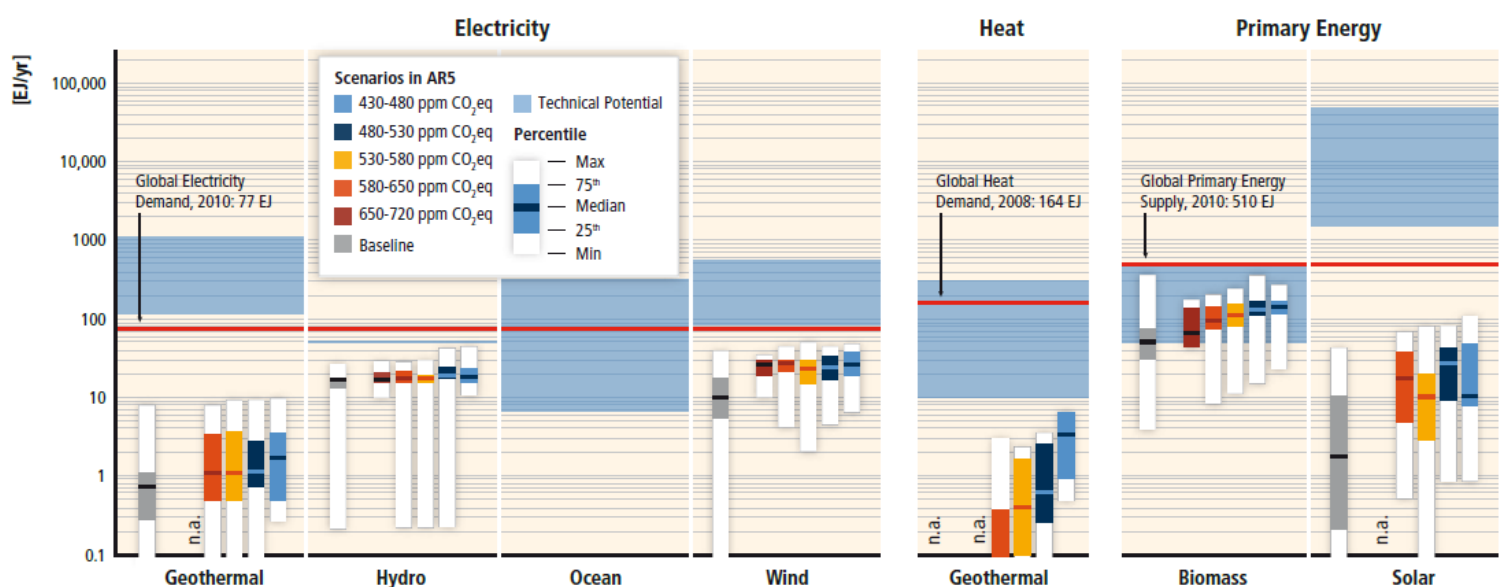


Figura 27: Estimación del potencial técnico de las energías renovables y sus proyecciones según diferentes escenarios de concentración. (Fuente: IPCC)

En la Figura 27 también se puede observar como el despliegue de las energías renovables en diferentes escenarios de concentración siempre se encuentra por debajo del potencial técnico global estimado, a excepción de la biomasa. Por lo tanto no existe una limitación por falta de recurso renovable, alcanzar los objetivos para cada energía dependerá de las políticas climáticas.

Actualmente las energías renovables se encuentran al alza y presentan un crecimiento acelerado en la mayoría de tecnologías. En 2016 la generación de electricidad renovable mundial creció aproximadamente un 6 %, logrando contribuir un 24 % a la producción mundial de electricidad. La energía hidroeléctrica es la fuente renovable de energía mayoritaria con un 70 % (Ver Figura 26), seguida por la energía eólica 16 %, bioenergía 9 % y fotovoltaica 5 % (26).

En 2015 se produjo un hecho que muestran de forma clara la dirección hacia la descarbonización que se ha tomado en el sector energético. Por primera vez el conjunto de potencia eléctrica renovable instalada representó más de la mitad de la nueva potencia instalada con 153 GW, superando al carbón que normalmente era el mayoritario por el despliegue de esta tecnología en países en desarrollo (26).

Dentro de la nueva potencia renovable instalada también se observó un cambio en 2016 con el *sorpasso* de la energía fotovoltaica a la eólica en cuanto a nueva potencia eléctrica instalada. Se instalaron 75 GW de fotovoltaica conectada a red con un 50 % más de crecimiento que en el año anterior debido a la duplicación de la potencia instalada en China. Aunque la eólica onshore redujera su crecimiento en 2016 se instalaron 50 GW eléctricos (Ver Figura 28)(26). El rápido desarrollo e implementación de estas tecnologías se debe a las políticas de promoción realizadas en gran cantidad de países y el rápido descenso en los costes de producción de la energía eólica y fotovoltaica.

Se prevé un crecimiento del 36 % de la energía renovable eléctrica global entre 2015-2021, superando una producción de 7.650 TWh al final del periodo. Sin embargo se requiere un incremento adicional del 26 % para lograr 10.300 TWh, valor marcado para la consecución del objetivo 2DS. Solo la energía eólica en tierra y la energía fotovoltaica lograrán sus objetivos concordados a la limitación de temperatura media global y probablemente se requiera más de estas tecnologías para reducir el riesgo de no alcanzar los objetivos de generación eléctrica renovable (Ver Figura 28)(26).

