

LA INFLUENCIA DEL SER HUMANO EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

TRABAJO FIN DE GRADO



GRADO EN FÍSICA



Universidad de Oviedo

AUTOR: PABLO FLÓREZ FERNÁNDEZ
TUTORES: JOAQUIN GONZÁLEZ-NUEVO GONZÁLEZ Y
LAURA BONAVERA
CURSO 2022-2023

ÍNDICE

1. Introducción.	2
2. Atmósfera terrestre.	3
2.1. Formación y composición.	3
2.2. Estructura (densidad, presión y temperatura).	5
2.3. Capas atmosféricas.	10
2.4. Radiación y absorción atmosférica.	12
2.5. El efecto invernadero.	16
2.6. Gases de efecto invernadero más destacados de la atmósfera.	18
2.7. Termodinámica de la atmósfera.	19
2.8. Procesos adiabáticos de la atmósfera.	21
2.9. Formación de las nubes atmosféricas.	22
2.10. El efecto albedo y las nubes atmosféricas.	26
3. Sistema climático.	28
3.1. Qué es el sistema climático.	28
3.2. Circulación y modelos atmosféricos.	30
3.3. Cambios en el sistema climático.	33
4. El cambio climático y la influencia del ser humano.	37
4.1. Cambio climático 2021: Bases físicas.	39
4.2. Impactos humanos más notables en el sistema climático.	43
4.3. El cambio climático y la tierra.	46
4.4. El océano y la criósfera en un clima cambiante.	48
4.5. El calentamiento global de 1,5°C.	51
5. Simulación en programa EN-ROADS relacionada con la influencia del ser humano en el sistema climático.	56
5.1. Caso 1: Mantenemos las medidas frente al cambio climático intactas.	58
5.2. Caso 2: Aumento de la temperatura entre 1,5°C y 2°C para 2100.	65
5.3. Caso 3: Medidas extremas para evitar el cambio climático.	77
5.4. Caso 4: Medidas extremas para aumentar el cambio climático.	85
6. Conclusión.	95
7. Referencias.	96

1. Introducción.

El cambio climático es uno de los desafíos más importantes a los que se enfrenta el mundo actualmente. Los científicos han documentado un aumento en la temperatura global, un aumento en el nivel del mar, una mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, y una serie de otras alteraciones ambientales que tienen consecuencias significativas para la vida humana y la biodiversidad en general. La evidencia científica ha demostrado que la actividad humana ha aumentado significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente las emisiones de dióxido de carbono, de metano y de óxido nitroso, en la atmósfera. Estos gases tienen la propiedad de retener la radiación que proviene del Sol (en forma de calor), lo que provoca un aumento de la temperatura global. El calentamiento global, a su vez, está causando cambios en el clima, desencadenando en fenómenos como el aumento del nivel del mar, la intensificación de los eventos climáticos extremos y la alteración de los patrones climáticos.

Entre las principales actividades humanas que contribuyen al cambio climático se encuentran la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad y el transporte, la deforestación, la agricultura y la ganadería intensivas. Estas actividades liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo que hace que aumente el calentamiento global.

Dicho calentamiento global, junto con el aumento del nivel del mar y los eventos climáticos extremos, pueden acarrear daños importantes a la infraestructura, la agricultura, la salud humana y los ecosistemas.

Por todo ello, es crucial tomar medidas para poder mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Algunas de estas medidas incluyen la transición hacia fuentes de energía renovable, la reducción de la deforestación, la agricultura sostenible y la conservación de los ecosistemas. También resulta sustancial promover políticas y programas que fomenten un cambio hacia estilos de vida más sostenibles.

En este trabajo conoceremos a fondo la composición de la atmósfera, conociendo a fondo a los gases de efecto invernadero y cómo actúan. También analizaremos el sistema climático y, gracias a los informes del *IPCC* (Panel Intergubernamental contra el Cambio Climático), conoceremos todos los cambios climáticos producidos relacionados con la actividad antropogénica. Finalmente, mediante el uso del simulador “EN-ROADS”, generaremos una serie de escenarios ficticios para poder analizar cómo altera la actividad humana el sistema climático, y ver qué medidas podemos tomar para evitar que esto suceda.

2. Atmósfera terrestre.

2.1. Formación y composición.

Como ya sabemos, la atmósfera es esa capa de gas que envuelve la tierra y que, gracias a la atracción gravitatoria que la tierra ejerce sobre ella, se mantiene unida a nuestro planeta. Para hablar de su origen nos podemos centrar en la geocronología terrestre, en la cual encontramos los 4 eones (escala de tiempo empleada para diferenciar diferentes estadios terrestres, en los cuales va variando la composición terrestre, el clima y la vida) que dieron lugar a la tierra y la atmósfera que tenemos actualmente. Los 4 eones de este proceso son el eón Hadeico, el eón Arcaico, el eón Proterozoico y el eón Fanerozoico (basado en [1], [2] y [3]).

- Eón Hadeico: Dicho periodo está comprendido entre la formación de la tierra hace 4570 millones de años, hasta hace 4000 millones de años, con una duración de 567 millones de años y comprendiendo el 32,6% de todo el tiempo geológico. Es el periodo correspondiente a la formación de la Tierra. De los acontecimientos más destacados de este periodo encontramos: la catástrofe del hierro (debido a las altas temperaturas del planeta los metales se derritieron, por lo que hubo una separación de estratos por la diferencia de densidades de los metales), la aparición del campo magnético terrestre y la formación de la luna.

A su vez apareció la primera atmósfera, la cual estaba formada por hidrógeno, dióxido de carbono y por vapor de agua. Con la formación de la atmósfera tuvimos la primera corteza terrestre fría, y la formación de océanos de agua líquida. Por los movimientos tectónicos acaecidos durante el periodo, y gracias a la ayuda de los océanos, gran parte del CO_2 pudo ser absorbido, contribuyendo a disminuir el efecto invernadero y enfriar el planeta. Finalmente, el eón Hadeico termina con una gran activación volcánica (provocada posiblemente por un gran bombardeo de cuerpos celestes que aportaron metales pesados, CO_2 , H_2O y aminoácidos) y la destrucción parcial de la corteza terrestre.

- Eón Arcaico: Este periodo está comprendido desde hace 3500 millones de años hasta hace 2500 millones de años. Está caracterizado por la aparición de la vida en la tierra, siendo las células procariotas anaeróbicas las primeras formas de vida, siendo capaces de realizar la fotosíntesis anoxigénica primitiva [4] (caracterizada por emplear la energía lumínica del Sol para convertirla en energía química necesaria para sus funciones vitales, todo esto sin precisar de oxígeno). Seguidas de estas, aparecieron las primeras bacterias capaces de realizar la fotosíntesis oxigénica, que fueron las cianobacterias, liberando oxígeno en sus actividades metabólicas. Como consecuencia a la aparición de estas bacterias, se fueron formando bandas en el fondo marino debido a la oxidación de los metales presentes en el agua.

Tal era la cantidad de oxígeno liberado que comenzó a liberarse de las aguas a la atmósfera, pero este era nocivo para la gran mayoría de formas de vida terrestre.

Finalizamos el periodo con la aparición de la primera capa de ozono, la cual era capaz de proteger frente a la entrada de rayos UV, lo cual ayudó a la preservación de la vida en la tierra.

- **Eón Proterozoico:** Este eón está comprendido desde hace 2500 millones de años hasta hace 543 millones de años. Destacamos de este periodo la primera glaciación global. Debido a la gran oxigenación que sufrió la atmosfera, el metano (CH_4) comenzó a unirse con el oxígeno presente dando lugar a CO_2 , el cual no es tan efectivo como gas de efecto invernadero como el metano, lo que produjo el enfriamiento global. Durante este eón tenemos la aparición de las primeras células eucariotas y los primeros organismos pluricelulares, una vez sucedió la acumulación de oxígeno libre. Sucedieron 4 glaciaciones más durante este eón, ya que la oxigenación de la atmosfera era cada vez mayor, sumándose a ello la aparición de precipitaciones que captaban el CO_2 reduciendo aún más el efecto invernadero y concluyendo en glaciaciones.

Se acabó produciendo una estabilización del ozono presente en la atmosfera, produciéndose una reducción de la radiación UV que llegaba, logrando un auge en la vida fuera del agua.

- **Eón Fanerozoico:** Este eón comprendido desde hace 543 millones de años hasta el día de hoy esta principalmente caracterizado por la explosión de vida en la tierra. Pese a que anteriormente ya teníamos vida en la tierra, durante este eón los organismos consiguen desarrollar formas complejas y se diversifican. A su vez, el inicio de este eón coincide con el advenimiento de animales con exoesqueletos.

Es en este eón en el que tenemos la formación de Pangea y su posterior desintegración en los actuales continentes. Durante este eón suceden las eras Paleozoica, Mesozoica y Cenozoica. Durante estas eras tenemos la evolución de los anfibios, de los reptiles y de los peces en la era Paleozoica; posteriormente tendríamos la evolución de los lagartos, tortugas, serpientes, dinosaurios y de los mamíferos que corresponde a la era Mesozoica; y por último en la era cenozoica tenemos la extinción de los dinosaurios, una gran evolución de los mamíferos y aves, y la aparición del ser humano junto con toda su evolución hasta hoy.

Pues bien, durante el transcurso de este último eón, la atmosfera ha ido variando hasta la que conocemos actualmente. Tenemos finalmente una capa de ozono gruesa, con una anchura comprendida entre los 15 hasta los 35 kilómetros de altura respecto al mar.

A parte de que la atmosfera terrestre sustenta a todos los seres vivos del planeta de los gases que la componen, indispensables para la supervivencia de estos, también nos protege de la **radiación cósmica** [8] procedente del espacio exterior, así como de meteoros y cuerpos celestes; a su vez juega un importante papel en el ciclo hidrológico y es capaz de distribuir la radiación solar recibida por todo el planeta.

Hablemos ahora de la composición de nuestra atmósfera. Distinguimos dos zonas diferenciadas a la hora de estudiar la composición atmosférica, encontrado la homosfera y la heterosfera. La **homosfera** corresponde a los primeros 80-100 kilómetros de aire, donde su composición se mantiene homogénea,

es decir, que los gases presentes en esta región presentan las mismas proporciones a lo largo de ella, siendo la composición la siguiente:

Gas	Concentración (%)
Nitrógeno (N ₂)	78.083
Oxígeno (O ₂)	20.945
Argón (Ar)	0.934
Dióxido de carbono (CO ₂)	0.035
Otros gases	0.003
Vapor de agua	1~4

Figura 1: Concentración de gases en la homósfera.

La concentración de otros gases viene dada por la presencia de Neón (*Ne*), de Helio (*He*), de Criptón (*Kr*), de Hidrógeno (*H₂*), de Xenón (*Xe*), de metano (*CH₄*), de Ozono (*O₃*) entre otros muchos. Como podemos ver el valor del vapor de agua es una aproximación, ya que dicho valor dependerá mucho de la zona terrestre en la que nos encontremos.

Por otra parte, en la **heterósfera** hay zonas con cierto gas predominante que forman una capa dependiendo de la altura a la que nos halleemos. Las distintas zonas en función del gas predominante que encontramos son las siguientes:

Altitud (Km)	Capa de gas predominante
100 - 200	Nitrógeno molecular (N ₂)
200 - 1000	Oxígeno atómico (O)
1000 - 35000	Helio (He)
Desde 35000	Hidrógeno atómico (H)

Figura 2: Distribución capas de la heterósfera.

Como se puede observar, a medida que nos vamos alejando, los elementos predominantes de cada capa son cada vez más ligeros.

2.2. Estructura (densidad, presión y temperatura).

Una vez conocida la formación de nuestra atmósfera, así como la composición de esta vamos a centrarnos en su estructura. A medida que recorremos la atmósfera terrestre verticalmente desde el nivel del mar, podemos ver que nos encontramos ante una serie de capas distribuidas horizontalmente, las cuales están bien diferenciadas por los valores específicos que toman en cuanto a la densidad, la presión y a la temperatura, así como también por la composición química de sus gases como ya vimos anteriormente. (Nos basaremos en este capítulo en [5], [7] y [9]).

Inicialmente estudiaremos los conceptos de **densidad**, **presión** y **temperatura** y veremos como fluctúan dichos valores a lo largo de la atmósfera.

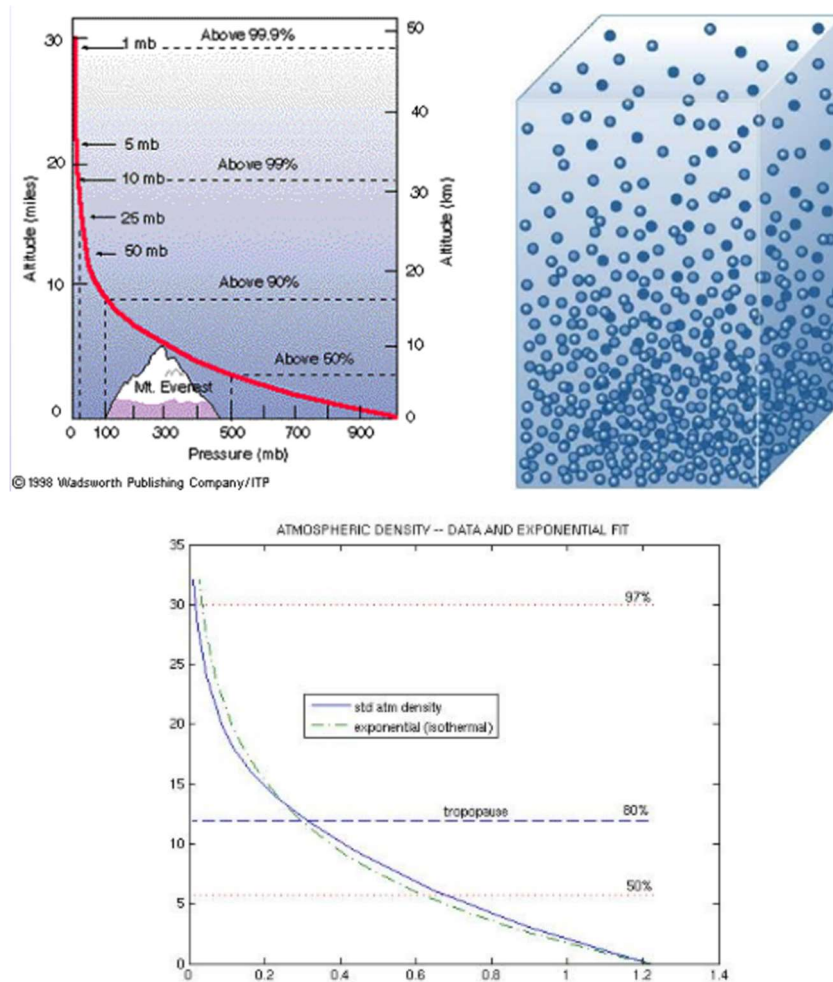
- **Densidad:** Es la cantidad de masa que ocupa un determinado volumen. En otras palabras, la densidad se encarga de medir cuan próximas se encuentran las moléculas en un espacio determinado. Por tanto, la densidad es directamente proporcional a la cercanía que haya entre las moléculas de dicho volumen. La densidad en la atmósfera está directamente relacionada con la altitud y con la temperatura. El valor de la densidad media del aire seco es: $\rho_0 = 1,293 \text{ Kg/m}^3$
- **Presión:** Es la fuerza o peso que ejercen las moléculas del aire sobre la superficie terrestre. La presión atmosférica viene definida por la siguiente expresión:

$$P = h \cdot \rho \cdot g \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde P corresponde a la presión, h corresponde al espesor de la atmósfera que se encuentra por encima de nuestro punto de medida, ρ es la densidad de la atmósfera por encima de nuestra medida y g corresponde al valor de la aceleración estándar debida a la gravedad.

El valor de la presión suele medirse con la ayuda de un barómetro, y su valor a nivel del mar es de 1 atmósfera, lo que es equivalente a 1013 milibares (sería lo mismo que el peso de una columna de 760 mm de altura de mercurio y con 1 cm² de base). Como podemos observar, la presión también depende directamente de la altura a la que nos encontremos.

Es justamente la dependencia de la presión y de la densidad con la altura a la que nos encontremos con respecto del mar lo que conocemos como perfil vertical atmosférico. Para clarificar un poco más dicho termino pasamos ahora a analizar las siguientes imágenes:



Figuras 3: Representación de: la variación de la presión con la altitud; una columna de aire con sus moléculas; la variación de la densidad con la altura (de izquierda a derecha y de arriba abajo respectivamente). [10]

Analizando estas figuras se puede constatar que, a medida que nos alejamos del nivel del mar habrá una menor masa de aire por encima de nosotros, ya que por la acción gravitatoria la gran mayoría de las moléculas del aire se encontrarán más cerca de la superficie. Al haber una columna de aire por encima de nosotros cada vez menos pesada a medida que ascendemos, la presión irá descendiendo al igual que lo hará la densidad por haber cada vez menos moléculas como ya vimos anteriormente.

- **Temperatura:** Es el elemento meteorológico que constituye el clima que nos aporta información acerca del calor específico que posee el aire, para un momento y espacio determinados. Al hablar de la temperatura atmosférica cabe destacar el **gradiente térmico vertical**, que es el término que emplearemos para referirnos al descenso de la temperatura con la altitud. Bien sabemos que la fuente de calor de nuestra atmósfera es la propia irradiación del suelo a la atmósfera, pero hay varios procesos que alteran el gradiente, como por ejemplo los movimientos turbulentos de aire, un calentamiento o enfriamiento excesivo del suelo o vientos

muy intensos. A su vez cabe recordar que la presencia de un gradiente térmico implica la transferencia calorífica del cuerpo más caliente al más frío.

Hablemos del modelo estándar de la atmósfera, definiendo su perfil vertical de presión y temperatura. Como ya sabemos, la atmósfera está formada por una gran cantidad de gases, distribuidos por capas. Debido a esto, tenemos cambios del volumen cuando se le aplica una presión a la atmósfera. El aire presente en la atmósfera es muy compresible, y por ello casi el 97% de la masa de la atmósfera se encuentra en los primeros 29 Km de altura por encima del nivel del mar. Esto causa que las capas inferiores sean mucho más densas que las superiores, por lo que el descenso de la presión con la altura depende también del descenso de la densidad con la altura como ya hemos visto. Tenemos una ecuación que demuestra dicha relación:

$$\delta P / \delta h = -\rho \cdot g \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde la P corresponde al valor de presión, la h es la altura a la que nos encontramos, la ρ corresponde a la densidad del fluido en el que estemos (en nuestro caso, el aire seco, cuya densidad es 1,293 Kg/m³) y la g corresponde a la fuerza de la gravedad.

Debemos tener en cuenta que, como cualquier variable climatológica, tenemos una gran variabilidad en función del espacio y el tiempo. Esto se debe a las irregularidades en la energía de la tierra y la densidad del aire atmosférico. Sabemos que la presión atmosférica depende básicamente de la densidad de la columna de aire que se encuentra por encima. Como la densidad desciende vertiginosamente al ascender verticalmente en las capas bajas que encontramos en la troposfera, la presión a su vez desciende con dicha rapidez.

Tenemos representado a continuación el perfil vertical de la presión en la atmósfera, junto con la variación de la masa:

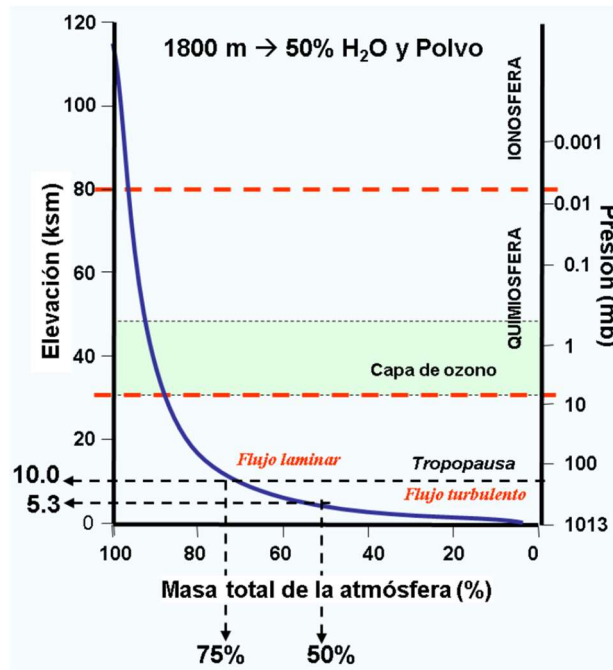


Figura 4: Representación de la distribución de la presión y la masa atmosférica en función de la altura. [7]

Pasemos ahora a hablar del perfil vertical de la temperatura. Puesto que la variación de temperatura hace que la densidad varíe a su vez, también se está modificando con ello el valor de la presión. Al aumentar el valor de la temperatura, la densidad y la presión disminuyen, y viceversa.

Debido a esto, aparecen las altas presiones de origen térmico en invierno a causa del aumento de la densidad, y por tanto de la compresión. Por otra parte, en las capas bajas atmosféricas tenemos una aglomeración de aire que genera una zona de baja presión en altura. Sucede lo opuesto cuando, en verano, aparecen las bajas presiones de origen térmico, generando una merma de la densidad, haciéndolo más ligero. El acopio de aire en las capas altas atmosféricas genera una zona de alta presión en altura.

Para entender esto un poco mejor imaginemos un caso en el que tenemos dos columnas de aire con idéntica presión en superficie, pero con diferente temperatura. La columna de aire caliente generará una mayor presión en altura. Esto desencadena un traspaso de aire en altura de la columna de mayor temperatura a la otra, causando un aumento de la presión superficial bajo la columna fría y un descenso bajo la caliente. Se produce entonces una transferencia del aire superficial de la columna fría a la caliente. Tenemos finalmente un bucle de viento que mantiene hasta llegar al equilibrio. En la realidad, al tener una superficie rugosa, la velocidad del viento es menor, por lo que el proceso de homogeneización puede llegar a no suceder.

Si tuviéramos unas condiciones ideales, en las que la atmósfera es un fluido en reposo, llegaríamos a un equilibrio perfecto con una presión de 101325 Pa en todo el planeta. Sin embargo, debido al constante aporte de la energía solar y al movimiento de rotación de la Tierra, no se puede alcanzar dicho equilibrio.

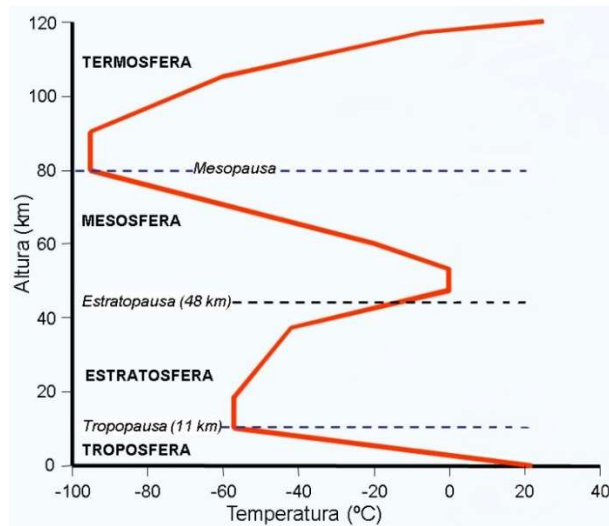


Figura 5: Representación de la distribución de la temperatura atmosférica en función de la altura. [7]

Como podemos apreciar, y como ya vimos al analizar las distintas capas que conforman la atmósfera terrestre, tenemos una variación de la temperatura a medida que ascendemos que se debe principalmente a la naturaleza de los gases que componen cada una de estas capas.

2.3. Capas atmosféricas.

Una vez conocido el perfil vertical de la atmósfera y algunos términos generales pasamos a analizar las diferentes capas horizontales que nos encontramos en la atmósfera. La atmósfera consta de 5 capas. La temperatura debería ir descendiendo a medida que ascendemos a lo largo de la atmósfera, pero no es siempre así ya que se producen fluctuaciones entre capas, debido al gradiente térmico (basamos este apartado en [5]). Vamos a conocer entonces las diferentes capas y las características propias de cada una:

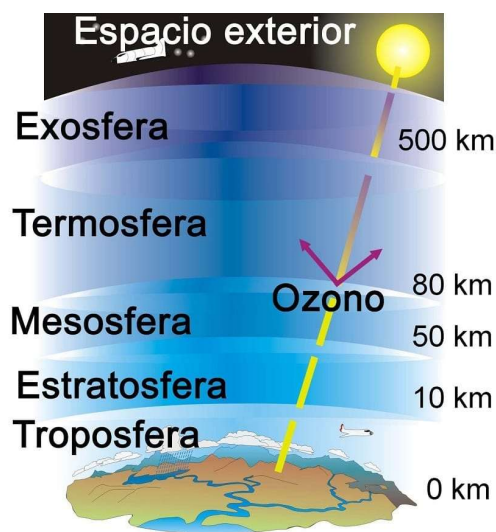


Figura 6: Representación de las capas atmosféricas. [31]

- **Troposfera:** Es la primera capa que nos encontramos empezando desde el nivel del mar. Posee un espesor que varía entre los 18 Kilómetros sobre el ecuador y los 9 Kilómetros en los polos, por lo que tenemos una altura media de 12 Kilómetros. Contiene un 75% de la masa de toda la atmósfera y casi la absoluta totalidad de vapor de agua, de aerosoles y de CO_2 , lo que origina que sea en la troposfera donde se produzcan la mayor parte de los fenómenos meteorológicos. A los primeros 500 metros de troposfera los conocemos como la capa sucia, por estar concentrada en ella el polvo en suspensión. Dicho polvo juega un papel importante por ejercer de núcleos de condensación, los cuales permiten que el vapor de agua atmosférico se convierta en agua líquida. El aire en esta capa se calienta mediante la irradiación del suelo, siendo máximo dicho calentamiento a nivel del mar (unos $15^{\circ}C$ de temperatura media), y comienza a descender $6,5^{\circ}C$ por cada Kilómetro que ascendamos hasta llegar al límite de la troposfera (donde alcanza los $-70^{\circ}C$), que recibe el nombre de tropopausa.

- **Estratosfera:** Es la capa contigua a la troposfera, que comienza en el final de la tropopausa y se extiende hasta los 50 Kilómetros de altura. Encontramos en esta región la capa de ozono, también conocida por ozonosfera, ya que desde los 15 hasta los 30 Kilómetros de altura se halla la mayor concentración de ozono de toda la atmósfera. Desde la tropopausa tenemos un ascenso de la temperatura hasta llegar a los $0^{\circ}C$ en el límite superior de la estratosfera, conocido como estratopausa. Dicho calentamiento es debido a la absorción de radiación ultravioleta de la capa de ozono, y aumenta con la altura, ya que al disminuir la densidad hay cada vez menos materia que calentar. Por tanto, un papel importante de la capa de ozono relacionado con este aspecto es el de protegernos frente a los rayos ultravioleta que proceden del sol. Cabe destacar que en esta capa de la atmósfera hay movimientos de aire atmosférico, pero dichos movimientos se realizan únicamente de manera horizontal.

- **Mesosfera:** Si seguimos ascendiendo nos encontraremos con la mesosfera, la cual comienza en la estratopausa y se extiende hasta los 80 Kilómetros de altura. En esta capa se vuelve a producir un descenso de la temperatura, desde los $0^{\circ}C$ hasta alcanzar los $-140^{\circ}C$ en su límite superior, conocido como mesopausa.
Ciertos autores afirman que esta capa se encarga de desintegrar los meteoritos que entran en la atmósfera por el rozamiento producido con las moléculas de esta capa, generándose así las conocidas estrellas fugaces. Aun así, hay otros autores que otorgan dicho mérito a la siguiente capa, la termosfera, por ser en esta en la que se llegan a alcanzar temperaturas más altas.

- **Termosfera o ionosfera:** Al seguir ascendiendo desde la mesopausa nos encontramos con la termosfera, la cual se extiende hasta alcanzar los 600 – 800 Kilómetros de altura. En esta capa

vuelve a producirse un calentamiento, que asciende desde los -140°C hasta llegar a poder alcanzar los 1000°C , ya que se produce la absorción de radiaciones de alta energía. Pese a poder llegar a los 1000°C , al haber una densidad de gases tan nimia, dicha temperatura no implica mucha energía.

También se conoce a esta capa por el nombre de ionosfera, debido a que la gran mayoría de las moléculas que nos encontramos en esta zona están ionizadas. Dicha ionización la causa la absorción de las radiaciones de alta energía solares, es decir, los rayos X, los rayos gamma y una porción de la radiación ultravioleta. Esto provoca que las moléculas de oxígeno y nitrógeno presentes en esta capa pierdan electrones y queden ionizados con carga positiva, y los electrones perdidos generan campos eléctricos.

Curiosidad: Es en esta capa en la que se produce el fenómeno luminoso que todos conocemos llamado aurora polar. Sucede por la interacción de las partículas subatómicas que proceden del Sol con los átomos ionizados positivamente, y suelen suceder en los polos magnéticos, dando lugar en el polo norte a la aurora boreal, y en el polo sur a la aurora austral.

- **Exosfera:** Es la última capa que conforma nuestra atmósfera, y está comprendida desde el final de la termosfera hasta una altura de unos 10000 Kilómetros. La temperatura en esta zona es imposible de medir ya que nos encontramos con una densidad de gases ínfima (llegando a ser casi similar a la densidad de gases propia del espacio exterior). A su vez, al no haber casi moléculas que absorban la luz nos encontramos ante un cielo muy oscuro.

2.4. Radiación y absorción atmosférica.

Vamos a hablar ahora de los procesos de radiación y absorción atmosférica (basándonos en [12] y [29]), los cuales son la base para conocer cómo interactúa y se transforma la energía, procedente del espacio o de la propia Tierra, a través de nuestra atmósfera.

Cabe hablar entonces del forzamiento radiativo ΔF (Wm^{-2}), el cual definió V. Ramaswamy (2001) como “*el cambio en la irradiancia neta en la Tropopausa después de permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten al equilibrio radiativo, pero permaneciendo fijas, en sus valores no perturbados, las temperaturas de superficie y troposférica*”. Podemos relacionar realmente el forzamiento radiativo con el cambio de temperatura media global de equilibrio, donde se sigue la ley lineal:

$$\Delta T_0 = \lambda^{-1} \cdot \Delta F \quad (\text{Ecuación 3})$$

En la anterior ecuación encontramos λ^{-1} , que corresponde al parámetro de sensibilidad climática y suele tomar el valor de $0,6 \text{ K}/(\text{Wm}^{-2})$.

Entonces, el forzamiento radiativo viene a ser la posible variación dentro del flujo de energía radiante en la tropopausa, a consecuencia de un agente externo del cambio climático, después de tolerar que las

temperaturas estratosféricas se reajusten al equilibrio dinámico radiativo. Es decir, es el cambio en la diferencia entre la cantidad de calor que entra en la atmósfera y la que sale de ella. Un forzamiento positivo suele calentar el planeta, mientras que un forzamiento negativo lo enfría.

Puede haber dos tipos de forzamientos radiativos, el forzamiento radiativo positivo (que indicaría un calentamiento de la atmósfera por haber un mayor flujo de energía entrante, que viene a ser lo mismo que decir que hay una mayor energía absorbida que irradiada por la Tierra), y el forzamiento radiativo negativo (por consiguiente, es un enfriamiento del sistema, por un mayor flujo de energía saliente). Los protagonistas del forzamiento radiativo son los cambios que se pueden llegar a producir en la insolación (cantidad de energía de radiación que llega a un punto concreto de la superficie terrestre en un momento determinado) y la densidad de gases radiativamente activos (los gases de efecto invernadero).

A la hora de hablar de la **radiación** se debe tener en cuenta que hay una gran cantidad de energía solar que discurre desde y hacia la atmósfera y la Tierra, siendo equiparable a unas 160 veces la energía de las reservas de energía fósil mundiales. De la energía de radiación total incidente, un 47% de dicha energía se encarga de calentar la superficie terrestre, los océanos y la atmósfera; un 23% de la energía es absorbida en la evaporación del agua; y, por último, el 30% restante de la energía es reflejado hacia el espacio exterior. Realmente de toda la energía recibida hay una parte muy pequeña empleada en procesos como la formación de viento, de olas o en su absorción en la fotosíntesis de las plantas, ya que la gran parte de la energía se radia al espacio exterior como radiación infrarroja.

Cabe destacar que la energía que llega a la Tierra procedente del Sol va a depender directamente del punto geográfico en el que nos encontremos y de los factores astronómicos (estación del año). Si bien estos factores son importantes, los factores que más afectaran a la disponibilidad efectiva de energía son las condiciones meteorológicas, sobre todo las nubes. Podemos decir entonces que los aspectos que mayor inciden en la cantidad energética recibida son: la transparencia de la atmósfera (concretamente el coeficiente de extinción, que viene a ser la capacidad del medio material a absorber la luz que le es incidida), la época del año (duración del día), la nubosidad, el tiempo en el que el Sol tiene brillo solar efectivo (conocido por heliofanía) y la elevación del Sol con respecto al horizonte.

De la radiación que llega finalmente a la tierra se dividen 3 tipos, la radiación directa, la radiación difusa y la radiación global:

- **Radiación directa:** Comprende toda la radiación solar que consigue llegar a la superficie terrestre sin haber llegado a sufrir ningún tipo de difusión ni reflexión, ni tampoco haber alterado su dirección en su transcurso a lo largo de la atmósfera.
- **Radiación difusa:** Esta radiación recibe el nombre de difusa por ser la componente de la radiación solar que se difunde en todas las direcciones al interactuar con las partículas en

suspensión de la atmósfera a lo largo de su trayecto hacia la tierra. La mayor forma de interacción que se puede llegar a dar es con las nubes. También la podemos considerar como la radiación solar que llega a incidir sobre la superficie terrestre horizontalmente, procedente de cualquier punto de la atmósfera, sin considerar la radiación directa. La radiación difusa que incide sobre la superficie terrestre depende de:

- Cantidad de partículas en la atmósfera, ya que, cuantas más densidad de partículas hallemos, mayor será la componente difusa.
- Nubosidad, siendo las capas de nubes blancas delgadas las que más potencian dicha radiación.
- Altura del Sol, ya que cuanto más vertical se encuentre mayor será el flujo de radiación.
- Altitud, debido a que, al aumentar la altura sobre el nivel del mar, el espesor de las capas difusoras que tengamos por encima será cada vez menor, por ello, disminuirá la radiación.