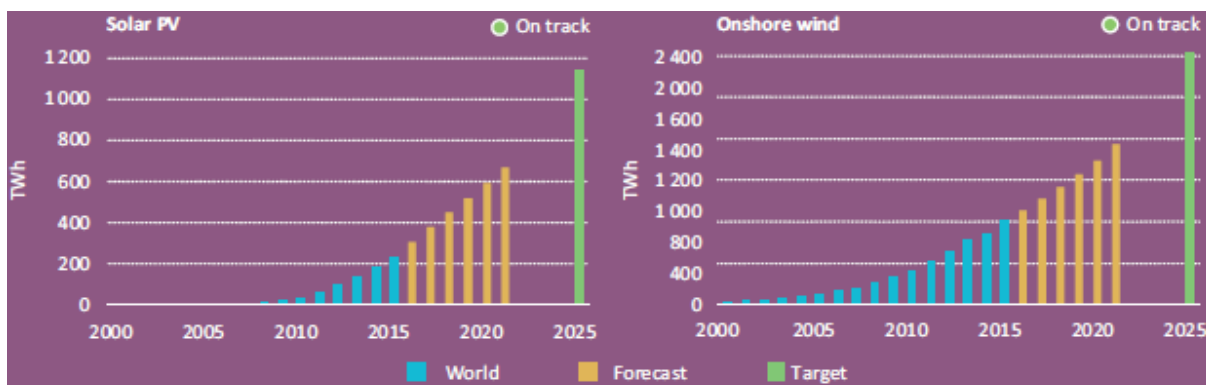


Figura 28: Evolución y proyección de la producción de energía eléctrica renovable solar, eólica y bioenergía. (Fuente: IEA)

Fuera de la generación eléctrica renovable habría que destacar la energía geotérmica para la producción de calor (Ver Figura 27). Se tiene un gran potencial geotérmico por explotar que requiere promoción para su desarrollo. También destacar la bioenergía que juega un papel importante en la sustitución de combustibles fósiles (Ver Figura 23 y capítulo 4.3), además de tener que contribuir a la producción de electricidad siendo la cuarta tecnología con mayor producción necesaria, detrás de hidroeléctrica, eólica y solar.

4.2.3. Energía nuclear

La energía nuclear es una tecnología con muy bajas emisiones de GEI. Actualmente contribuye con una reducción entre 1,3 y 2,6 gigatoneladas de CO₂ anualmente y se estima que desde 1980 ha permitido evitar la emisión de 60 Gt CO₂ en total. Por ello supone una de las tecnologías bajas en emisiones de CO₂ que debe crecer para reducir las emisiones del sector energético, según IEA debería suponer en 2050 un 14 % de la reducción de emisiones necesaria para lograr los objetivos de bajas concentraciones a final de siglo (Ver Figura 14)(37).

No obstante la contribución de la energía nuclear se ha disminuido en los últimos años hasta reducirse a un 11 % de la energía eléctrica mundial cuando en 1993 representaba el 17 % (26). Reducción debida a la principal barrera que se encuentra esta tecnología en la no aceptación pública tras el reciente accidente en la central de Fukushima en 2011 y el recuerdo en la memoria del accidente de Chernóbil en 1986. En la evolución de la energía nuclear se puede observar como tales accidentes redujeron en los años posteriores el número de instalaciones en construcción y la nueva potencia conectada (Ver Figura 29) (37).

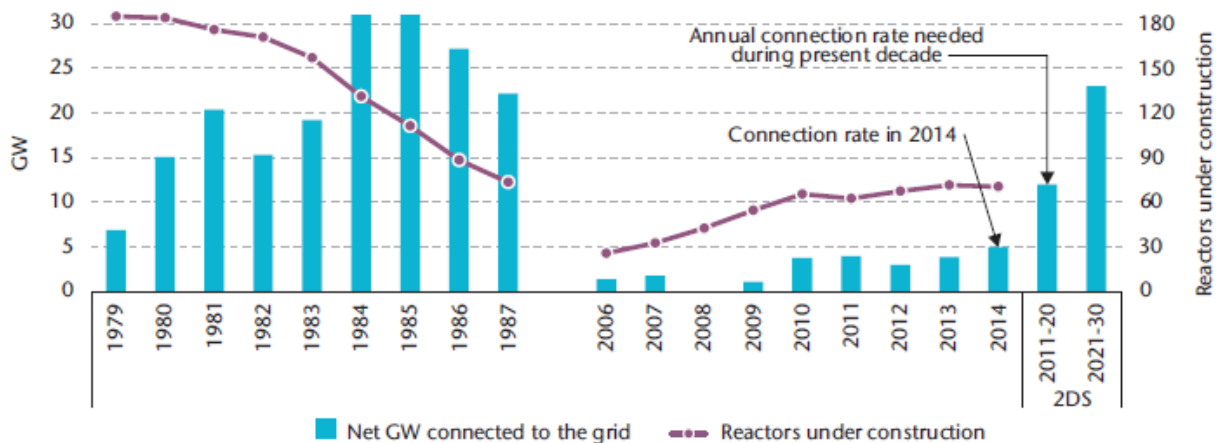


Figura 29: Evolución de las instalaciones nucleares en construcción y potencia nueva instalada. (Fuente: IEA)

Según los objetivos de desarrollo para evitar sobrepasar los 2°C de aumento de la temperatura media global respecto a valores preindustriales, la energía nuclear debería colaborar en la descarbonización volviendo a representar el 17 % de la producción eléctrica mundial durante este siglo (37).

A corto plazo este objetivo se traduce en alcanzar una potencia instalada entre 402 y 535 GW, un rango de potencia que se alcanzará con los actuales 413 GW y 66 GW en construcción. Sin embargo, en algunos países se está produciendo una retirada gradual de la energía nuclear antes de finalizar la vida útil de las instalaciones. Sin limitar estos cierres, el desarrollo de la energía nuclear podría quedarse a 70-90 GW del objetivo en 2025 (26). Más adelante el incremento anual de nuevas instalaciones debería aumentar para poder superar los 900 GW a mitad de siglo (Ver Figura 29).

4.2.4. CCS: Captura y almacenamiento de carbono

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono, en inglés *Carbon dioxide Capture and Storage* (CCS), es un proceso que consiste en separar el CO₂ de la corriente de emisiones de la combustión de combustibles fósiles, transportarlo e inyectarlo comprimido en una estructura geológica adecuada para almacenarlo y evitar su emisión a la atmósfera. Se trata de la única tecnología capaz de reducir las emisiones de CO₂ permitiendo que la energía fósil siga existiendo (38).

Esta tecnología tiene mayor facilidad de funcionamiento en instalaciones donde las emisiones tengan una alta pureza de dióxido de carbono (> 85 %), como plantas de procesamiento de gas natural u otras industrias químicas. Su desarrollo a corto plazo se prevé en este tipo de industrias aunque también se requiere su despliegue en el sector del suministro energético y transporte, este último mediante la combinación con bioenergía (BECCS).

Dado que el sistema energético actual tiene una mayoría de recursos fósiles (Ver Figura 25) la descarbonización no se puede realizar a corto plazo, sino que se trata de una transformación gradual donde la energía fósil disminuye a lo largo del siglo XXI (Ver Figura 21). CCS para la generación de energía fósil permite acelerar la descarbonización pese a existir la combustión de estos recursos, por ello es tan importante su implementación. Según las publicaciones científicas en las que se base el 5º informe del IPCC, su desarrollo y despliegue son un requisito para lograr concentraciones de 450 ppm CO_{2eq} a finales de siglo, particularmente si el pico de emisiones se produce tras 2030 por un retraso en las acciones de mitigación (2).

La falta de espacio de almacenamiento geológico no supone un problema, dado que para escenarios por debajo de 500 ppm CO_{2eq} se requiere entre 448 y 1.000 Gt CO₂ y la estimación sobre la capacidad práctica de almacenamiento ronda los 3.900 Gt CO₂ (39). En contra, sí supone un gran desafío pasar del nivel del megatoneladas capturadas y almacenadas actual a centenares de gigatoneladas necesarias que requerirán grandes cuencas profundas y proyectos de inyección a gran escala (38).

En relación a los riesgos de esta tecnología existe mucha literatura científica que analiza los problemas derivados y busca estrategias para minimizar los posibles impactos. Destacar como posibles consecuencias la sismicidad inducida y el efecto sobre la salud y ecosistema por migración del dióxido de carbono. Como soluciones se plantean sistemas de medición, monitoreo y verificación para identificar cualquier desviación en la estabilidad del almacenamiento (2).

Las plantas de captura y almacenamiento de carbono están en fase de investigación y desarrollo aunque ya existen algunas plantas operativas. En 2017 ya se contabilizaron 17 plantas CCS en plena operación con una capacidad de captura total de 30 Mt CO₂. Entre las cuales destaca las nuevas incorporaciones de 2016: una primera planta CCS para una industria de acero y la planta CCS para combustión de carbón más grande del mundo “Texas Petra Nova Project” (26).

Pese al crecimiento del sector, la tecnología CCS no se encuentra en vías de alcanzar el objetivo necesario para una reducción de emisiones que limite el aumento de temperatura en 2°C. Tal objetivo se sitúa en 400 Mt CO₂ para 2025, por lo tanto se requiere que la capacidad de captura y almacenamiento actual se multiplique por 10. No supone un grave problema debido a que la contribución de CCS a la reducción de emisiones en 2025 es muy pequeña (Ver Figura 15) pero se debería corregir la dirección de esta tecnología (26).

Sí supone una alarma la falta de inversión de los últimos años en la tecnología de captura y almacenamiento de carbono. En 2016 solo se invirtieron 1,2 billones de dólares mientras que las energías renovables recibieron 279 billones de dólares. Esta falta de inversión e interés político ha causado la caída de 77 proyectos en operación, construcción o desarrollo de 2010 a 37 en 2017 (Figura 30). Según expertos de la IEA, se trata de un bloqueo al despliegue de la tecnología CCS debido barreras políticas y comerciales, no técnicas porque se trata de una tecnología madura y con experiencia (40).

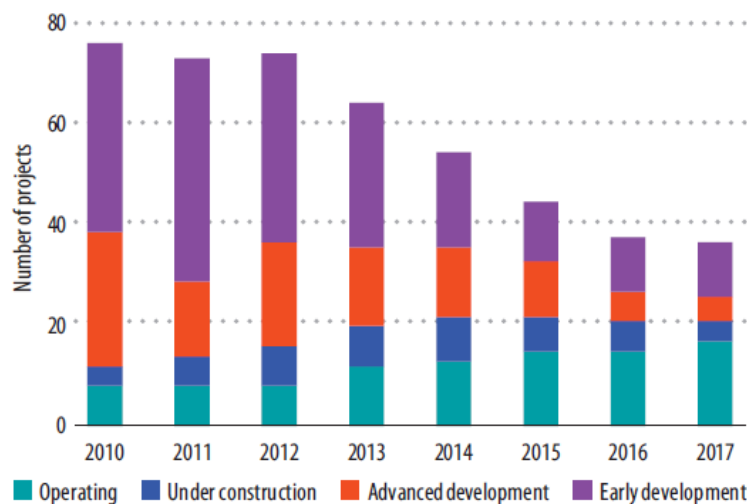


Figura 30: Evolución del número de proyectos de captura y almacenamiento de carbono. (Fuente: IEA)

En primer lugar, este bloqueo es debido a la no aceptación pública de la técnica CCS debido a los riesgos de seguridad, salud y ambientales. Se encuentran puntos de vistas negativos en ONG ambientales como Greenpeace, donde justifican su posición declarando que la inversión en CCS para recursos fósiles socava el desarrollo de las renovables. El ámbito político sigue la aceptación pública y rechaza la tecnología por costosa, insegura e impopular (41).

En segundo lugar, con el bajo precio actual de los derechos de emisión la técnica CCS no es rentable y por ello no puede competir en el mercado. Algunas modelizaciones recogidas en el informe *“Mitigation of Climate Change”* (2) indican que un precio entre 100 y 150 \$/tCO₂ en el mercado de emisiones permitiría el despliegue necesario para la tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, incluida BECCS.

4.2.5. BECCS: Bioenergía con captura/almacenamiento carbono

La captura y almacenamiento del CO₂ de la producción de bioenergía, en inglés *Bio-energy with Carbon Capture and Storage* (BECCS), es un proceso que captura y almacena geológicamente las emisiones de CO₂, secuestradas previamente de la atmósfera, de la combustión de materia biogénica. BECCS supone una técnica de geoingeniería de eliminación de CO₂ en la atmósfera, en inglés *Carbon Dioxide Removal* (CDR), que permite producir energía con emisiones negativas (41)(Ver Figura 31).