Cabe destacar que la radiación difusa es bastante importante hoy en día, ya que ciertos estudios confirman que las plantas son mucho más efectivas bajo la acción de esta radiación y, por lo cual, son capaces de absorber mayores cantidades de dióxido de carbono.

- **Radiación global:** Viene a ser toda la radiación que llega a la tierra, medida sobre una superficie horizontal comprendida en 180 grados. Es el resultado de adicionar la componente vertical de la radiación directa y la radiación difusa.

Ahora que conocemos los procesos de radiación de la atmósfera, pasemos a hablar de la absorción. La **absorción atmosférica** consiste en la disminución de la intensidad luminosa de una fuente celeste, causada por los gases presentes en la atmósfera. Para que se produzca dicha disminución la frecuencia de la radiación electromagnética incidente debe ser semejante a la frecuencia vibracional molecular del gas. Cuando la energía es absorbida por un gas, dicha energía se convierte en movimiento molecular interno, lo que produce un aumento de la temperatura. Por tanto, cuando un gas es un buen absorbedor de radiación, es directamente una parte crucial en el calentamiento atmosférico y son los que conocemos por gases de efecto invernadero como ya vimos al hablar del forzamiento radiativo.

Al estar la atmósfera compuesta de diferentes tipos de gases, cada uno posee diferente frecuencia vibracional molecular, por lo que absorberán energía de manera selectiva para ciertos tipos de longitudes de onda.

Nuestra atmósfera posee una baja capacidad de absorción ya que es transparente en la parte visible del espectro, pero, posee una gran capacidad de absorción para la radiación infrarroja procedente de la propia Tierra y una gran capacidad de absorción para la radiación ultravioleta procedente del Sol. La radiación infrarroja es absorbida por la atmósfera gracias al vapor de agua, el dióxido de carbono y

ciertos gases traza (es decir, gases cuya presencia en una mezcla es menor al 1%). Por otra parte, la radiación ultravioleta es absorbida por la capa de ozono atmosférica.

La cantidad de absorción tiene una dependencia directa con la densidad de las capas atmosféricas, ya que, al haber más cantidad de gas por unidad de espacio, se intensifica. A su vez, la absorción de la luz solar será superior cuando el Sol se encuentra sobre el horizonte con respecto al observador, ya que cuando se encuentra en el cénit, la masa de aire que la luz debe atravesar es menor.

Para el **balance energético de la atmósfera**, la absorción de la radiación infrarroja juega un importante papel. Su absorción genera un calentamiento de la atmósfera, haciendo que los gases sean estimulados a emitir radiación de onda más larga. De esta radiación, una gran parte es dirigida directamente al espacio y otra parte se irradia de nuevo hacia la Tierra. Este proceso, al que conocemos por efecto invernadero natural, permite que la Tierra llegue a almacenar más energía cerca de la superficie que la cantidad de energía que almacenaría si no tuviera atmósfera. La diferencia directa entre ambos casos es de unos 33°C, ya que, en el caso de una Tierra sin atmósfera, la temperatura en superficie sería de -18°C.

A la hora de hablar de la radiación y de la absorción, no nos podemos olvidar de mencionar lo que es un cuerpo negro y un cuerpo gris. Para comenzar, un **cuerpo negro** [13] es un objeto teórico o ideal, capaz de absorber toda la luz y toda la energía radiante que le es incida. De toda la radiación incida no se llega a reflejar nada, ni tampoco llega a atravesar el cuerpo. El cuerpo negro emite luz y constituye un sistema físico idealizado para el estudio de la emisión de radiación electromagnética. Dicha luz emitida la conocemos como “*radiación de cuerpo negro*”. Todo cuerpo emite energía en forma de ondas electromagnéticas, siendo la intensidad de esta radiación (emitida incluso en el vacío) directamente proporcional a la temperatura a la que se encuentre el emisor. Se debe tener en cuenta que la energía radiante emitida por un cuerpo negro a temperatura ambiente es ínfima, y corresponde a longitudes de onda superiores a las de la luz visible.

Cuando la temperatura del cuerpo en cuestión aumenta, no lo hace únicamente la energía radiada, sino que lo hace para longitudes de onda más cortas. Este efecto es lo que genera que los cuerpos cambien de color cuando se les calienta. A su vez, los cuerpos no emiten con igual intensidad para todas las frecuencias, sino que siguen la *Ley de Planck*:

$$I(\nu, T) = \frac{2 \cdot h \cdot \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}} - 1} \quad (\text{Ecuación 4})$$

En la anterior ecuación encontramos la intensidad de la energía ($I(\nu, T)$) por unidad de área, tiempo y ángulo sólido; la constante de Planck (h); la velocidad de la luz (c) y finalmente la constante de Boltzmann (k). Como podemos apreciar, se cumple la relación de proporcionalidad directa entre intensidad y temperatura.

Cuando tenemos equidad térmica, la energía que se emite depende de la naturaleza de su superficie. Las superficies oscuras o mates tienen una mayor capacidad de emitir que una resplandeciente. La *Ley de Kirchhoff* afirma que, cuando un cuerpo actúa bien como emisor, será por consiguiente un buen receptor de energía.

En la realidad los objetos no se comportan como los cuerpos negros ideales. En lugar de ello, la cantidad de radiación que se emite a cierta frecuencia es únicamente una parte de la emisión ideal. Aquí es donde aparece el término “emisividad”, el cual nos informa de la fracción de radiación de cuerpo negro que el cuerpo real emite. La emisividad del cuerpo dependerá de la longitud de onda, de la temperatura de su superficie, de su acabado (si es rugosa, lisa ...) y del ángulo en el que emite. El término cuerpo gris se emplea precisamente por esto, para emplear una aproximación de los casos reales, en la que suponemos que existe un valor de emisividad constante para cada una de las longitudes de onda (menor a 1, por ser esta la emisividad del cuerpo negro). Dicha aproximación la conocemos por aproximación de cuerpo gris.

Los cuerpos grises entonces, son independientes de las características espectrales. También son capaces de no tener transmisividad o una reflectividad total. Esto quiere decir que no hay ninguna parte de la energía que les incide que sea capaz de atravesarlos sin inferir en algún aspecto, y que toda la energía que les es irradiada se reemite.

2.5. El efecto invernadero.

Inicialmente (basándonos en [14]) recordemos que los gases de efecto invernadero son aquellos que eran capaces de absorber la radiación infrarroja, y sus principales protagonistas son el dióxido de carbono, el vapor de agua, el óxido nitroso, el metano y el ozono. Debemos tener en cuenta que todos los gases presentes en la atmósfera poseen moléculas cuya frecuencia vibracional molecular está localizada en la parte infrarroja del espectro. Pues bien, estos gases atmosféricos son los que contribuyen a lo que conocemos por **efecto invernadero**, el cual está basado en todos los procesos de absorción y emisión de radiación en la atmósfera que acabamos de ver. Hoy en día, el efecto invernadero es un tema bastante recurrente, del que todos nos hacemos una idea general, pero vamos a profundizar en dicho término para entenderlo mejor.

Inicialmente, vamos a centrarnos en las propiedades que tienen los GEI de la atmósfera. Es común pensar que el principal papel de los GEI es el de limitarse a absorber la radiación infrarroja (RI). En la realidad, los GEI, a parte de lo mencionado, son emisores de RI, y entender esto es primordial para conocer el efecto invernadero.

Partamos de la base de que toda molécula es capaz de absorber radiación de una determinada longitud de onda, pero también será capaz de emitirla en dicha longitud de onda. Si un fotón infrarrojo excita una molécula, ésta pasará a un estado inestable más energético. Esto sucede si la molécula posee estados vibracionales o rotacionales accesibles. En la Tierra, el rango de las frecuencias de radiación térmica

terrestre no posee la suficiente energía como para generar estados traslacionales, siendo estos estados cuánticos internos de la molécula los que responderán a la radiación. Deberán poseer un momento dipolar, lo que hace que el CO_2 o el H_2O sean capaces de absorber RI, y no el O_2 ni el N_2 .

Una vez excitado, la molécula de GEI podrá emitir un fotón infrarrojo (que posea la misma longitud de onda que la energía que absorbió) para ser capaz de regresar a su estado fundamental energético. Dicho proceso no es instantáneo. Durante el transcurso entre la absorción y la emisión, se pueden llegar a producir colisiones con otras moléculas atmosféricas, y durante un tiempo, el nuevo grupo de moléculas puede ser capaz a su vez de absorber y emitir radiación para otras frecuencias. Al poseer dichas colisiones distintos rangos energéticos, se genera una banda continua de frecuencias posibles.

Estas colisiones generan que, la energía que los GEI absorben en la troposfera, se acabe convirtiéndose en energía cinética de los gases atmosféricos, desencadenando el calentamiento de la troposfera.

Sabemos que uno de los principales GEI es el famoso CO_2 , al cual se le atribuye el 25% del efecto invernadero generado por GEI. Esto se debe a que el CO_2 emite y absorbe RI en una frecuencia de unos $15 \mu m$. Debido a esto, posee un determinado estado vibracional de flexión que le induce un momento dipolar momentáneo, haciéndolo activo en el infrarrojo. Precisamente, esta frecuencia se encuentra muy cercana al máximo de emisión de la superficie de la Tierra (que es de unos $10 \mu m$), haciendo que sea un gran GEI.

Para poder entender cómo se produce el efecto invernadero en la atmósfera, lo resumiremos de la siguiente forma. Para comenzar, la atmósfera terrestre posee una casi transparencia al paso de la luz del Sol, lo que hace la superficie y la parte más baja atmosférica absorban $240 W/m^2$. Para que se pueda mantener el balance energético de la Tierra, debería reemitirse al espacio la misma cantidad aproximada de energía que absorbió.

Al emitir la superficie terrestre RI, ésta no puede escapar de manera directa al espacio, ya que los GEI como hemos visto, son responsables de absorberla. Una vez la absorben, la vuelven a emitir en todas las direcciones. Por tanto, una parte de la radiación escapará al espacio, mientras que otra parte será redirigida a la superficie terrestre. De la parte que escapa al espacio, irá ascendiendo por una atmósfera que será cada vez menos densa, menos húmeda y más fría. Pese a que la radiación que se escapa al espacio exterior lo hace desde diversas alturas dentro de la troposfera, el efecto será similar a que el grueso de la radiación se emita desde una zona media de la troposfera. Dicha zona estará a 5 km de altura, y poseerá una temperatura efectiva de $-18^\circ C$ (por ser ésta temperatura capaz de generar una emisión térmica de $240 W/m^2$).

El gradiente térmico atmosférico ($-6,5 \text{ }^\circ C/km$), fija una temperatura media superficial de aproximadamente $14^\circ C$, siendo casi $33^\circ C$ superior a la temperatura de la zona efectiva de emisión. Esto nos ayuda a conocer en cierta medida el volumen del efecto invernadero. Podemos pues definir el efecto

invernadero como la traslación de la zona de emisión efectiva desde la superficie hasta una altura atmosférica elevada.

2.6. Gases de efecto invernadero más destacados de la atmósfera.

Ya hemos hablado de los gases involucrados en el efecto invernadero, así como de los gases presentes en la atmósfera y sus cantidades, pero vamos a ver un poco más de ellos (nos basamos en [14] y [16]). De entre todos los gases de efecto invernadero presentes en nuestra atmósfera destacaremos el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y gases fluorados:

- **Dióxido de carbono:** La principal fuente de emisión de dióxido de carbono es la quema de los combustibles fósiles (tales como la quema de carbón, petróleo y gas natural), de los residuos sólidos, de árboles y materiales biológicos, y a partir de determinadas reacciones químicas. A su vez se debe tener en cuenta que el dióxido de carbono forma parte del ciclo del carbono, donde el carbono se intercambia entre el suelo, las rocas, el océano y la biosfera, llegando así a abastecer a la biosfera terrestre de CO_2 . Dicho abastecimiento es fundamental para la vida en la Tierra como ya sabemos, para que las plantas puedan generar los carbohidratos necesarios para la gran mayoría de organismos. Las concentraciones de CO_2 han ido oscilando con el paso del tiempo durante más de 400000 años, pasando por ejemplo de 180 ppm de la glaciación del Pleistoceno (época de la era del Cenozoico) a 280 ppm durante otros periodos interglaciares. Con la llegada del eón Fanerozoico, y más concretamente, con la llegada de la Revolución Industrial del 1820 al 1840 la concentración aumentó a 400 ppm, y debido al calentamiento global sigue creciendo, alcanzando un valor actual de unas 415 ppm.

- **Metano:** La principal fuente de emisión de metano es la producción y transporte del carbón, del gas natural y del petróleo. También otros focos de metano son las prácticas ganaderas y agrícolas, así como la descomposición de residuos orgánicos en ausencia de oxígeno. Tiene un poder de calentamiento superior al del dióxido de carbono como ya dijimos, aunque su presencia en la atmósfera es inferior. Su presencia en la atmósfera sin embargo ha ido aumentando en las últimas décadas, con un crecimiento del 1% por año.

- **Óxido nitroso:** Las emisiones de óxido nitroso tienen la misma procedencia que las del metano y el dióxido de carbono, a lo que también le tenemos que sumar el tratamiento de aguas residuales.

- **Gases fluorados:** La forma en la que se emiten suele ser a partir de la actividad industrial principalmente. Los gases más destacados de este grupo son los hidrofluorocarbonos, los

perfluorocarbonos, el trifluoruro de nitrógeno y el hexafluoruro de azufre, siendo todos estos gases de efecto invernadero sintéticos (no se producen de forma natural). Su presencia en la atmósfera es muy baja, pero al tener una gran capacidad de absorción de la radiación infrarroja.

2.7. Termodinámica de la atmósfera.

Comencemos hablando de la termodinámica en general. La termodinámica tuvo su origen gracias al científico Sadi Carnot en 1824, definiéndola como la ciencia de la generación del trabajo a partir del calor. Actualmente la termodinámica tiene el uso de explicar los procesos de distribución de variables conservativas, tales como la masa, la energía o el momento, en procesos disipativos (fenómenos físicos donde la energía inicial acaba convirtiéndose en otro tipo de energía que no sea la mecánica). Resulta interesante recalcar que Carnot cita en su obra “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego” que el propio calor es la causa de la formación de las nubes y de la lluvia, de los vientos y que la atmósfera funciona como un enorme motor térmico. (Basamos este capítulo en [5]).

La termodinámica como tal se apoya en las siguientes **leyes de conservación** (en las cuales se demuestra la invarianza temporal del momento, la energía y la masa de un sistema), en la **ley del equilibrio** (demuestra que al aislar un sistema del exterior, el sistema sufre una evolución temporal hacia un estado más simple llamado equilibrio, por lo que la entropía tiende a un valor máximo en la evolución de un sistema aislado), **las leyes constitutivas de la materia en el equilibrio** (que consiguen relacionar las variables dependientes que se tienen en las ecuaciones de conservación con las variables independientes) y en las **leyes constitutivas de la materia en procesos cinéticos** (que consiguen relacionar los flujos de los procesos con equilibrio con las fuerzas que los llegan a originar, y por tanto se puede predecir la velocidad de evolución de los procesos de relajación hasta el equilibrio).

Podemos considerar nuestra atmósfera como un sistema termodinámico. Recordemos que, pese a ser una capa con muy poco espesor, es una capa que horizontalmente es muy extensa. Se puede decir con el formalismo termodinámico clásico que la atmósfera se comporta como un sistema abierto, debido a que sufre un intercambio de masa con su entorno. Dicho intercambio se produce en el límite inferior y superior de la atmósfera. En el límite superior se produce un intercambio con el espacio del que recibe polvo cósmico y cuerpos celestes; y con el límite inferior, que es con la biota global (que comprende la hidrosfera, la biosfera y la litosfera), la atmósfera intercambia agua, partículas y gases.

Si consideramos un periodo de tiempo plurianual se puede apreciar que la atmósfera se encuentra en un estado prácticamente estacionario, ya que las variaciones que se llegan a producir en dicho lapso en valores de masa y energía son ínfimas, considerando incluso el cambio climático actual, donde la temperatura sufre únicamente una variación de unas centésimas de grado por año. A su vez la masa atmosférica varía levemente, poseyendo un valor desde hace millones de años de $5 \cdot 10^{18}$ Kilogramos. Cabe destacar que, pese a dicha masa, la atmósfera llega a recibir $500 \cdot 10^{18}$ Kilogramos de agua procedente del océano anualmente, pero dicha masa se compensa con las precipitaciones. Se puede

entonces considerar que la atmósfera se encuentra casi en equilibrio analizándola globalmente, pero hay que tener en cuenta que se producen oscilaciones locales espaciales y temporales, las cuales hacen que la atmósfera en diferentes zonas no se encuentre en equilibrio ni térmico, ni químico ni mecánico.

Dicho desequilibrio viene dado por la gran bola de fuego que conocemos por el Sol. Como ya sabemos, el Sol proporciona a la Tierra un flujo de energía solar que depende directamente de factores como el momento del día y la época del año. A su vez, la meteorología de la atmósfera está fuertemente ligada a dicha radiación, ya que desestabiliza nuestra atmósfera. Como la insolación media terrestre sufre una disminución al movernos desde el ecuador a los polos terrestres, se produce una clasificación zonal de nuestra atmósfera, teniéndose así la zona ecuatorial, las zonas templadas, las zonas tropicales, las zonas subtropicales, las zonas polares y las zonas subpolares.

Pasemos ahora a hablar de la humedad, ya que es un término para tener en cuenta en cuanto a la termodinámica de la atmósfera. Como ya sabemos, el agua es un componente imprescindible para la vida en la Tierra. Coloquialmente, el agua en su estado gaseoso recibe el nombre de vapor de agua, que viene a ser la humedad, y está presente en el aire a cualquier temperatura. Por lo que la humedad es la cantidad de vapor de agua presente en el aire, que varía en función de factores como la cercanía al mar, la temperatura o la presencia de vegetación.

Recordemos que, cuando un líquido se convierte en gas sufre un proceso llamado evaporación. La energía que absorben las moléculas de agua en la evaporación se usa únicamente para generarles el movimiento suficiente para escapar de la superficie líquida y convertirse en gas. La energía recibe el nombre de calor latente de evaporización, que se acaba liberando con el calor una vez el vapor se vuelve a convertir en líquido. Por tanto, hay un intercambio de moléculas de agua entre el aire y el agua, así como entre aire y hielo, pero nos importa más el primer caso. Cuando se produce la evaporación hay más moléculas de agua que pasan a la fase de vapor de agua que las que llegan a retornar a la líquida. De forma parecida, durante la condensación hay más moléculas que pasan a la fase líquida que a la de vapor de agua. Circunstancialmente se llega a un equilibrio dinámico en el que existe una misma velocidad de paso para ambas fases. La presión que el vapor de agua ejerce en ese momento es conocida por “presión de vapor de saturación”.

Al aumentar la temperatura del agua, las moléculas presentes en ella sufren un gran aumento de su energía cinética, por lo que pueden escapar de su superficie con mayor facilidad, y la presión de vapor de saturación aumenta. Podemos decir entonces que, a mayor temperatura, se precisará de más vapor de agua para llegar a la saturación.

La humedad relativa, o HR, es el índice que se suele emplear para la descripción del contenido de vapor de agua en aire. Nos indica lo cerca que está el aire de saturarse. La cantidad de humedad que se precisa para llegar a saturar el aire depende de la temperatura del aire, si aumentamos la temperatura la HR disminuye, y si por el contrario la temperatura disminuye, el HR aumenta. Pese a esto, si mantenemos

una temperatura constante, variar el vapor de agua que se añade o se sustrae produce una variación en la humedad relativa. Las variaciones en la HR por variación de la temperatura se producen en la atmósfera debido a:

- Variación de la temperatura a lo largo del día.
- Movimientos horizontales de masas de aire.
- Movimientos verticales del aire.

Cabe hablar también de la temperatura de punto de rocío, que es la temperatura en la que el aire debería enfriarse a una presión constante para llegar a estar saturado. Habitualmente, durante la noche, los objetos que se encuentran próximos al suelo se llegan a enfriar por debajo de esta temperatura, y el aire que está en contacto con el suelo también se llega a enfriar por conducción hasta llegar a saturarse y se forma entonces el rocío.

El vapor de agua tiene un importante papel dentro de la climatología de la atmósfera. Esto se debe principalmente a que dicho vapor puede condensarse y convertirse en rocío, en niebla o en nubes, exigiéndose siempre que el aire se encuentre saturado. El aire se encontrará saturado si el vapor de agua se agrega al aire o si el aire se enfría hasta llegar a la temperatura de punto de rocío. El enfriamiento radiativo del suelo terrestre, normalmente durante la noche, es el principal responsable de la formación del rocío y de algún tipo de niebla.

2.8. Procesos adiabáticos de la atmósfera.

Pasemos ahora a hablar de los gradientes adiabáticos atmosféricos (basado en [11]). Para empezar, debemos tener en cuenta que, cuando el aire caliente cerca de la superficie comienza a ascender, sufre un desplazamiento de una zona de altas presiones a una de bajas presiones, con lo que el aire sufre una expansión, y por tanto al tener las moléculas más separadas, se enfría. Un ejemplo de ello es la temperatura a la que se encuentra el aire en la troposfera, que está a -50°C , ya que sufre una disminución de la presión, de la densidad y un menor efecto de la gravedad.

Pues bien, cuando en un proceso el aire no intercambia calor de ninguna forma, dicho aire está sufriendo un proceso adiabático. Por tanto, los procesos de calentamiento y enfriamiento del aire debido a los movimientos ascendentes y descendentes son adiabáticos, por no intercambiar calor con el medio que los rodea (el calor es constante durante todo el proceso). Lo que está sucediendo en dicho proceso es únicamente una expansión o compresión de las moléculas de dicha masa de aire. A su vez, el aire es un mal conductor térmico, y dichos ascensos y descensos se producen con gran velocidad.

Cuando la masa de aire se encuentra próximo a la superficie terrestre, es común tener procesos no adiabáticos, debido a que la masa de aire intercambia calor sin esfuerzo con la superficie. Por el contrario, en las alturas, al encontrarse la masa de aire apartada de las fuentes de calor, se producen procesos adiabáticos.

Cuando una masa de aire sufre una variación de su temperatura, en un movimiento vertical, a calor constante, recibe el nombre de gradiente adiabático. Considerando una masa de aire no saturada (es decir, que todavía puede retener más vapor de agua a una temperatura y presión determinadas) y no recibe calor, sufre un proceso adiabático seco. Los cambios de su temperatura (que se estima de 1°C por cada 100 metros) serán debidos únicamente a procesos de expansión y compresión.

Si recordamos el principio físico que define que una masa de aire sufre un aumento de temperatura si sufre una compresión, y que si se expande su temperatura disminuye, afirmamos lo siguiente: cuando la masa de aire asciende, sufre una expansión porque la presión que sufre es menor a mayor altura, por lo que su temperatura sufre también un descenso debido a que la fricción de las moléculas de dicha masa es menor. Recordemos que, al ser un proceso adiabático, el descenso de la temperatura de la masa de aire durante su ascenso es debida al descenso de la presión ejercida.

La HR de la masa de aire va aumentando a medida que dicha masa asciende, hasta que alcanza el punto de rocío. Cuando lo alcanza, la masa de aire sufre una condensación del vapor y libre el vapor latente de vaporización. Dicho proceso hace que la cantidad disminución de la temperatura con el ascenso se vea reducida. Se debe a que, como la masa de aire está sufriendo una condensación (proceso exotérmico) libera calor, se refuerza a su vez la velocidad a la que la masa de aire asciende, pero el ritmo al que se enfría disminuye. Conocemos por gradiente adiabático húmedo al gradiente que se da mediante fenómenos de condensación.

Cuando una masa de aire sufre un descenso de temperatura, inicia un gradiente adiabático seco, hasta alcanzar el punto de rocío, donde seguirá un enfriamiento mediante un gradiente adiabático húmedo.

2.9. Formación de las nubes atmosféricas.

Cabe hablar ahora de la formación de las nubes (nos basamos en [17] y [18]). La formación de las nubes surge de algunas de las masas de aire presentes en nuestra atmósfera, concretamente de las que más agua presentan en ellas. Dicha agua llega a las masas de aire por procesos como la evaporación del agua presente en el suelo terrestre o la del mar, juntándose con el polvo presente y dando lugar a núcleos de condensación. Como ya vimos anteriormente hablando de la troposfera, los núcleos de condensación permiten que el vapor de agua atmosférico se convierta en agua líquida.

Dichas masas de aire son ahora masas de aire húmedo y cálido, y ascienden al encontrarse con una masa de aire seco y frío, ya que las calientes al tener mayor temperatura y mayor movimiento molecular son menos densas. Al ascender se encuentran con zonas de menor presión, por lo que van sufriendo una expansión gradual. Como a su vez presión y temperatura se encuentran directamente relacionadas por la ley de los gases ideales, la temperatura de la masa de aire disminuirá a su vez. Es justamente dicha

disminución de la temperatura lo que causa que el vapor de agua de la masa de aire se acabe condensando, dando lugar a una nube.

Hablemos ahora un poco de los diferentes tipos de nubes que pueden llegar a formarse, dividiéndolas en nubes altas (que serán las que se forman en altitudes superiores a los 6 Kilómetros), nubes medias (las que se forman entre los 2 y los 7 Kilómetros de altitud) y nubes bajas (formadas por debajo de los 2 Kilómetros de altitud):

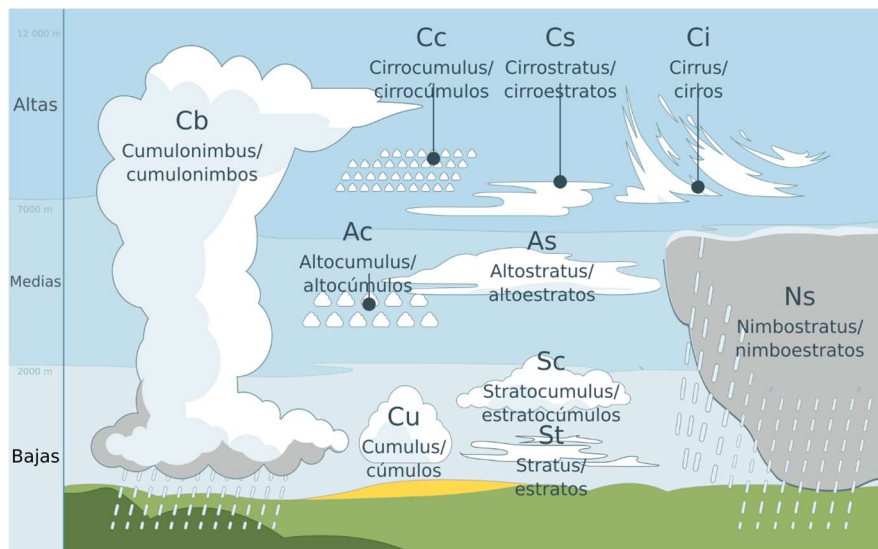


Figura 7: Representación de los diferentes tipos de nubes atmosféricas y su distribución. [32]

- **Nubes altas:** Estas nubes están formadas prácticamente en su totalidad por cristales de hielo. Presentan la característica principal de ser nubes bastante delgadas y presentan un color blanco. Cuando reciben la luz directa no dispersada del Sol en el amanecer y/o en el atardecer adquieren unos colores cálidos muy característicos. Estas nubes actúan de forma similar al aire limpio frente a la radiación de onda corta, ya que son transparentes frente a dicha radiación por el pequeño albedo que poseen. Pese a esto, son capaces de absorber la radiación de onda larga que se dirige hacia el espacio desde el suelo. Absorben la radiación terrestre para luego emitir radiación infrarroja de onda larga hacia el espacio y hacia el suelo terrestre. Como son nubes altas, son frías, y por tanto la energía radiada al espacio es menor a la que resultaría de un cielo sin nubes. La radiación que se atrapa de esta forma y la devuelta a la superficie terrestre se une a la energía de onda corta proveniente del Sol y a la de onda larga del aire que llegan a la superficie. Esto causa un calentamiento de la atmósfera y del suelo, por lo que el principal efecto que tienen estas nubes es el del calentamiento de la Tierra mediante efecto invernadero. Dentro de las nubes altas distinguimos:
 - o *Cirrus:* Son nubes muy altas que presentan una forma similar a la de una pluma, se mueven en la dirección de los vientos presentes en su altitud y suelen ser indicio de buen tiempo.

- *Cirrocumulus*: Son nubes menos frecuentes que los *Cirrus*. Suelen presentar formas pequeñas y redondeadas, y pueden aparecer de forma individual o distribuidas en filas.
 - *Cirrostratus*: Son nubes altas finas que llegan a cubrir todo el cielo. Se suele poder apreciar la silueta del Sol o de la Luna a través de ellas, debido a que los cristales que las forman hacen que la luz que las atraviesa haga un efecto de Halo. Suelen formarse antes de las tormentas, y suelen indicarnos por ello la llegada de precipitaciones.
- **Nubes medias:** Estas nubes están formadas principalmente por gotas de agua, aunque si se da el caso que las temperaturas en dicha zona son muy bajas, las gotas de agua pasarán a convertirse en cristales de hielo. Dentro de las nubes medias encontramos:
- *Altostratus*: Están formadas en su totalidad por gotas de agua. Pueden llegar a tener hasta 1 Kilómetro de espesor. Se aprecian como masas esponjosas de un color grisáceo, cuya disposición suele ser en forma de bandas o de ondas paralelas. Presentan una formación vertical y suelen ser las nubes que acompañan a las tardes de verano.
 - *Altostratus*: Estas nubes están formadas por gotas y cristales de hielo. Suelen presentar un color entre azulado y gris, y suelen cubrir prácticamente todo el cielo. En las zonas en las que la capa de nubes resulta más fina se puede vislumbrar la silueta del Sol. La llegada de estas nubes suele indicar que se producirán precipitaciones continuadas en la zona.
- **Nubes bajas:** Finalmente tenemos las nubes bajas, las cuales están formadas principalmente por gotas de agua, pero les puede suceder como a las medias el hecho de presentar cristales de hielo. Una vez hablemos de los tipos de nubes bajas, hablaremos de la forma en la que interaccionan con la radiación. Dentro de las nubes medias encontramos:
- *Nimbostratus*: Presentan un color gris oscuro. Su base suele ser difícil de identificar, y su cima puede llegar a alcanzar los 3 Kilómetros de altura. Suelen traer consigo precipitaciones casi continuas de lluvia y/o nieve, aunque la intensidad de la precipitación es moderada. Suelen ser muy densas, por lo que, incluso en las zonas en las que los *Nimbostratus* son más delgados, no es posible apreciar la silueta del Sol. Estas nubes suelen producir un tipo de nube conocido como “*stratus fractus*”, que es lluvia evaporada que vuelve a saturarse formando nubes pequeñas irregulares.
 - *Stratus*: Son nubes grises uniformes que llegan a cubrir todo el cielo. La solemos apreciar como una neblina que no llega a alcanzar el suelo. Su llegada no tiene por qué conllevar la llegada de lluvia, pero no se debe descartar. Estas nubes presentan una base mucho más homogénea que los *Nimbostratus*. Se asemejan a los *Altostratus*, pero su

principal diferencia radica en que los *Stratus* presentan un color más oscuro y no se puede intuir la forma del Sol a través de ellos. Suelen formar un mar de nubes en la cordillera.

- *Stratocumulus*: Presentan una forma grumosa redondeada. Suelen formarse en grupos o en líneas. Suelen ser fáciles de apreciar en el cielo por parecer pequeños parches blancos sobre el cielo azul. Poseen un tamaño mayor al de los *Alto cumulus*. Su llegada no suele indicar precipitaciones, pero se puede dar el caso de chubascos ocasionales.
- *Cumulus*: Estas nubes presentan una forma esponjosa, con bordes redondeados y una base plana. El color de la base suele ser blanco o un gris muy claro, y tiene una extensión de 1 Kilómetro aproximadamente. La cima suele presentar la forma de una columna redondeada, y la llegada de estas nubes suele indicar la llegada de buen tiempo.
- *Cumulus congestus*: Son *Cumulus* que presentan una formación vertical. La cima de estas nubes presenta un color blanco y una forma característica parecida a una coliflor. Se forman debido a la evolución de los *Cumulus* en tardes de días cálidos debido a la evaporación. Se suelen agrupar unos sobre otros llegando a formar torres de nubes. Su precipitación habitual es la del chubasco.
- *Cumulonimbus*: Estas nubes se forman cuando los *cumulus congestus* crecen verticalmente. Son nubes de tormenta con una base que no llega a alcanzar los 600 metros de extensión, pero la cima puede llegar a alcanzar los 12 Kilómetros de altura. Al llegar a ser tan altas, las zonas próximas a la cima presentan cristales de hielo, los cuales con la presencia de viento se expanden, y le dan a la cima una forma muy característica de yunque. Pueden presentar cualquier tipo de precipitación, al presentar tal extensión vertical, y a su vez traen consigo truenos, relámpagos e incluso tornados.

Pues bien, los *stratocumulus* que se encuentran más bajos en la atmósfera se encargan de enfriar la Tierra. Como las nubes bajas son todas más gruesas que los *Cirrus*, no son transparentes como el aire limpio, por tanto, no dejan que llegue toda la energía solar al suelo terrestre. Se encargan de reflejar la mayor parte de dicha energía hacia el espacio. Pese a esto, los *stratocumulus* son capaces a su vez de emitir radiación de onda larga en dirección al espacio y a la superficie terrestre, por ello al estar cerca de la superficie suelen presentar su misma temperatura. Por ello radian una intensidad similar a la superficie de la Tierra, y esto hace que no afecten mucho a la radiación infrarroja que se emite al espacio.