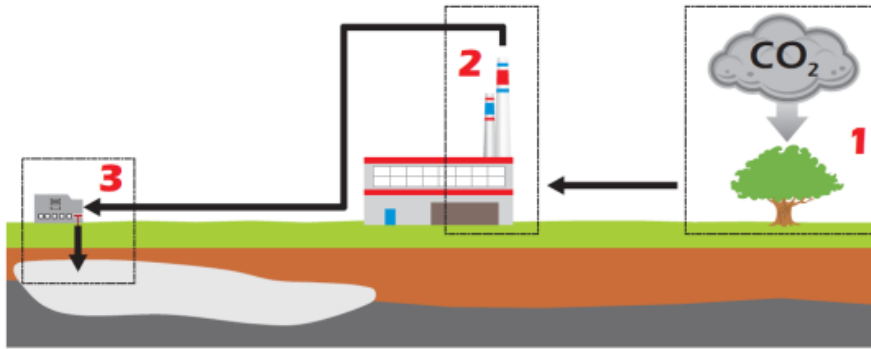


Figura 31: Esquema simplificado del funcionamiento de BECCS. (Fuente: IEA)

Debido a la necesidad de aumentar el tamaño de las instalaciones para mejorar su rentabilidad esta técnica se enfrenta a un problema logístico. Aumentar la potencia requiere aumentar la alimentación de biomasa, que tan solo puede proceder de monocultivos de alto rendimiento si se quiere tener unos costes logísticos manejables (42). Además, presenta las mismas barreras que la técnica CCS por tratarse de una derivación.

Al igual que CCS, la contribución de BECCS en la descarbonización del sector energético es primordial en los escenarios con concentraciones a largo plazo más estrictas. Se puede observar en la Figura 3 como las emisiones en el escenario de forzamiento radiativo RCP2.6 son negativas gracias a BECCS y otros usos del suelo. Además, la mayoría de modelizaciones recogidas por el IPCC indican la necesidad de considerar una contribución de la tecnología BECCS para alcanzar concentraciones de emisiones de 450 ppm CO_{2eq} (2) (Ver Figura 21 y Figura 23).

Aunque no esté claro el despliegue de la producción de bioenergía con captura y almacenamiento debido a la falta de confirmación en seguridad, asequibilidad y aceptación pública, se estima un potencial técnico mundial de reducción de emisiones entre 3 y 10 Gt CO₂/año (43).

En 2017 se inició la era de la captura y almacenamiento de carbono con producción de bioenergía con el despliegue comercial del proyecto “*Illinois Industrial CCS*”. Una primera planta que tras tres años en periodo de prueba ha desplegado su instalación de captura y almacenamiento para las emisiones de una industria de producción de bioetanol, dando lugar al secuestro y almacenamiento de aproximadamente 1 Mt CO₂ (44). Aunque sea un gran paso para el desarrollo de esta tecnología, la situación actual no es muy alentadora para cumplir el objetivo de 60 Mt CO₂ en 2025 para el objetivo de 2°C si tenemos en cuenta el bloqueo que sufre la inversión en CCS (Ver Figura 30)(26).

4.3. Usos del suelo

El sector de la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo para el provecho del ser humano supone la emisión de alrededor de 10-12 Gt CO₂eq anuales, valor que representa alrededor del 24 % de emisiones de GEI de origen antropogénico (13)(15). Dado que este sector es el segundo contribuyente de gases de efecto invernadero, la reducción de sus emisiones supone una de las claves para la mitigación del cambio climático.

El escenario de referencia para las emisiones derivadas del uso del suelo refleja cierta incertidumbre pero indican una disminución a largo plazo a partir de 2010 (2). Cabe destacar que tal reducción de emisiones se plantea por un cambio tecnológico y una disminución del área agrícola por la estabilización de la población mundial. Este último motivo se pone en entredicho con el impacto que pueda tener el ímpetu poblacional mencionado en el capítulo 3.2 (Ver Figura 7).

En las modelizaciones de los escenarios más restrictivos con la concentración de gases de efecto invernadero a final de siglo, la reducción de emisiones por acciones de mitigación en el sector AFOLU tiene un papel importante en el corto plazo (Ver izquierda Figura 32). Y aún más importancia en la reducción de GEI diferentes al CO₂ como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O).

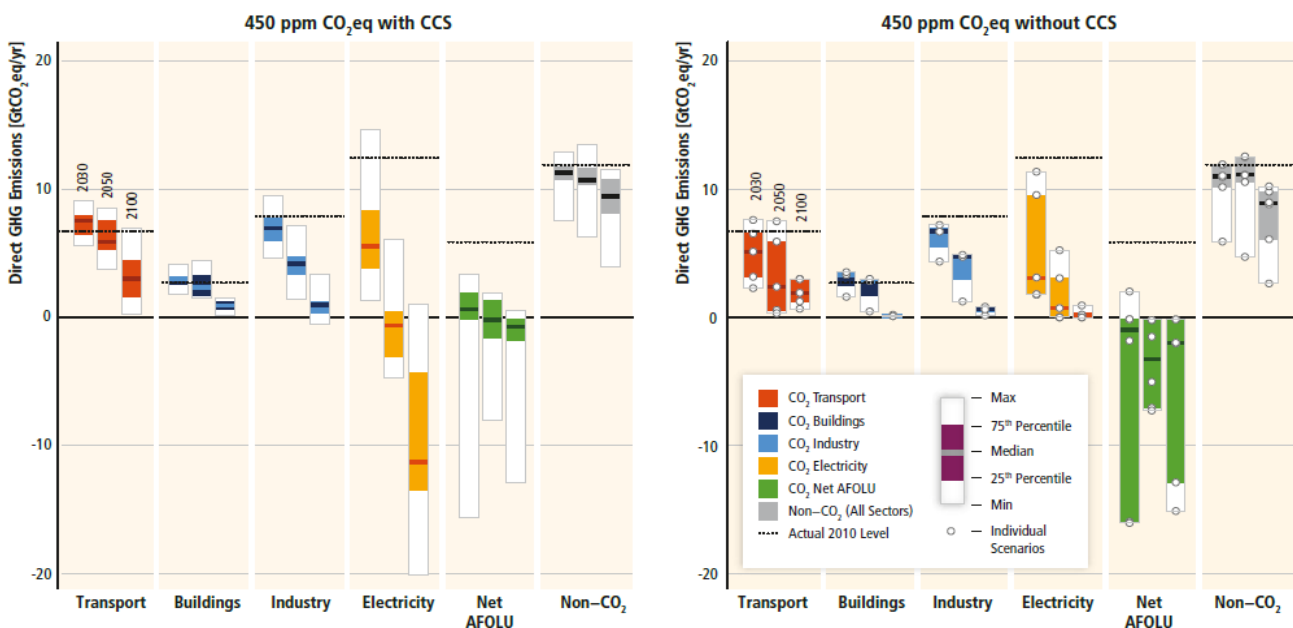


Figura 32: Distribución sectorial de los esfuerzos de mitigación para lograr el objetivo de concentración 450 ppm CO₂eq. Parte izquierda considerando despliegue CCS, parte derecha sin despliegue CCS. (Fuente: IPCC)

Se debe recalcar que en caso de una indisponibilidad del despliegue de las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, la reducción de emisiones del sector AFOLU toma toda la responsabilidad de contribuir a la mitigación del cambio climático con emisiones negativas (Ver derecha Figura 32). En este supuesto las acciones en el sector del uso del suelo deben superar el potencial económico de mitigación estimado entre 7,18 y 10,6 Gt CO_{2eq} (2). Es decir, la falta de CCS implica un coste mayor en la mitigación del cambio climático por la necesidad de implementar acciones más caras en el sector AFOLU.

Existen tres estrategias de mitigación del cambio climático en el sector AFOLU: Producción de bioenergía, almacenamiento de carbono en los sistemas terrestres y la propia mitigación de las emisiones del sector AFOLU. En esta última estrategia se pueden observar opciones de mitigación en el lado de la oferta mediante gestión de la tierra y ganadería, y en el lado de la demanda mediante la reducción de los desperdicios de alimentos, cambio de dieta o cambio en el consumo de la madera.

La bioenergía juega un rol importante en el sector energético, concretamente en la sustitución de combustibles fósiles líquidos por biocombustibles (Ver Figura 23). Aunque puede encontrarse con algunas barreras como la competitividad con el sector de la alimentación o la falta de potencial técnico (Ver Figura 27) que limiten su despliegue.

El almacenamiento de carbono en los sistemas terrestres mediante la reforestación es una estrategia de geoingeniería de eliminación del CO₂. Actualmente se está realizando en algunas regiones desarrolladas, las cuales han logrado adquirir un balance negativo entre las emisiones de las fuentes y las capturas de los sumideros (Ver línea roja Figura 33).

Según datos de 2015, la reducción en las emisiones del sector AFOLU aún no se ha producido porque el balance neto entre emisiones y eliminaciones de emisiones de GEI se ha mantenido casi constante desde que se tienen registros (15) (Ver Figura 33). Por lo tanto, la reducción de emisiones del sector no se encuentra en camino de cumplir los objetivos para lograr una concentración de emisiones a final de siglo inferior a 450 ppm CO_{2eq}.

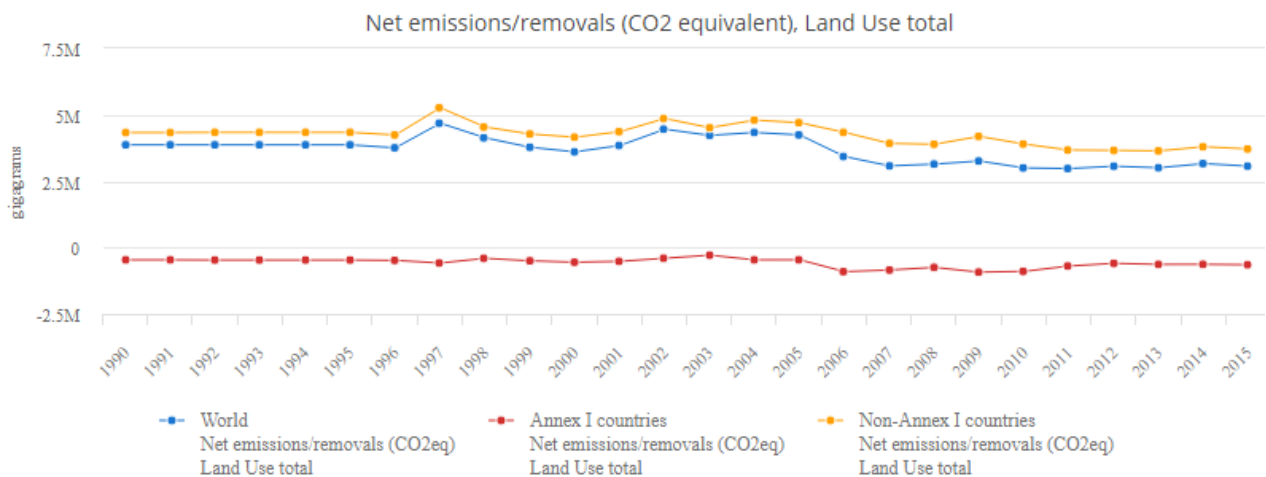


Figura 33: Evolución del balance neto emisiones/eliminaciones de CO_{2eq} del uso del suelo. (Fuente: FAOSTAT DATA)

5. Conclusiones

La evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y consecuentemente la evolución del cambio climático, vienen determinada en gran parte por el desarrollo de los combustibles fósiles y el uso del suelo. Tan solo las emisiones de dióxido de carbono de los combustibles fósiles y la industria representa el 80 % del total (2). Por lo tanto, el sector energético es el principal impulsor y conductor del cambio climático. El uso del suelo también representa un porcentaje elevado de emisiones de GEI, siendo la fuente principal de emisiones antropogénicas diferentes al CO₂.

Realizando una descomposición de las emisiones del sector energético mediante la *Identidad de Kaya* se identifican los principales impulsores de su incremento: un aumento en la población y en la riqueza de esta población acompañada de una pequeña reducción de la intensidad energética y de la intensidad de carbono en la energía.

Como método para reducir estas emisiones, conociendo que riqueza y población no dejaran de crecer, se encuentra una aceleración en la reducción de la intensidad energética, mediante estrategias de eficiencia y reducción de la demanda, y en la reducción de la intensidad de carbono de la energía, mediante la eliminación gradual de los combustibles fósiles del sistema.