La radiación de onda corta que se emite hacia el suelo desde la base de las nubes *stratocumulus* suele calentar la superficie, y la capa de aire que se encuentra entre la nube y la superficie, pero la fuerza que prevalece del albedo es capaz de proteger la superficie y elimina la radiación del Sol, de tal manera que el resultado de todo esto es únicamente un enfriamiento de la superficie. Los *cumulonimbus* son considerados como nubes de convección profunda. Al presentar una parte superior con bajas temperaturas, la energía radiada al espacio es menor que la que se

radiaría con un cielo sin nubes, como en el caso de las nubes altas. Pero al poseer una gran extensión horizontal son capaces de reflejar gran cantidad de energía solar hacia el espacio, por poseer un albedo considerable. Al reducirse la radiación de onda corta para la absorción, no se produce un exceso de radiación para capturar, lo que origina que el poder de su efecto invernadero y de su albedo estén en equilibrio, por lo que el efecto neto resultante es un efecto neutro.

2.10. El efecto albedo y las nubes atmosféricas.

Se ha mencionado anteriormente el término **albedo** [30], el cual conocemos lo que es, pero vamos a definirlo más físicamente para entenderlo mejor, y ver cómo actúa en las nubes. Recordemos inicialmente que se trata de la cantidad de radiación que una superficie es capaz de reflejar respecto a la radiación que le está incidiendo. Si la superficie del planeta posee un valor de albedo alto, tenderá a enfriarse por estar reflejando la mayor parte de la radiación que le llega. Por el contrario, si el planeta posee un valor de albedo bajo, tenderá a calentarse por absorber gran cantidad de radiación. Las superficies claras suelen poseer valores de albedo mayores que las superficies oscuras. Sucede lo mismo con las superficies brillantes respecto a las mates.

Resulta interesante conocer que el agua en la Tierra tiene un efecto de realimentación positiva con el albedo. Esto es debido al hielo, ya que cuando las temperaturas son muy bajas, aumenta la cantidad de hielo en la superficie, haciendo que sea una superficie más clara, y por tanto refleje aún más la radiación, disminuyendo consecuentemente la temperatura.

El albedo de las nubes se corresponde directamente con su reflectividad. Cuando una nube posee un valor de albedo elevado (debemos tener en cuenta que cualquier albedo en luz visible está en un rango de 0,9 a 0,04), indicaría una mayor reflectividad de la radiación solar y una menor transmisión de la radiación hacia la superficie terrestre. Debemos tener en cuenta que el efecto del albedo de las nubes también se aplica con la radiación que emite la superficie de la Tierra hacia ellas. Esto quiere decir que, si tenemos nubes con un alto albedo, la radiación que la Tierra emite está emitiendo será reflejada de nuevo hacia la superficie terrestre.

Debemos recalcar que las nubes tienen un efecto de retroalimentación positiva y negativa, pero, al fin y al cabo, el efecto de albedo de las nubes es un mecanismo de retroalimentación negativa. El efecto albedo de las nubes comienza con el aumento de la temperatura global. Existe entonces una relación exponencial entre la temperatura y la cantidad de humedad que puede contener el aire. A medida que la temperatura aumenta, existe una mayor capacidad de evaporar más humedad en el aire. Recordemos que el vapor de agua es un gas de efecto invernadero. El aumento de la humedad en el aire ayuda a que la temperatura siga aumentando. Sin embargo, con más humedad en el aire, es más probable que las nubes se formen. Es aquí donde comienza el efecto de retroalimentación negativa. Con una mayor cobertura de nubes, se tiene un mayor reflexión de la radiación solar hacia el espacio por las nubes. Dado que hay

menos energía solar para calentar la superficie, las temperaturas comienzan a disminuir, compensando el calentamiento del aumento del vapor de agua. Se consigue entonces un nuevo equilibrio.

Pues bien, el albedo de las nubes depende directamente de su tamaño y distribución, de la masa total de agua que porten y de la cantidad de gotas y partículas que posean. Como podemos ver, el albedo de las nubes dependerá del tipo de nube que haya. El albedo de la nube será mayor cuanto más cerca se encuentre de la superficie, ya que la energía emitida por la Tierra recorrerá una menor distancia hasta ser reflejada para volver a ella. A su vez, cuanto más densa sea (cuantas más partículas contenga, ya sea de gotas o polvo) mayor será su albedo, porque reflejará aún más la radiación que le llegue, tanto de la Tierra como del espacio exterior. Por el contrario, cuanto más alta se encuentre la nube y menos densidad posea, menor albedo poseerá. Las nubes bajas producen una reducción de la radiación que llega a la superficie, pero reemiten la radiación que la propia superficie emite. Las nubes bajas son responsables de reducir las temperaturas máximas durante el día y hacen que las mínimas nocturnas aumenten, por lo que “amortiguan” las temperaturas. Tenemos una imagen que nos ayudará a comprender esto fácilmente:

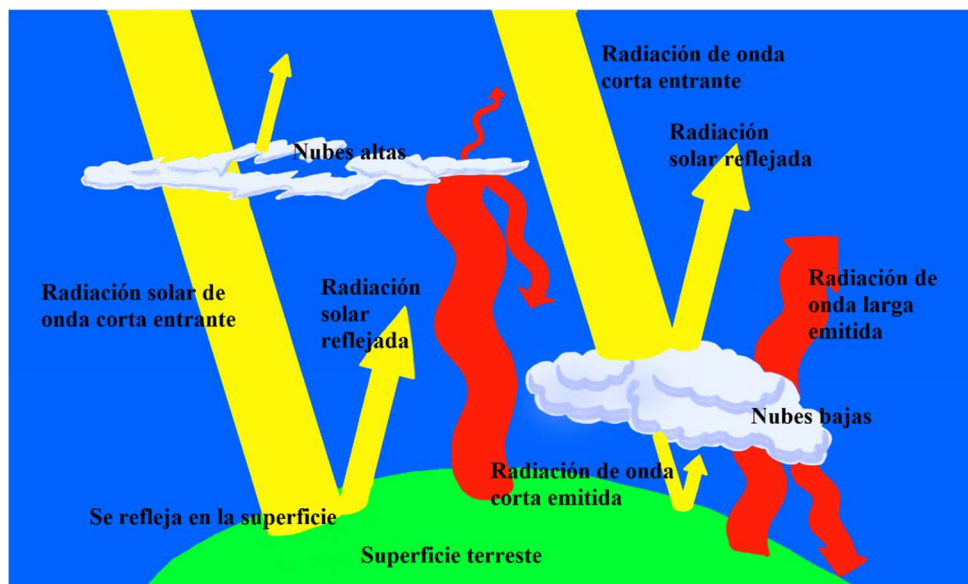


Figura 8: Representación del efecto de las nubes con la radiación entrante y la emitida por la superficie terrestre.

3. Sistema climático.

3.1. Qué es el sistema climático.

Para hablar del sistema climático debemos conocer previamente a qué nos referimos cuando hablamos de “clima” (para ello nos basaremos en [19]). El clima viene a ser el patrón medio que el tiempo meteorológico sigue en una zona determinada durante un periodo de tiempo prolongado, y viene determinado por la combinación de procesos en el sistema climático, los cuales son principalmente los patrones de viento y las corrientes oceánicas. El sistema climático está formado por cinco subsistemas y las interacciones que se producen entre ellos, que son: la atmósfera, la hidrósfera (es decir, los océanos), la litosfera (la superficie terrestre), la criósfera (constituida por el hielo marino, las cubiertas de nieve estacionales, los glaciares de montaña y las capas de hielo a escala continental) y la biosfera (tanto la terrestre como la marina). Vamos a hablar ligeramente de cada uno de estos subsistemas:

- **Atmósfera:** De la atmósfera ya se ha hablado en el tema anterior, por lo que no hace falta que nos excedamos más con ella.

- **Hidrósfera:** La hidrósfera es toda la capa de agua que envuelve a la Tierra. Como ya sabemos, esta agua circula continuamente, sufriendo cambios de estado en una sucesión cíclica de sucesos que conocemos como ciclo hidrológico. La energía que llega desde el Sol es la principal responsable de que se puedan llevar a cabo dicho ciclo con cambios de estado. A su vez, esta capa dinámica es capaz de regular el clima terrestre, interviene en el modelado de la superficie y hace que la vida en la Tierra sea posible, aunque es a su vez culpable de riesgos geológicos externos, tales como las inundaciones. Las características principales de la hidrosfera son su salinidad, su composición mineral, su alto contenido en oxígeno, la variación de su temperatura con la profundidad y su densidad.
Su origen se debe a la condensación y solidificación de todo el vapor de agua que se encontraba contenido en la atmósfera primitiva. Conforman las $\frac{3}{4}$ partes de toda la superficie terrestre, y el 97% de toda esta agua es salada (conforma los mares y océanos), mientras que el 3% restante corresponde a agua dulce (la cual encontramos en el hielo, los lagos, las aguas subterráneas, los pantanos, ríos...).

- **Litósfera:** La litosfera conforma la capa más superficial y sólida de la Tierra, al ser la más externa y rígida. La forman la corteza terrestre y la capa superior del manto terrestre. Suele poseer un espesor comprendido entre los 50 y los 100 Kilómetros. Su límite superior es la propia superficie terrestre, mientras que su límite inferior suele ser la astenosfera (es una capa plástica que podemos encontrar en el manto superior). La litosfera no es una capa de roca uniforme, ya

que la encontramos fragmentada en placas tectónicas, llegando a haber 15 placas de gran tamaño y más de 40 microplacas.

- **Criósfera:** La criósfera conforma todas las partes de la superficie terrestre en las que el agua se halla en estado sólido. Es una parte integral dentro del sistema climático global por poseer importantes vínculos y reacciones que surgen por la influencia en flujos energéticos en la superficie, lo cual hace que la criósfera posea un papel importante dentro del clima global y en el cambio climático. La mayor parte de la criósfera la podemos encontrar en las regiones polares de la Tierra, seguidamente podemos encontrar gran parte de la criósfera en las zonas de alta montaña que poseen nieve perpetua. Debemos tener en cuenta que la criósfera es una de las mayores reservas de agua dulce del planeta, y por la acción del calentamiento global de origen antrópico, gran parte de la criósfera se está derritiendo. A su vez, la criósfera juega un importante papel dentro del cambio climático, ya que la criósfera superficial es uno de los principales protagonistas dentro del albedo (es decir, es una buena superficie a la hora de reflejar la radiación que incide sobre ella) de la Tierra, haciendo que la temperatura promedio del planeta disminuya.
- **Biosfera:** Por último, la biosfera es el sistema que está formado por todos los seres vivos de la Tierra, así como las interrelaciones que se establecen entre ellos y el medio en el que se encuentran. Podemos decir que la biosfera es la capa en la que se desarrolla la vida. La energía que proviene del Sol en forma de luz es capaz de ser capturada por organismos como las plantas, las algas o algunas bacterias, a través de la fotosíntesis. Con dicho proceso son capaces de devolver compuestos orgánicos (tales como el azúcar) y oxígeno mediante la absorción del dióxido de carbono. Por tanto, la gran mayoría de las especies de animales, hongos y bacterias dependemos todos de manera directa o indirecta de la fotosíntesis.

Se produce una evolución con el paso del tiempo en el sistema climático debido a la propia dinámica interna, así como por la influencia de forzamientos externos (tales como las erupciones de los volcanes o las variaciones solares) y antropógenos (tales como el cambio que se produce en el uso del suelo o la variación de la composición de la atmósfera por la actividad humana).

Las interacciones entre los diferentes subsistemas se producen mediante flujos energéticos de varias formas, como por ejemplo mediante los intercambios de agua, los flujos de otros gases en trazas radiativamente importantes y los ciclos de nutrientes. Lo que hace que el sistema climático tenga una inercia propia es la entrada de la energía solar, que como ya vimos al hablar de la atmósfera, se equilibra con la emisión de la energía infrarroja hacia el exterior. Esta energía solar es la principal fuerza conductora de la actividad atmosférica y los océanos, de los flujos producidos de calor y agua y también de toda la actividad biológica.

Los componentes que acabamos de ver del sistema climático actúan directamente sobre el clima regional y el mundial de diversas formas. Pueden influir en la composición atmosférica terrestre, lo que implica que son capaces de variar la cantidad de absorción y transmisión de la energía solar y la emisión de la energía infrarroja emitida al exterior. También cambian las propiedades del suelo terrestre, así como la naturaleza de las nubes atmosféricas y su cantidad. Por último, las componentes del sistema climático son capaces de distribuir el calor entre regiones de forma horizontal y vertical, mediante la actividad atmosférica y las corrientes de los océanos.

La totalidad de los flujos producidos entre los subsistemas del sistema climático se encuentran próximos a un equilibrio perfecto en su estado natural, si analizamos dichos flujos en un periodo de unas dos décadas. Pese a esto, de un año a otro se llegan a producir desequilibrios en dichos flujos, pero estos son debidos a la propia variabilidad natural del sistema. Además, las acciones del ser humano afectan al propio desarrollo de los procesos del clima, alterando el equilibrio del que estamos hablando, alterando por consiguiente la composición atmosférica terrestre y las propiedades de su superficie.

3.2. Circulación y modelos atmosféricos.

Hablemos ahora de la circulación atmosférica, la cual viene a ser el movimiento del aire atmosférico a gran escala (nos basaremos en [20] y [33]). Si a este movimiento le sumamos las corrientes marinas, ya tenemos los dos protagonistas de la distribución del calor a lo largo de la superficie terrestre. Se debe tener en cuenta que esta circulación atmosférica sufre fluctuaciones con el paso del tiempo si nos centramos en una escala detallada, pero a grandes rasgos suele mantenerse constante. Para el caso de sistemas atmosféricos individuales, tales como las células convectivas tropicales, suceden aleatoriamente por lo que su tiempo meteorológico es difícil de pronosticar.

El primer modelo que intentó explicar la circulación atmosférica fue el que propuso George Hadley a comienzos del siglo XVIII, de ahí que recibiera el nombre de “célula de Hadley”. Dicho modelo se basaba en que la mayor incidencia que ejercía la radiación solar era producida en la zona ecuatorial de la Tierra, en la cual se calentaba el aire. Al ser calentado, se volvía menos denso y por tanto más ligero y ascendía. Al ascender, dicha masa de aire se dirigía a los polos, y este movimiento originaba que el aire se enfriara y se volviera más denso, por lo que descendería de nuevo hacia la región ecuatorial. Por tanto, con este modelo se originaban dos grandes células de Hadley, una en cada hemisferio de la Tierra.

Si bien este modelo parecía factible, se descubrió que no era un modelo aplicable al sistema climático terrestre, ya que el propuesto por Hadley únicamente explicaba el movimiento atmosférico de cuerpos estáticos, y la Tierra no lo es. Se debe tener en cuenta una distribución de las presiones en la que la situación de los diferentes continentes y los océanos intervienen, así como el relieve de la superficie terrestre en cada una de las zonas. Además, se debe considerar el efecto Coriolis, el cual hace que cualquier móvil que por ejemplo se mueva desde el polo norte en dirección al ecuador, siguiendo la

dirección de un meridiano, se desviará hacia la derecha en el hemisferio norte. Con todos estos factores se obtiene una nueva distribución, ya que, en las zonas del ecuador y sobre los 60° de latitud sur y norte, se originan zonas de bajas presiones; y para las latitudes subtropicales situadas entre los 30° y 40° de latitud para el hemisferio norte y sur, junto con los polos, se originan zonas de altas presiones. Por tanto, llegamos finalmente a una distribución de 3 células convectivas en ambos hemisferios, siendo estas células la de Hadley, la de Ferrel y la Polar. Podemos observar dicho modelo de 3 células en la siguiente imagen:

Como podemos apreciar, los vientos originados rara vez serán capaces de desplazarse desde el norte hacia el sur, ya que su movimiento natural será en dirección oblicua, o llegando a ser perpendicular a los meridianos terrestres debido al efecto Coriolis del que ya hemos hablado. Pasamos ahora a analizar cada una de las células:

- **La célula de Hadley:** Esta célula conforma un patrón atmosférico de circulación cerrado que podemos encontrar en las zonas tropicales, dando lugar a los conocidos vientos alisios (los vientos propios de zonas como Canarias, los cuales soplan de manera regular de este a oeste desde las zonas de altas presiones subtropicales hacia las zonas de bajas presiones ecuatoriales) y los vientos del oeste ecuatoriales. Está comprendida entre los 0° y los 30° de latitud.

El viento presente en la zona ecuatorial se calienta, de tal forma que se vuelve más ligero al perder densidad, elevándose y generando una zona de bajas presiones. Dicho aire se condensa y conforma grandes cúmulos, los cuales son los causantes de las altas tasas de precipitación de estas zonas. La masa de aire caliente se va desplazando en dirección norte (considerando que solo estamos observando el hemisferio norte, ya que va a suceder lo mismo en el hemisferio sur, pero en direcciones opuestas), donde se enfriará y descenderá en las latitudes tropicales, que encontramos en torno a los 30° de latitud. Una vez el aire ha llegado hasta dicha latitud, sufrirá una escisión, y una de las partes de este aire viajará hacia el polo correspondiente al hemisferio en el que se encuentre, y la otra parte volverá al ecuador donde reiniciará su proceso. En esta zona en la que se produce la división, una parte de los vientos en superficie son dirigidos hacia el ecuador y otra parte hacia los polos. Al haber una parte de ese viento que vuelve al ecuador, y al tener dos hemisferios en los que está sucediendo lo mismo, tendremos una convergencia de vientos en el ecuador procedentes del hemisferio norte y del sur. A esta zona de convergencia se la conoce como zona de convergencia intertropical.