Las estimaciones de referencia para los parámetros de la *Identidad de Kaya*, recogidas en el informe del IPCC 2013, muestran que al nivel de actuación previsto no se consiguen reducir las emisiones de GEI y el sistema climático alcanza un forzamiento radiativo de 8,5 W/m². Actualizando la evolución de los parámetros de Kaya en este estudio (Ver Figura 18 y Figura 20), se ha podido comprobar como no se ha producido ninguna aceleración significativa ni en la intensidad energética ni en la intensidad de carbono de la energía. Dando lugar a un aumento en las emisiones año tras año mientras la fecha límite para el pico de emisiones de 2030 se acerca (Ver Figura 34).

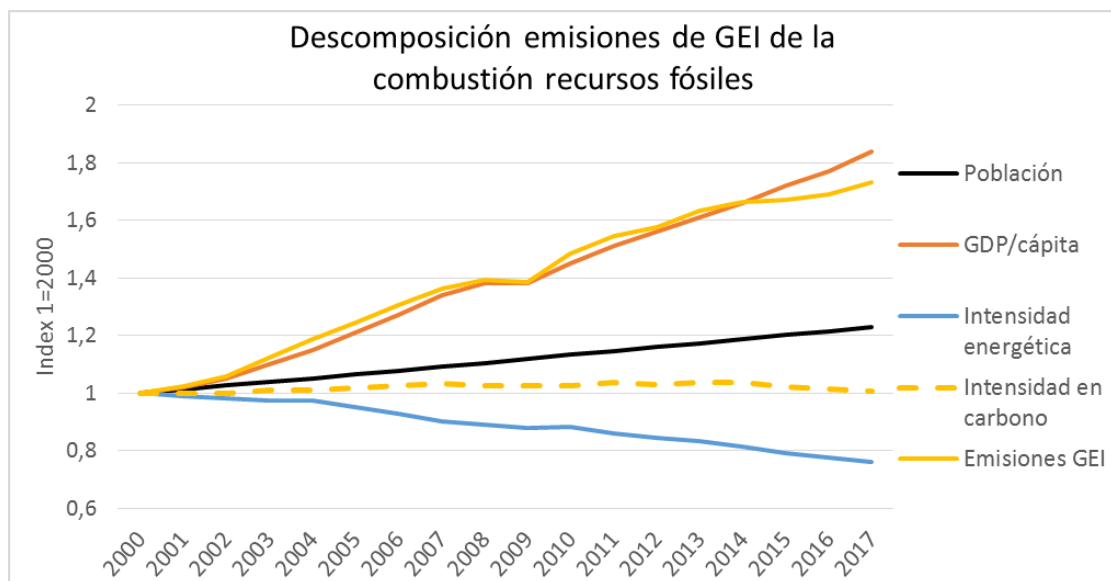


Figura 34: Aproximación de la descomposición de Kaya de las emisiones de GEI de los recursos fósiles. (Fuente: Elaboración propia a partir de datos de ONU, IEA y WorldBank)

Se ha determinado que esta continuación en el incremento de emisiones en el sector energético desde que se publicó el informe del IPCC *“Mitigation of Climate Change 2014”*, ha sido debida a que las acciones claves para la mitigación no han sido ni desarrolladas ni desplegadas lo suficiente como para cumplir sus objetivos vinculados a los escenarios de bajas emisiones (Ver Figura 35).

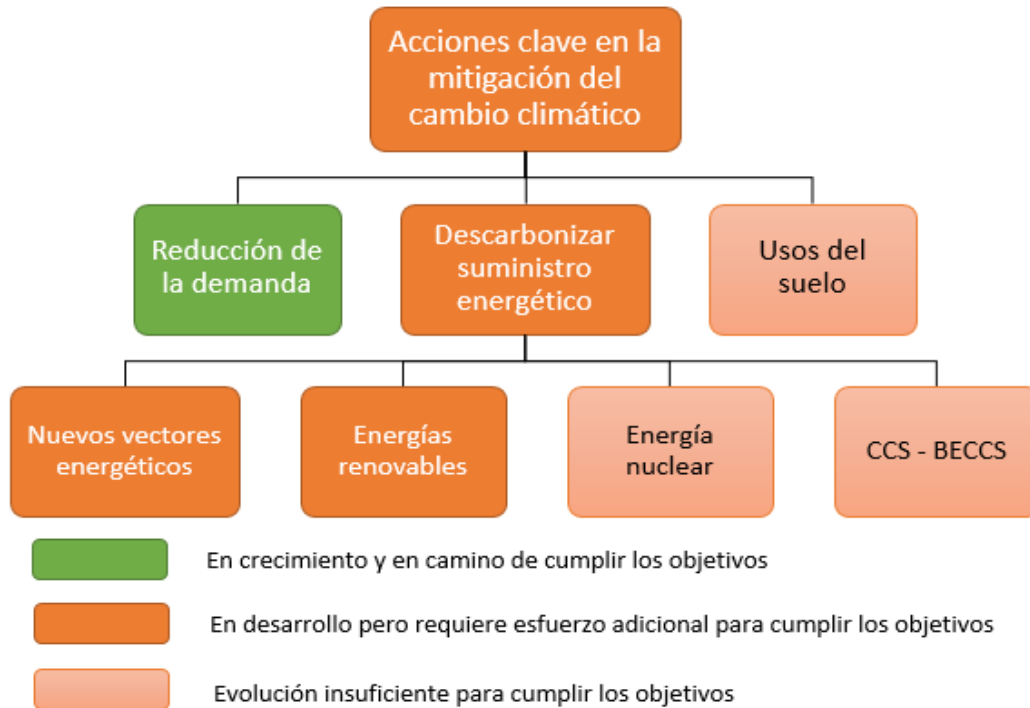


Figura 35: Estado de las acciones clave para la mitigación del cambio climático según su cumplimiento con los objetivos vinculados a escenarios de bajas emisiones. (Fuente: Elaboración propia a partir del estudio de la literatura científica analizada)

En este proyecto se ha podido comprobar que pese al desarrollo y despliegue exponencial de las energías renovables y los nuevos vectores energéticos en los últimos años, estas tecnologías aún deben mejorar más para situarse dentro de los objetivos. Más preocupante es el estado de la energía nuclear y las técnicas CCS – BECCS, dado que sus problemas con la aceptación pública provocan un desarrollo ralentizado o parado. Tan solo la reducción de la demanda se encuentra en las vías del objetivo 2DS debido en parte a los cobeneficios de la eficiencia energética. En el sector AFOLU las emisiones netas son constantes y no se ha apreciado una mitigación en este siglo.

En resumen, este pequeño avance del estado del arte de la mitigación del cambio climático antes de la publicación del sexto informe del IPCC (4) indica que el desarrollo actual de las acciones de mitigación no es suficiente dado que las emisiones siguen creciendo anualmente. Se requieren esfuerzos adicionales en la descarbonización del sistema energético, considerando la aportación de la energía nuclear y BECCS, además de dar inicio al despliegue de las técnicas de mitigación en el sector de usos de suelo. En caso de no producirse un cambio sustancial en las acciones de mitigación, es muy probable que se cumpla el escenario de referencia del IPCC de 8,5 W/m² y un aumento de la temperatura media del planeta de más de 4,6°C, o incluso peor si tenemos en cuenta que estas proyecciones no tuvieron en cuenta el efecto del ímpetu demográfico.

6. Bibliografía

1. Sola, Y. Asignatura Cambio Climático (MERSE). En: 2017, Barcelona.
2. IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* [en línea]. 2014. ISBN 9781107654815. DOI 10.1017/CBO9781107415416. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
3. IPCC. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. En: [en línea]. [consulta: 28 mayo 2017]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/>.
4. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. En: [en línea]. [consulta: 13 junio 2018]. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/index.htm>.
5. Carbon Dioxide | Vital Signs – Climate Change: Vital Signs of the Planet. En: [en línea]. [consulta: 13 junio 2018]. Disponible en: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>.
6. Home | Scripps CO2 Program. En: [en línea]. [consulta: 13 junio 2018]. Disponible en: <http://scrippsco2.ucsd.edu/>.
7. IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Sciences Basis*. En: *The Physical Sciences Basis: University Press, Cambridge New York*. 2013. ISBN 9781107661820.
8. Climate Analytics - Preventing dangerous climate change. En: [en línea]. [consulta: 13 junio 2018]. Disponible en: <http://climateanalytics.org/>.
9. Naciones Unidas. *Aprobación Acuerdo de París en la Convención Marco sobre el Cambio Climático*. 2011. 2011.
10. Calvin, K. et al. The distribution and magnitude of emissions mitigation costs in climate stabilization under less than perfect international cooperation: SGM results. En: *Energy Economics* [en línea]. Elsevier B.V., 2009, vol. 31, no. SUPPL. 2, p. S187-S197. ISSN 01409883. DOI 10.1016/j.eneco.2009.06.014. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2009.06.014>.
11. Clarke, L. et al. International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios. En: *Energy Economics* [en línea]. Elsevier B.V., 2009, vol. 31, no. SUPPL. 2, p. S64-S81. ISSN 01409883. DOI 10.1016/j.eneco.2009.10.013. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2009.10.013>.
12. Climate Watch: Data for Climate Action. En: [en línea]. [consulta: 13 junio 2018]. Disponible en: <https://www.climatewatchdata.org/>.
13. Janssens-Maenhout, G. et al. EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major Greenhouse Gas Emissions for the period 1970–2012. En: *Earth System Science Data Discussions* [en línea]. 2017, p. 1-55. ISSN 1866-3591. DOI 10.5194/essd-2017-79. [consulta: 14 junio 2018]. Disponible en: <https://www.earth-syst-sci-data-discuss.net/essd-2017-79/>.
14. Janssens-Maenhout, G. et al. *Fossil CO2 & GHG emissions of all world countries* [en línea]. 2017. ISBN 9789279732072. DOI 10.2760/709792. Disponible en: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>.

15. Food and Agriculture Organization. FAOSTAT. En: [en línea]. [consulta: 13 junio 2018]. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.
16. Y. Kaya. Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios. 1990
17. WorldBank. CO2 emissions (kg per 2010 US\$ of GDP) | Data. En: [en línea]. [consulta: 14 junio 2018]. Disponible en: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KD.GD>.
18. United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. World Population Prospects The 2017 Revision Key Findings and Advance Tables. En: *World Population Prospects The 2017* [en línea]. 2017. ISBN 9788578110796. DOI 10.1017/CBO9781107415324.004. Disponible en: https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf.
19. Ehrlich, P.R. y Holdren, J.P. The Impact of Population Growth. En: *Science* [en línea]. 1971, vol. 171, no. 3977, p. 1212-1217. Disponible en: https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/PopFacts_2017-4_Population-Momentum.pdf.
20. WorldBank. GDP per capita (constant 2010 US\$) | Data. En: [en línea]. [consulta: 14 junio 2018]. Disponible en: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD?end=2016&start=1960&view=chart>.
21. International Institute for Applied Systems Analysis. AR5 Scenario Database. En: [en línea]. [consulta: 14 junio 2018]. Disponible en: <https://tntcat.iiasa.ac.at/AR5DB/dsd?Action=htmlpage&page=regions>.
22. Fishedick, M., Schaeffer, R. y Adedoyin, A. Chapter 10: Mitigation potential and costs. En: *IPCC* [en línea]. 2011, p. 791-864. Disponible en: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Mitigation+Potential+and+Costs#5>.
23. Bauer, N. et al. Global fossil energy markets and climate change mitigation – an analysis with REMIND. En: *Climatic Change* [en línea]. Climatic Change, 2016, vol. 136, no. 1, p. 69-82. ISSN 15731480. DOI 10.1007/s10584-013-0901-6. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0901-6>.
24. Riahi, K. et al. Chapter 17: Energy pathways for sustainable development. En: *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*. 2012, p. 1203-1306.
25. Fisher, B.S. et al. Issues related to mitigation in the long-term context. En: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change*. 2007, p. 196-250.
26. International Energy Agency. Tracking Clean Energy Progress 2017. En: *Technology* [en línea]. 2017. ISBN 978-92-64-17488-7. DOI 10.1787/energy_tech-2014-en. Disponible en: http://www.iea.org/media/etp/Tracking_Clean_Energy_Progress.pdf.