Al situarnos entre los 20° y los 40° de latitud, encontramos las zonas tropicales, donde vamos a tener una convergencia de la parte de aire que está viajando hacia el polo de la célula de Hadley, y la célula de Ferrel. Se producirá una zona de altas presiones, y su principal característica es que casi no hay precipitaciones.

- **La célula Polar:** Esta célula está conformada por una gran región situada entre los 60° y los 90° de latitud. El aire de estas zonas está caracterizado por ser un aire frío, y en los niveles superiores, al encontrarse en un estado más denso y grávido, se genera una zona de subsidencia que implica zonas de altas presiones. A su vez, se llega a producir un flujo de aire superficial que avanzará desde los polos (90° de latitud) hacia las latitudes subpolares (que hallamos entre los 50° y los 70° de latitud). Este aire frío que se está desplazando a latitudes inferiores sufre un desvío por parte de la fuerza del efecto de Coriolis, dando lugar a “los vientos del este (oeste) polares” en el hemisferio norte (sur). El flujo de aire superficial sufre un calentamiento a medida que avanza, dando lugar a fenómenos de convección cerca de los 60° de latitud.
- **La célula de Ferrel:** Esta célula la podemos encontrar entre los 30° y los 60° de latitud. El flujo de aire superficial fluirá en esta zona en dirección a los polos y hacia el este, mientras que el aire que se encuentra en niveles superiores viajará en dirección al ecuador y hacia el oeste. En la parte inferior de estas células, es decir, en la parte más próxima al ecuador, se encuentra formada por masas de aire superficial originadas en los trópicos y que se desplazan hacia los polos, donde ascenderán por convección. Recordemos que al hablar de la célula de Hadley dijimos que, en la divergencia del viento en las latitudes medias, una parte de ese viento se dirigiría hacia los polos. Esta parte de viento se convertirá bajo la acción de la fuerza de Coriolis en el sistema conocido como “vientos del oeste”, fundamentales en el balance del calor global.

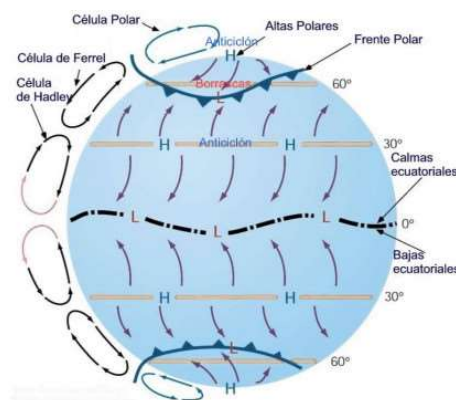


Figura 9: Representación de la circulación atmosférica con el correspondiente modelo de 3 células.

[33]

Además, en la célula polar se observa un flujo de aire superficial frío con un marcado componente del este, el cual viaja hacia las latitudes subpolares. Una vez ahí, se encuentra con los vientos cálidos propios del oeste, y la confrontación de ambos vientos genera un escenario en el que hay convergencia de vientos muy oscilantes a la vez que intensos. La zona de convergencia se conoce como “frente polar”, y es una de las regiones más dinámicas de la atmósfera, por la disposición de diferentes núcleos ciclónicos

asociados a sistemas frontales de las latitudes medias, y está caracterizada por ser una región marcada por las lluvias, los fuertes vientos y la nubosidad.

3.3. Cambios en el sistema climático.

Pasemos ahora a hablar de los cambios que se llegan a producir en el sistema climático (nos basamos en [21] y [22]). Como bien sabemos, el clima está ligado a la latitud, la altitud, la orientación del relieve con respecto a la cantidad de radiación que recibe, la distancia al mar y a la dirección de los vientos y corrientes marinas. Cada uno de estos factores es capaz de alterar los elementos que constituyen el clima, es decir, son capaces de alterar la presión, la temperatura, la humedad, las precipitaciones y los vientos. Todos estos factores generan cambios en el clima en un intervalo de tiempo relativamente corto. Por otra parte, la variación en factores tales como la emisión de radiación del Sol, la distribución de los diferentes continentes, la composición atmosférica, la órbita terrestre o incluso las corrientes marinas son capaces de producir inestabilidades dentro del equilibrio térmico terrestre y en la distribución energética, siendo procesos que alteran el clima en largos periodos de tiempo.

Para que se lleve a cabo un cambio climático global debe tener lugar un forzamiento climático, lo que viene a ser una perturbación dentro del equilibrio radiativo terrestre. Estos forzamientos son debidos a las variaciones que se llegan a producir en el propio albedo terrestre, en la cantidad de aerosoles en la atmósfera (considerando tanto los de procedencia natural como la generada por el hombre) así como los gases de efecto invernadero, y las fluctuaciones que se produzcan dentro de los parámetros orbitales terrestres. Pese a haber una gran cantidad de factores que propician el cambio climático terrestre, actualmente la mayoría de ellos son de origen antropogénico, siendo el principal causante de dicho cambio la quema de los combustibles fósiles. De hecho, todas las posibles contribuciones de los forzamientos naturales de la tierra junto con la propia variabilidad interna a la alteración de la temperatura vienen siendo nimio desde el 1951.

Vamos a hablar ahora ligeramente de los principales causantes del cambio del sistema climático, donde tendremos por una parte los cambios producidos por influencias externas, y los producidos por influencias internas.

- Internas:

- **La deriva continental:** Como ya se ha mencionado anteriormente, la situación geológica de los continentes tiene un gran impacto en cuanto al clima nos referimos. Las placas tectónicas terrestres llevan en continuo movimiento desde el propio origen de la Tierra, lo que ha ido modelando el relieve terrestre hasta el día de hoy. Pese a ser un movimiento continuo, es un movimiento extremadamente lento, lo que hace que el clima en se mantenga durante millones de años. Un ejemplo claro de la deriva continental es el caso de la isla de Svaldbard, situado en el mar glacial ártico. La extraordinariedad de esta isla es que posee yacimientos de carbón, pese a no presentar

ningún tipo de árbol en su extensión debido a la dureza de las temperaturas. Se puede explicar dicho fenómeno considerando que la isla se encontraba originalmente en una zona más meridional con un clima que permitiera desarrollar vegetación, y más adelante, con la deriva continental, fue desplazándose hasta su ubicación actual.

- **La composición de la atmósfera:** Cuando hablamos de la atmósfera, recordemos que se habló de una atmósfera primitiva, la cual estaba formada principalmente por H_2 y por He . Posteriormente, fue desprendiéndose de ellos y comenzó a estar formada por los gases que emitían los volcanes, principalmente de CO_2 . Durante esta época tenemos por una parte los gases de efecto invernadero proporcionados naturalmente por la actividad volcánica, y por otra parte tenemos los óxidos de azufre y otra serie de aerosoles también emitidos por los volcanes que se encargaban de enfriar la Tierra. Se acaba llegando a un equilibrio entre los gases que calentaban y los que enfriaban el planeta. Posteriormente, con el inicio de la vida en la Tierra surgieron formas biológicas capaces de capturar el CO_2 de la atmósfera a la vez que emitían oxígeno. Gracias a la abundancia de oxígeno el desarrollo de la vida fue cada vez mayor hasta llegar a un punto donde aumentó considerablemente el consumo del abundante oxígeno atmosférico mientras que el del CO_2 disminuyó, llegando así a un equilibrio.
- **El campo magnético de la Tierra:** Las variaciones que pueden llegar a producirse en el campo magnético terrestre alteran de manera indirecta al clima, ya que estos cambios son capaces de hacer que las partículas que el Sol emite sean detenidas o que no lo sean. A lo largo de la historia, sucesos tales como inversiones de la polaridad terrestre, o el movimiento de los polos magnéticos hacia el ecuador en vez de encontrarse próximos a los polos geográficos, generaron grandes inestabilidades en el clima de la Tierra.
- **La actividad del ser humano:** Lo que conocemos como “impacto ambiental” viene a ser la perturbación que conlleva una acción del ser humano en el medio ambiente. Como ya sabemos, cualquier actividad humana repercute en el medio ambiente, pero el impacto ambiental se diferencia de dichas acciones a través de una evaluación que determina si es posible alterar la calidad ambiental. Es decir, el impacto ambiental es la perturbación, tanto positiva como negativa, de la calidad del medio ambiente debido a una obra, un proyecto, o cualquier tipo de actividad humana.
- **Las corrientes oceánicas:** El propio movimiento de las aguas de los océanos son imprescindibles a la hora de regular el clima, puesto que son capaces de moderar las temperaturas. Estos movimientos de agua son producidos por los vientos planetarios, la aparición de aguas frías en profundidades de costas occidentales pertenecientes a la zona intertropical y en altitudes subtropicales, y por los movimientos de traslación y rotación de la Tierra.

- **La retroalimentación del cambio climático:** Esto viene a ser el “*feedback*” que puede llegar a hacer que una perturbación del cambio climático facilite o dificulte procesos posteriores del clima. El propio sistema climático posee diferentes retroalimentaciones que son capaces de variar la respuesta del sistema climático a las alteraciones de los forzamientos externos (los cuales analizaremos en el siguiente apartado). Puede haber dos tipos de retroalimentación, la positiva y la negativa. La positiva hace que aumente la respuesta que el sistema climático da al forzamiento original, mientras que la negativa hará que se reduzca dicha respuesta.

- **Externas:**

- **Las alteraciones solares:** Como bien sabemos ya que se ha mencionado repetidas veces, el Sol emite radiación electromagnética en el rango de todo el espectro. La mayor parte de esa energía es emitida dentro del espectro visible y el infrarrojo. La radiación solar se ajusta perfectamente a la radiación de un cuerpo negro que se encuentra a una temperatura de 5770 Kelvin, y que emite radiación de tal forma que a la parte superior de la atmósfera le llega una irradiancia de 1361 W/m^2 , la cual conocemos como la constante solar (constante ya que, por su bajísima variación en intervalos cortos de tiempo, se mantiene).
- **Los impactos de los meteoritos:** Cualquiera de los tipos de acontecimientos del tipo catastrófico, como el caso de los meteoritos, son capaces de alterar por completo la superficie terrestre, lo que conlleva indudablemente a un cambio del clima. Un caso claro fue el meteorito que se estrelló en Yucatán (hace unos 66 millones de años), el cual impactó contra la Tierra con una energía equivalente a la energía que recibe la Tierra del Sol a lo largo de todo un año. A parte de modificar por completo y permanentemente la superficie, se suma la liberación de gases del tipo aerosol, vapor de agua, polvo y dióxido de carbono, sumado a los posibles incendios que pueda generar el impacto del meteorito. Para hacernos una idea de lo capaz que es de alterar el sistema climático, una vez impactó el meteoro, produjo una alta liberación de polvo y gases hacia la atmósfera que causó que solo pasara un 80% de la luz del Sol durante aproximadamente 10 años. A esto le siguió un enfriamiento en toda la Tierra, conocido como “el invierno nuclear”, donde las temperaturas podían llegar a estar por debajo del punto de congelación. Seguidamente, debido a la liberación de los gases de tipo aerosol, aumentó significativamente el efecto invernadero.
- **Las variaciones de la órbita:** Pese a que la luminosidad del Sol que llega a la Tierra se mantiene más o menos constante con el paso del tiempo, la órbita terrestre oscila en intervalos de tiempo periódicos. Dichas fluctuaciones originan que la radiación que llega a los hemisferios no sea constante, generando veranos o inviernos más largos de

lo común. Hay tres posibles causas a las variaciones orbitales, las cuales son la excentricidad de la órbita, la oblicuidad orbital y la precesión de los equinoccios. Debemos saber que estos factores son causantes de la alteración de la cantidad de insolación que recibe cada uno de los hemisferios, pero el flujo de radiación solar global se mantiene casi constante.

4. El cambio climático y la influencia del ser humano.

Se ha hablado ya del cambio climático, pero vamos a estudiarlo a fondo. Tenemos dos posibles descripciones del cambio climático [23], una aportada por el “IPCC” (Panel Intergubernamental contra el Cambio Climático) y la otra es aportada por el “Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”. La primera viene a decir lo siguiente: *“El cambio climático es el cambio identificable en el estado del clima, a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo de tiempo prolongado, cifrado en decenios o periodos más largos, debido a la variabilidad natural o a la actividad humana”*. La segunda definición es la siguiente: *“El cambio climático es el cambio identificable del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad climática natural, observada en periodos de tiempo comparables”*. Como podemos apreciar, el IPCC se centra en un cambio notorio del clima, independientemente del origen del cambio, ya sea por causas naturales o por las actividades antropogénicas. Por otra parte, el Convenio marco de las Naciones Unidas nos da una definición del cambio climático causado por la acción humana, teniendo tanto en cuenta las que generan el cambio de forma directa o indirecta, y teniendo en cuenta a su vez la propia variación natural propia del clima.

Pues bien, ya vimos en el apartado anterior las causas que generan cambios dentro del sistema climático, así que vamos a pasar ahora a analizar las evidencias de dicho cambio, ya que con el transcurso de los años se pueden apreciar notables cambios dentro del clima. Estos cambios los hemos podido apreciar en hechos como la subida de la temperatura global, el aumento del nivel del mar producido por el aumento de la temperatura de este, en el descenso de capas de nieve y los deshielos, así como las fluctuaciones en las precipitaciones y la aparición de fenómenos meteorológicos extremos.

Para hablar del cambio climático, nos basaremos en los informes aportados por el IPCC durante su sexto ciclo de evaluación, por ser este el más actual. A lo largo de este capítulo nos vamos a basar en 4 de las publicaciones del IPCC, las cuales son:

- **Cambio climático 2021: Bases físicas.**
- **Calentamiento global de 1,5°C.**
- **El cambio climático y la tierra.**
- **El océano y la criósfera en un clima cambiante.**

Hablaremos en un apartado final de las influencias más notorias del ser humano en el sistema climático con respecto a los anteriores apartados tratados.

Vamos a hablar bastante sobre el término de “temperatura media global”, así que convendría entender a qué nos referimos cuando hablemos de ella. Dicho término se emplea para hacer referencia al promedio de la temperatura de la atmósfera terrestre, generalmente en el nivel más superficial. El IPCC aclara que, cuando hablamos de temperatura superficial, es el promedio global estimado de las temperaturas del

aire próximo a la superficie terrestre y el hielo marino, y las temperaturas superficiales del mar en las regiones oceánicas sin presencia de hielo. A la hora de calcular las variaciones de la temperatura media global de la superficie, se emplea el promedio global de la temperatura a la que se encuentra el aire cercano a la superficie (tanto de la tierra como de los mares). Vamos a analizar la *Ley de Stefan-Boltzmann*:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_e)^4 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde la E corresponde a la potencia emisiva, la ε es la emisividad, la σ es la constante de Stefan-Boltzmann y la T_e es la temperatura efectiva, también conocida como temperatura absoluta de la superficie. Como podemos ver, se erige una relación matemática entre la temperatura y la cantidad de energía que se emite por radiación. Con esto podemos entender mejor como se modifica la temperatura. El aumento de la temperatura media global está directamente relacionado con una inestabilidad en el balance energético.

La manera de obtener una medida global parte de la toma de medidas de la temperatura en todo el mundo, a través de millones de estaciones meteorológicas distribuidas por la faz de la Tierra, con boyas oceánicas, a partir de los datos que nos aportan los satélites meteorológicos desde el espacio, etc. Con todos estos datos se emplean procedimientos estadísticos para poder obtener una medida fiable y cuantificar la incertidumbre que nos aporta el cálculo complejo realizado (nos ayuda a conocer la fiabilidad de la medida).

Tenemos acceso a las mediciones de temperatura por satélite en la troposfera desde el 1979 [15]. Los satélites son imprescindibles para la medición de la temperatura por poseer estos una cobertura global. La forma que tienen estos satélites de operar es a través de la medición de la intensidad de la radiación de microondas del oxígeno atmosférico, la cual es proporcional a la temperatura. Sus mediciones resultan más fiables que las de los globos meteorológicos.

Los registros de los globos meteorológicos comenzaron en el 1958. Estos emplean las radiosondas para medir diferentes parámetros atmosféricos y envían dicha información a un receptor fijo. Nos permiten obtener datos de la presión, altitud, posición, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección de los vientos y algunas miden la concentración de ozono.

Para la medición de la concentración de los diferentes gases atmosféricos, como por ejemplo para el CO_2 , se emplean sensores que funcionan mediante infrarrojos. Basan su funcionamiento en el principio de absorción de energía de estos gases para una determinada longitud de onda, que suele encontrarse en el infrarrojo. El sensor posee un emisor y un receptor de luz, que se encargan de mandar y recibir un haz con la longitud de onda de absorción del gas que estamos analizando. El haz se atenuará en función de la cantidad de gas en el aire.

Hemos hablado de las boyas oceánicas, pero mencionaremos también los mareógrafos. Estos nos sirven para, como su nombre indica, medir y registrar las mareas, así como también nos aportan información de la subida del nivel del mar. Hay dos tipos de mareógrafos, unos miden el nivel del mar a través de la presión hidrostática (conocidos como mareógrafos Aanderaa), y otros lo hacen mediante la medición de distancia por el eco de un ultrasonido hasta el fondo marino (conocidos como mareógrafos Sonar). A su vez, nos permiten conocer la temperatura de los mares y la temperatura de su superficie.