27. International Energy Agency (IEA). Global Energy and CO2 Status Report 2017. En: [en línea]. 2017. Disponible en: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf>.
28. (IEA), I.E.A. Energy Efficiency 2017. En: [en línea]. 2017. ISBN 9789264284234. DOI 10.1787/9789264284234-en. Disponible en: http://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-efficiency-2017_9789264284234-en.
29. Agency for Natural Resources and Energy. Key World Energy statistics. En: *IEA International Energy Agency* [en línea]. 2017. ISBN 9788578110796. DOI 10.1017/CBO9781107415324.004. Disponible en: http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html.
30. International Energy Agency (IEA). Electricity Information Overview 2017. En: *IEA Statistics* [en línea]. 2017. ISBN 9789264101913. DOI <http://dx.doi.org.ezproxy.lib.ryerson.ca/10.1787/electricity-2011-en>. Disponible en: <papers3://publication/uuid/692B9537-B91E-4D81-BB27-D6EF0DA4216A>.
31. Greene, D. y Plotkin, S. Reducing greenhouse gas emission from US transportation. En: *Arlington: Pew Center on Global Climate ...* [en línea]. 2011, Disponible en: <http://www.ncga.state.nc.us/documentsites/committees/LCGCC/Meeting Documents/2005-2006 Interim/25 April 2006/Presentations/LCGCC- Greene.pdf>.
32. Allwood, J.M., Cullen, J.M. y Milford, R.L. Options for achieving a 50% cut in industrial carbon emissions by 2050. En: *Environmental Science and Technology*. 2010, vol. 44, no. 6, p. 1888-1894. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es902909k.
33. Dietz, T. et al. Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions. En: *Proceedings of the National Academy of Sciences* [en línea]. 2009, vol. 106, no. 44, p. 18452-18456. ISSN 0027-8424. DOI 10.1073/pnas.0908738106. Disponible en: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0908738106>.
34. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy 2017. En: *British Petroleum* [en línea]. 2017, no. 66, p. 1-52. ISSN 1098-6596. DOI <http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf%0Ahttp://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statisti>.
35. International Energy Agency. Global EV Outlook 2015. En: *Global EV Outlook*. 2015. ISBN 9789264278882. DOI EIA-0383(2016).
36. Edenhofer, O., Pichs Madruga, R. y Sokona, Y. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). En: *Clim. Policy*. 2012. ISBN 9781107607101. DOI 10.5860/CHOICE.49-6309.
37. International Energy Agency. Technology Roadmap Nuclear Energy. En: *SpringerReference* [en línea]. 2015. DOI 10.1007/SpringerReference_7300. Disponible en: http://www.springerreference.com/index/doi/10.1007/SpringerReference_7300.

38. Herzog, H.J. Scaling up carbon dioxide capture and storage: From megatons to gigatons. En: *Energy Economics* [en línea]. Elsevier B.V., 2011, vol. 33, no. 4, p. 597-604. ISSN 01409883. DOI 10.1016/j.eneco.2010.11.004. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2010.11.004>.
39. Dooley, J.J. Estimating the supply and demand for deep geologic CO₂ storage capacity over the course of the 21st century: A meta-analysis of the literature. En: *Energy Procedia* [en línea]. Elsevier B.V., 2013, vol. 37, p. 5141-5150. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2013.06.429. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.429>.
40. International Energy Agency. Five keys to unlock CCS investment. En: [en línea]. 2017, p. 20. Disponible en: <http://www.iea.org/media/topics/ccs/5KeysUnlockCCS.PDF>.
41. Wennersten, R., Sun, Q. y Li, H. The future potential for Carbon Capture and Storage in climate change mitigation - An overview from perspectives of technology, economy and risk. En: *Journal of Cleaner Production* [en línea]. 2015, DOI 10.1016/j.jclepro.2014.09.023. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.023>.
42. Axelsson, L. et al. Perspective: Jatropha cultivation in southern India: Assessing farmers' experiences. En: *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2012, vol. 6, no. 3, p. 246-256. ISSN 1932104X. DOI 10.1002/bbb.
43. Van Vuuren, D.P. et al. The role of negative CO₂ emissions for reaching 2 °C—insights from integrated assessment modelling. En: *Climatic Change* [en línea]. 2013, vol. 118, no. 1, p. 15-27. ISSN 0165-0009. DOI 10.1007/s10584-012-0680-5. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-012-0680-5>.
44. McDonald, S. Eliminating CO₂ Emissions from the Production of Bio Fuels -A «Green» Carbon Process. En: [en línea]. 2017, Disponible en: https://energy.gov/sites/prod/files/2017/10/f38/mcdonald_bioeconomy_2017.pdf.

Abstract

In this study of the mitigation of climate change, the evolution of the most important actions of emission reductions since the publication of the fourth report of IPCC is studied.

Global greenhouse emissions have not reached yet their peak due to the increase in the carbon dioxide emissions in energy system. Descomposing the emissions of the energy through Kaya Identity identifies the growth of wealth and population as the main responsible for the increase of greenhouse emissions. It is known that wealth and population will not stop growing, therefore the solution to reduce the emissions is to accelerate the other two parameters of Kaya Identity: energy intensity of GDP and carbon intensity of energy.

In recent years the energy demand has been reduced and energy efficiency has been improved, leading to an acceleration in the reduction of energy intensity of GDP. Conversely, there has not been a decarbonisation of the energy system and the carbon intensity of energy has remained constant.

Within this decarbonisation of the energy system the deployment of renewables energies and new energy vector has grown but is still not on track for 2°C climate objective. More worrying is the current state of nuclear power or CCS technologies with a slowed or almost stopped growth.

Neither can we highlight a reduction in second largest contributor to GHG emissions, AFOLU sector. The reforestation in some regions is not enough and the balance of emissions has remained constant.

In conclusion, since fourth report published by IPCC there has not been a sufficient acceleration in the reduction of energy intensity of GDP or in the reduction of carbon intensity of energy. With worrying zero reduction in the second parameter.

Because the key actions for mitigation have not been sufficiently developed enough, we are still finding ourselves in the reference scenario of the Mitigation Climate Change report that leads us to a situation with a non-stabilized radiative forcing of 8.5 W/m². Or even worse because population growth was underestimated by not taking into account the effect of demographic momentum.