4.1. Cambio climático 2021: Bases físicas.

Comencemos pues por analizar el **Cambio climático en el 2021** [24] desde las bases físicas. Debemos saber que desde el quinto informe que realizó el IPCC, se obtuvieron mejores mediciones y los archivos paleoclimáticos obtenidos nos permiten analizar los diferentes componentes del sistema climático, así como las variaciones que ha sufrido hasta hoy. Gracias a todo esto se obtiene una mejor perspectiva sobre la influencia del ser humano en el cambio climático, así como en las variables del clima, como pueden ser los fenómenos climáticos extremos o los meteorológicos.

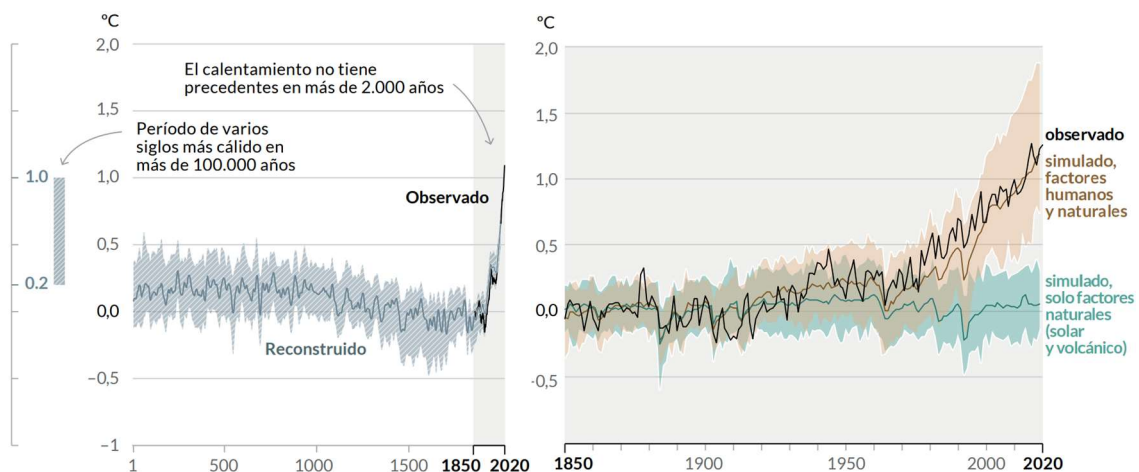


Figura 10: Representación del cambio de la temperatura global en superficie reconstruido y observado (figura de la izquierda) y Representación del cambio de la temperatura global en superficie observado y simulado empleando factores humanos y naturales, y solo factores naturales (figura de la derecha). [24]

Como podemos apreciar por el análisis de las anteriores figuras, es considerable la contribución del ser humano al incremento de la temperatura en las últimas décadas.

Se tiene una firme certeza de que el aumento de **la temperatura de la atmósfera, del océano y de la tierra es mayoritariamente debido a la influencia del ser humano**. Los análisis demuestran que se han producido veloces y grandes cambios en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera:

- Se ha producido un gran aumento de la concentración de gases de efecto invernadero homogéneamente mezclados en la atmósfera desde el 1750, y este aumento ha sido debido indudablemente a la actividad humana. Las mediciones aportadas por el quinto ciclo de

evaluación del IPCC (IE5) indican que desde el 2011, dicha concentración ha seguido en aumento, obteniéndose en 2019 las medidas anuales siguientes: 410 ppm (partes por millón) de CO_2 , 1866 ppb (partes por billón) de CH_4 y 332 ppb de N_2O . El océano y la propia tierra han sido capaces de mantener una proporción casi constante de absorción del dióxido de carbono a escala global (aproximadamente un 56% cada año), procedente de las actividades antropogénicas.

- Otro análisis demuestra que, de las últimas cuatro décadas, cada una ha sufrido un mayor aumento de la temperatura que la anterior desde el año 1850. Se tiene que la temperatura global de la superficie del año 2001 al 2020 fue de 0,99°C (desde los 0,84°C hasta los 1,10°C) más alta que el aumento sufrido entre los años 1850 al 1900. A su vez, la temperatura global de la superficie del año 2011 al 2020 fue 1,09°C (desde los 0,95°C a los 1,20°C) más alta que el sufrido del 1850 al 1900. Cabe destacar que el calentamiento en la superficie terrestre (1,59°C) es superior al que sufrió el océano (0,88°C).
- Se tiene que el aumento de la temperatura total en superficie que ha sido provocado por las actividades antropogénicas se encuentra entre los 0,8°C y los 1,3°C, obteniéndose una medición global media aproximada de 1,07°C. Los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera homogéneamente mezclados han podido contribuir al aumento de la temperatura en 1,0°C y 2,0°C. Se estima que estos gases han sido la principal razón del calentamiento de la troposfera desde el 1979, y que la disminución de la capa de ozono debida a la actividad humana haya sido el principal causante del enfriamiento de la parte inferior de la estratosfera desde el 1979 hasta casi el 1991.
- Es bastante posible que la influencia del ser humano haya aportado a la tendencia en los cambios de las precipitaciones desde la mitad del siglo XX, así como en la tendencia de los cambios en la salinidad de los océanos cercanos a la superficie.
- Las actividades del ser humano han sido causantes de la regresión global de los glaciares desde el 1990 y de la disminución de hielos marinos (en el Ártico, ya que en la Antártida ha habido tendencias opuestas y ha sufrido una variabilidad interna considerable). También ha influido en el merma del manto de nieve primaveral desde el año 1950 dentro del hemisferio norte, así como en la disminución de la masa del manto de hielo presente en la Antártida y Groenlandia.
- Ha habido un aumento de los océanos (desde los 0 a 700 metros de profundidad) a nivel global desde el 1970, siendo la actividad humana la principal causa de ello. Las emisiones de dióxido de carbono de las actividades antropogénicas han causado una acidificación de las aguas en superficie. Se tiene también que las capas más superficiales del océano han sufrido una disminución del oxígeno, y es probable que el ser humano sea el causante.
- Tenemos un aumento del nivel medio del mar de 0,20 metros (desde los 0,15 hasta los 0,25 metros) desde el 1901 hasta el 2018. Cabe destacar la tasa de aumento anual del nivel del mar del 2006 al 2018 de 3,7 milímetros, teniendo en cuenta que del 1901 al 1971 aumentó 1,3

milímetros. La actividad humana ha tenido un importante papel en el aumento del nivel del océano, por lo menos desde el 1971.

La escala de los cambios recientes del sistema climático y el estado actual de sus aspectos no tienen precedentes en un periodo de bastantes siglos a miles de años.

- Las concentraciones de dióxido de carbono en atmósfera fueron, en 2019, las más altas, por lo menos en los últimos 2 millones de años. Por otra parte, las concentraciones de metano y óxido nitroso han sido también las mayores desde hace 800000 años. Debemos resaltar que el aumento de las concentraciones de estos gases ha sido muchísimo mayor desde el 1750 hasta hoy en día, que el aumento sufrido en los últimos 800000 años.
- El aumento de la temperatura global de la superficie ha sido más veloz desde el año 1970 hasta el 2020 que en cualquier otro periodo de 50 años durante los últimos 2000 años.
- La cantidad de hielos marinos presentes en el Ártico ha sido el menor medido que se ha tenido en los últimos 1000 años.
- El nivel del mar medio ha sufrido un aumento más veloz en el último siglo que en cualquiera de los siglos comprendidos en los últimos 3000 años. A su vez, el mar se ha calentado más rápidamente en este último siglo que desde la última transición de la desglaciación (es decir, desde hace unos 11000 años).

Se tiene certeza de que **las actividades del ser humano desencadenan alteraciones dentro de los fenómenos meteorológicos y en los fenómenos climáticos extremos** en cualquier parte del mundo. De hecho, desde la publicación del IE5 hasta hoy en día, ha seguido aumentando la convicción de que hay cada vez más fenómenos extremos y que están sufriendo severos cambios (en cuanto a fenómenos extremos nos referimos a las precipitaciones muy intensas, las épocas de sequía o las olas de calor).

- Es evidente que cada vez se produzcan más olas de calor, además del aumento de su intensidad desde el 1950. A la par se tiene que las olas de frío son cada vez menos habituales y con una intensidad que va disminuyendo con el paso del tiempo. Debemos tener en cuenta que es altamente probable que estos episodios de olas de calor tan intensas son debidos principalmente a la acción del ser humano, ya que sin ella es muy probable que no se hubieran producido. Además, la frecuencia de olas de calor marinas han sufrido un aumento de casi el doble desde el año 1980.
- Como ya hemos mencionado, hemos tenido un aumento de, tanto la frecuencia como de la intensidad de las precipitaciones desde el 1950, siendo otra vez el cambio climático originado por el ser humano su principal impulsor. También dicho cambio climático ha generado el aumento de sequías agrícolas a causa de la evapotranspiración (la pérdida directa de la humedad en superficie) de la superficie terrestre.

- Tenemos una notoria merma de las precipitaciones en el monzón global en las superficies continentales desde el 1950 al 1980. Como causa principal de dicho fenómeno tenemos las emisiones de aerosoles a la atmósfera en el hemisferio norte, pero ha sido debido a su vez al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero y a la propia variación interna del sistema. En ciertas partes del mundo, como en África occidental, tenemos una compensación del aumento de las precipitaciones del monzón (causadas por los gases de efecto invernadero emitidos) con la disminución de dichas precipitaciones debido al enfriamiento de la atmósfera (causado por los aerosoles emitidos) durante el siglo XX. Sin embargo, a partir del 1980 tenemos un mayor aumento de las precipitaciones debido a que el enfriamiento que causan los aerosoles no supera al efecto que genera la concentración de gases de efecto invernadero.
- Hemos tenido un aumento de los ciclones tropicales en los últimos 40 años, el cual no puede explicarse únicamente basándonos en la variabilidad interna. Estudios indican que la actividad humana toma parte en este aumento, haciendo que haya precipitaciones más intensas asociadas a dichos ciclones.
- Claramente, desde el 1950 tenemos la certeza que la actividad humana ha causado que sucedan una mayor cantidad de fenómenos extremos.

Conocer mejor la naturaleza de los procesos climáticos, estudiando las certezas de los datos paleoclimáticos y entender cómo responde el sistema al aumento del forzamiento radiativo nos ayudará a tener una mejor **evaluación de la sensibilidad climática en equilibrio de 3°C**. La sensibilidad climática se suele expresar como el cambio de la temperatura asociado con la duplicación de la concentración del dióxido de carbono que hay en la atmósfera.

- Partimos de que en 2019 el forzamiento radiativo generado por el ser humano fue de $2,72 \text{ W m}^{-2}$, y que comparándolo con el año 1750 dicho forzamiento ha causado el calentamiento climático. Como ya mencionamos, este calentamiento se debe principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero, y no es tal el calentamiento debido al enfriamiento que causa la emisión de aerosoles. Desde la publicación del IE5, el forzamiento ha aumentado $0,43 \text{ W m}^{-2}$ (un 19%), y de ese aumento, $0,34 \text{ W m}^{-2}$ son debidos al aumento de la emisión de los gases de efecto invernadero de 2011. Por suerte, gracias al entendimiento científico de estos efectos y al intento de mitigarlos, se ha conseguido que desde 2011 el aumento no haya sido tan pronunciado.
- El calentamiento del mar acaecido significa un 91% de todo el calentamiento del sistema climático. Por otra parte, el calentamiento continental, la disminución de las capas de hielo y el aumento de la temperatura de la atmósfera representan únicamente el 5%, el 3% y el 1% sobrantes, respectivamente.
- La expansión térmica a causa del calentamiento climático ha contribuido en un 50% en el aumento del nivel medio del mar, la disminución del hielo en los glaciares fue en un 22%, en

los mantos de hielo en un 20%, y las alteraciones del almacenamiento terrestre de agua en un 8%, entre el 1971 y el 2018. Además, la mencionada pérdida de los mantos de hielo fue la principal causa del aumento del nivel del mar entre los años 2006 y el 2018.

4.2. Impactos humanos más notables en el sistema climático.

Como bien sabemos y hemos visto, el ser humano y sus acciones tienen un gran impacto en el cambio climático, el cual es cada vez más pronunciado (basado en [28]). Ya en el segundo informe presentado en 1996 por el IPCC se concluyó con que “*el balance de la evidencia sugiere que existe una influencia humana perceptible en el clima global*”. Con las posteriores evaluaciones del IPCC se fue observando un fortalecimiento de la influencia del ser humano en el cambio climático. Con el quinto informe se llegó a la conclusión de que la influencia humana dentro del sistema climático era clara, debido al aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, al forzamiento radiativo positivo, el claro calentamiento global y gracias a la comprensión física del sistema climático. Ya hemos visto a lo largo de este capítulo como la acción del ser humano perjudica al sistema climático, pero vamos a resumir un poco cómo ha llegado a afectar mediante indicadores a gran escala del cambio climático, con la síntesis de registros paleolíticos y demás observaciones.

Es inequívoco que la influencia del ser humano ha causado un calentamiento de la atmósfera, del océano y de la tierra desde la época preindustrial. Combinando todas las evidencias habidas en los cambios del sistema climático aumenta el nivel de confianza en la atribución del cambio climático observado a la influencia del ser humano, reduciéndose así las incertidumbres asociadas a las evaluaciones en las que se atribuye el cambio climático a variables individuales. Los indicadores a gran escala del cambio climático de la atmósfera, el océano, la criósfera y de la superficie terrestre nos muestran respuestas claras a la influencia humana. A su vez, estos indicadores se corresponden con las simulaciones de modelos y los conocimientos físicos del sistema climático.

La gran mayoría de los indicadores a gran escala del cambio climático han mejorado notablemente su precisión a la hora de simular el clima medio reciente. Si que es verdad que se siguen manteniendo ciertas diferencias con las observaciones, como por ejemplo en la predicción de los patrones regionales de precipitación.

Ya analizamos previamente el cambio climático en diferentes partes del sistema climático y como la acción del ser humano influye, pero vamos a repasar cómo afecta la influencia del ser humano en: La atmósfera y la superficie, La criósfera, El océano y La biosfera.

- Influencia en la atmósfera y en la superficie:

El rango probable de calentamiento producido directamente por el ser humano en la temperatura media global del aire en superficie (TMGAS) del 2010 al 2019 con respecto al calentamiento del 1850 al 1900 es de 0,8°C a 1,3°C superior. Debemos tener en cuenta que el calentamiento atribuible a los forzamientos

naturales es solo de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. La mejor estimación que se tiene del calentamiento inducido por el hombre es de $1,07^{\circ}\text{C}$. Los posibles rangos del calentamiento de la TMGAS y el calentamiento de la temperatura media global de la superficie (TMGS) son idénticos. Se ha de decir que sigue siendo incierto atribuir el calentamiento observando a forzamientos antropogénicos específicos. De estos forzamientos se estima que el de la emisión de gases de efecto invernadero aumentó la TMGAS entre $1,0^{\circ}\text{C}$ y $2,0^{\circ}\text{C}$, mientras que otros forzamientos antropogénicos como la emisión de aerosoles redujeron la TMGAS en $0,0^{\circ}\text{C}$ y $0,8^{\circ}\text{C}$. Hay una gran seguridad en que el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero de origen antropogénico hayan sido el principal impulsor del calentamiento troposférico, ciñéndonos a las observaciones satelitales exhaustivas del 1979. Por otra parte, es muy probable que el agotamiento del ozono estratosférico inducido por el ser humano sea el principal impulsor del enfriamiento producido en la estratosfera inferior.

Se llegó a producir una tasa más lenta del aumento de la TMGS entre el 1998 y el 2012 en comparación con el periodo entre el 1951 y el 2012, pero esto fue únicamente un evento temporal que vino seguido de un fuerte aumento de la TMGS. La variabilidad interna, particularmente la variabilidad decenal del Pacífico, y las variaciones en los forzamientos volcánicos y solares compensan en parte la tendencia antropogénica del calentamiento en superficie del 1998 al 2012. La temperatura del océano a nivel global siguió calentándose durante ese periodo, lo que nos demuestra la evidencia de un calentamiento continuo de todo el sistema climático. Desde el 2012, la TMGS ha seguido calentándose fuertemente, siendo los últimos 5 años (2016-2020) el periodo de cinco años más cálido en el registro instrumental desde al menos el 1850.

Es bastante probable que la influencia del ser humano haya contribuido a la humectación de la troposfera superior desde el 1979. A su vez, es probable que también contribuyera en el aumento global de la humedad específica superficial anual y a la disminución de la humedad relativa superficial sobre los continentes del hemisferio norte de latitud media durante el verano.

También es altamente probable que la actividad del ser humano haya contribuido a los cambios observados en las precipitaciones a gran escala desde mediados del siglo XX. Los estudios de atribución realizados refuerzan los hallazgos previos de un aumento detectable de las precipitaciones en latitudes medias y altas del hemisferio norte. A su vez, la influencia humana ha fortalecido el contraste de la precipitación media zonal entre los trópicos húmedos y los subtrópicos secos. Por otra parte, la emisión antropogénica de aerosoles contribuyó a que las precipitaciones monzónicas de verano a nivel mundial disminuyeran entre el 1950 y el 1980. Hay un nivel de confianza medio de que el ser humano haya contribuido a los aumentos de las precipitaciones de verano en el hemisferio sur en latitudes altas y a la disminución en latitudes medias desde el 1979.

El forzamiento de los gases de efecto invernadero inducido por el hombre es el principal impulsor de los cambios observados en los extremos cálidos y fríos a escala global. A esto también se le atribuye la intensificación observada de las precipitaciones fuertes en las últimas décadas en todo el mundo.

Las acciones del ser humano han podido llegar a contribuir en la expansión hacia los polos de la celda de Hadley en el hemisferio sur desde el 1980, aunque dicha expansión está dentro del rango de variabilidad interna.

- **Influencia en la criósfera:**

Hay una gran confianza en que el forzamiento antropogénico, más concretamente el causado por el aumento de los gases de efecto invernadero, haya sido el principal impulsor de la pérdida de hielo en el mar Ártico desde finales del 1970. Por otra parte, la emisión humana de aerosoles ha compensado gran parte de la pérdida de hielo del mar Ártico desde el 1950. Por otra parte, los modelos climáticos globales generalmente no son capaces de capturar el pequeño aumento observado en la extensión del hielo marino antártico durante la era de los satélites, y hay poca fiabilidad en atribuir las causas de dicho cambio.

Es bastante probable que la influencia del ser humano haya contribuido en las reducciones observadas en la capa de nieve primaveral del hemisferio norte desde el 1950. A su vez, es altamente probable que seamos los principales impulsores del reciente retroceso global de los glaciares. A esto se le suma el derretimiento superficial observado de la capa de hielo de Groenlandia durante las últimas dos décadas. Sin embargo, hay una evidencia limitada de que la influencia humana contribuya en el balance de masa de la capa de hielo antártica a través de cambios en la descarga de hielo.

- **Influencia en el océano:**

Los estudios y simulaciones indican que la influencia del ser humano ha sido muy probablemente el principal impulsor del aumento de la temperatura del océano observado desde la década del 1970. Ya con el sexto informe del IPCC se tiene una mejor consistencia entre las estimaciones observadas recientes y las simulaciones de modelos de cambios en los 2 primeros kilómetros de profundidad del océano.

También se tiene una confianza alta en que el hombre ha contribuido a los cambios observados en la salinidad del océano cerca de la superficie y bajo la superficie desde mediados del siglo XX. El patrón de cambio que se ha observado es el de regiones frescas que se vuelven más frescas y regiones saladas que se vuelven más saladas. Los cambios en el ciclo del agua atmosférica coincidente y los cambios de los flujos establecidos entre el océano y la atmósfera son los principales impulsores de los cambios de salinidad. Ambos cambios son asociados a su vez a la acción del ser humano.

Si combinamos las contribuciones atribuibles de los glaciares, el balance de masa de la capa de hielo en superficie y la expansión térmica, es altamente probable que las acciones antropogénicas sean las principales impulsoras del aumento del nivel medio global del mar desde el 1971. Es muy probable que la influencia humana haya sido el principal impulsor del aumento del nivel medio termoestérico (relativo a los cambios en la temperatura climática) del mar observado desde el 1970.

Si bien las observaciones muestran que la Circulación Meridional de Vuelco del Atlántico (componente zonalmente integrado de las corrientes superficiales y profundas en el océano Atlántico) se ha debilitado desde el 2000 hasta el 2010, y que la celda de vuelco superior del Océano Austral se ha fortalecido desde el 1990, los registros de observación son demasiado cortos para determinar las contribuciones relativas de la variabilidad interna, el forzamiento natural y el antropogénico a estos cambios.

- **Influencia en la biosfera:**

El principal impulsor del aumento observado en la amplitud del ciclo estacional del dióxido de carbono atmosférico es la fertilización mejorada del crecimiento de las plantas por la creciente concentración de dióxido de carbono atmosférico. Sin embargo, existe poca confianza en que esta fertilización con dióxido de carbono haya sido también el principal impulsor del reverdecimiento observado.

La absorción del dióxido de carbono antropogénico fue el principal impulsor de la acidificación observada en la superficie global del océano. El aumento observado en la concentración de dióxido de carbono del Atlántico norte subtropical y ecuatorial desde el 2000 está probablemente asociado con un aumento en la temperatura del océano, una respuesta que es consistente con el debilitamiento esperado del sumidero de carbono del océano con el calentamiento. Existe un grado de confianza medio en que la desoxigenación en la parte más superficial del océano es debida a las acciones del ser humano.

4.3. El cambio climático y la tierra.

Pasemos ahora a centrarnos en **El cambio climático y la tierra** [26], tema que girará en torno al cambio climático, la desertificación, la degradación y gestión sostenible de las tierras, los flujos de los gases de efecto invernadero en ecosistemas y la seguridad alimentaria. Nos centraremos en esta parte del informe en hablar sobre los efectos del calentamiento global sobre las personas, la tierra y el clima.

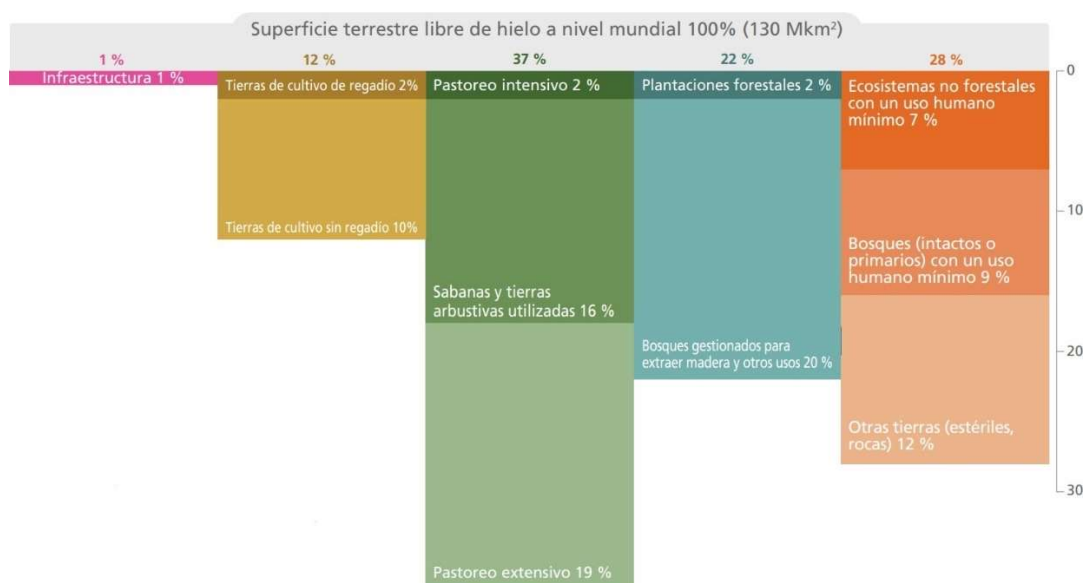


Figura 11: Representación del uso global de la tierra. [26]

La figura anterior nos ayuda a entender un poco mejor cómo funciona la distribución del uso de la tierra. Nos muestra los porcentajes de los distintos usos de la superficie terrestre libre de hielo a nivel mundial, mostrándonos la intensidad del uso de la tierra en diferentes zonas y sectores.

Como bien sabemos, **la tierra significa el principio fundamental para el sustento y bienestar de los seres humanos, por ser capaz de suministrarnos alimentos, agua dulce y una cantidad incontable de servicios ecosistémicos.** La actividad del ser humano llega a repercutir en más del 70% de toda la superficie global sin presencia de hielo. A su vez, la tierra cumple una importante función dentro del sistema climático.

- De toda la producción primaria neta potencial que la tierra proporciona (nos referimos a la cantidad de carbono acumulado a raíz de la fotosíntesis menos la cantidad que se pierde mediante la respiración de las propias plantas durante un periodo determinado que se mantendría si la tierra no se utilizase) el ser humano emplea entre un tercio y un cuarto para alimentos, madera, fibra, piensos y energía. A su vez, la tierra cumple otras muchas funciones y satisface múltiples servicios ecosistémicos.
- Como vimos al inicio de este trabajo, la tierra desempeña una importante función dentro del intercambio de energía, aerosoles y agua entre la atmósfera y la superficie de la Tierra, por ser esta una fuente y un sumidero de gases de efecto invernadero. Los ecosistemas y la biodiversidad que encontramos son altamente sensibles frente al cambio climático que estamos sufriendo, y una gestión sostenible de las tierras podría ayudar a paliar los efectos que trae consigo el cambio climático.
- Desde el 1961 los suministros de aceites y de carnes se han duplicado, aparte de que un 25% de todos los alimentos que se producen son desperdiciados. Ambas condiciones están asociadas a la emisión de gases de efecto invernadero adicionales.
- De toda la superficie de tierra que no presenta hielo, aproximadamente un cuarto sufre la degradación causada por las actividades antropogénicas. A parte, la tasa de erosión del suelo de campos agrícolas es altamente superior a la tasa de formación de dicho suelo. Además, la extensión de las zonas áridas va aumentando con el paso de los años.

La temperatura del aire presente en superficie ha llegado a aumentar casi el doble que la media de la temperatura global desde la época preindustrial. Por supuesto, el cambio climático ha contribuido a esto, como también ha provocado una degradación de la seguridad alimentaria y de los ecosistemas de la Tierra, un aumento de la desertificación y el empeoramiento de las tierras.

- El calentamiento de la superficie terrestre del 2006 hasta el 2015 fue 1,53°C más caliente que el calentamiento acontecido del 1850 al 1900, y la temperatura media global aumentó a su vez en 0,87°C comparando ambos periodos.

- Dicho calentamiento ha acrecentado los fenómenos que están relacionados con las temperaturas altas, tales como las olas de calor, el aumento de las sequías y las precipitaciones fuertes.
- Las imágenes obtenidas mediante los satélites nos indican que en los últimos 30 años ha habido un reverdecimiento de la vegetación en ciertas zonas del planeta debido a periodos de crecimiento extensos, a la deposición del nitrógeno, la gestión de las tierras y a la fertilización carbónica. No obstante, otras zonas se han vuelto más oscuras debido al estrés hídrico.
- Hemos tenido un aumento de las tormentas de polvo por las alteraciones que ha sufrido el uso de las tierras, repercutiendo negativamente en la salud de los seres humanos.
- En las zonas áridas ha habido una tendencia a la desertificación debido al aumento de las temperaturas y la carencia de precipitaciones.
- El calentamiento global causa el aumento de los procesos que degeneran la superficie de la tierra. A su vez, ha dado lugar a que las zonas áridas hayan ampliado en su extensión y que las zonas polares hayan disminuido, afectando intensamente a los seres vivos presentes en dichas zonas.

Todas las actividades que se encuentran relacionadas con el AFOLU (agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra) son responsables del 13% de las emisiones de dióxido de carbono, del 44% del metano y del 81% del óxido nítrico de los gases emitidos por la actividad antropogénica. Esto significa un 23% de todas las emisiones de origen humano de gases de efecto invernadero.

Los cambios que va sufriendo la tierra, tanto por causa del cambio climático como por el uso que se hace de ella, repercuten en el clima. Estos cambios producidos son capaces de aumentar o disminuir el calentamiento de ciertas regiones, así como variar cada cuanto suceden y con qué intensidad suceden los fenómenos meteorológicos extremos.

El cambio climático es responsable de generar ciertas tensiones en la tierra que causan el aumento de los riesgos que ya existen para la biodiversidad, para la salud humana y para los medios de conservación del ecosistema. Además, se prevé que en todos los posibles futuros de las emisiones de los gases de efecto invernadero, tendremos un aumento considerable de los impactos en la tierra.

Como bien sabemos, la intensidad de los riesgos que acarrea el cambio climático va a depender tanto de la cantidad de calentamiento, como de la evolución de las poblaciones y del consumo, la producción, el desarrollo tecnológico y la gestión de las tierras. Por tanto, si se consiguen tomar medidas con respecto a estos temas, podremos disminuir la cantidad e intensidad de los riesgos que trae consigo el cambio climático.

4.4. El océano y la criósfera en un clima cambiante.

Todos los seres humanos dependemos, de forma tanto directa como indirecta, del agua presente en los océanos y/o criósfera para poder vivir. Por eso debemos considerar la importancia de **El océano y la criósfera en un clima cambiante** [27], ya que cualquier cambio en ellos nos afecta directamente a la

alta mayoría de seres vivos del planeta. El océano cubre el 71% de toda la superficie de la Tierra, y conforma el 97% de toda el agua del planeta. Como ya vimos en este trabajo, cuando hablamos de criósfera nos referimos a todas las componentes congeladas del planeta, las cuales significan un 10% de toda la superficie. El océano y la criósfera están relacionados con todas las partes del sistema climático mediante los intercambios de energía, agua y carbono de los que ya se ha hablado. Por tanto, los cambios dentro del sistema climático les afectaran de igual modo que al resto de componentes, teniendo como respuestas esperadas las retroalimentaciones climáticas, los umbrales de cambios abruptos y la irreversibilidad.

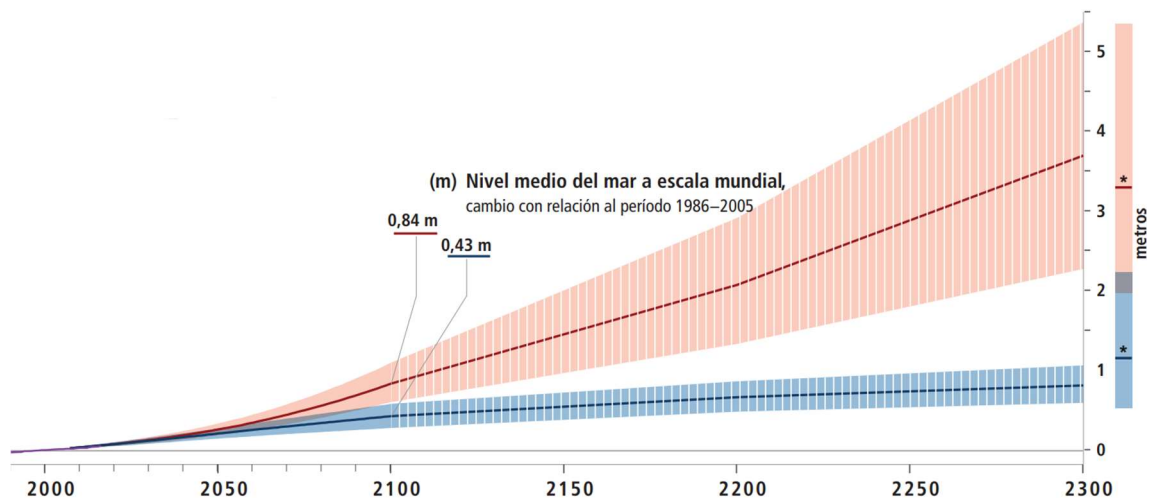


Figura 12: Representación del aumento del nivel del mar. En azul se representan los cambios futuros proyectados en escenarios de bajas emisiones de GEI. En rojo tenemos representados los cambios futuros en escenarios de altas emisiones de GEI. [27]

Como podemos apreciar por la figura anterior, hay una gran diferencia en la proyección de la subida del nivel del mar en función de la emisión de GEI. Como veremos a lo largo de este apartado, la acción antropogénica tiene una gran relación con la subida del nivel del mar. Por tanto, una buena toma de medidas contra la subida del mar hoy puede tener un gran impacto favorable para el futuro.

El océano y la criósfera desempeñan importantísimas funciones dentro del sistema climático, tales como: absorben y distribuyen el dióxido de carbono (emitido tanto de forma natural como antropogénica) así como el calor en la atmósfera, sostienen los ecosistemas, se encargan de suministrar alimentos y agua, son esenciales para todo lo relacionado con las energías renovables, generan múltiples beneficios en la salud de los humanos y en su bienestar, así como en el comercio, transporte y turismo.

Vamos a centrarnos en **los cambios físicos que se han llegado a observar en el océano y la criósfera ante el cambio climático.**

Como bien sabemos, tenemos una intensa disminución de la extensión de la criósfera debido al cambio climático, basada en la desaparición de gran cantidad de masa en los glaciares y mantos de hielo del planeta, una disminución en los mantos de nieve y una merma de la densidad y superficie del hielo

marino presente en el Ártico, así como una subida de temperaturas en el permafrost (capa de suelo terrestre que se haya permanentemente congelado).

Tenemos claramente un calentamiento ininterrumpido de los océanos desde el 1970, ya que se han encargado de absorber el 90% de la superabundancia de calor en el sistema climático. El ritmo al que se calientan los océanos actualmente es el doble del ritmo que tenían en el año 1993. También, la regularidad de las olas de calor marinas es actualmente el doble que la que había en el 1982, y su intensidad no hace más que aumentar. Por haber más dióxido de carbono en la atmósfera, los océanos han aumentado su ritmo de absorción de este, lo que ha propiciado la acidificación de su superficie. A su vez, se está produciendo una desaparición del oxígeno en el primer kilómetro de profundidad del mar.

Como bien sabemos, el nivel del mar medio a escala global no hace más que aumentar, y además el ritmo al que va aumentando es cada vez mayor, relacionado directamente con el ritmo de derretimiento de todas las masas y mantos de hielo en el planeta junto con la expansión térmica del mar. Al aumentar el nivel del mar, todos los fenómenos extremos relacionados con el mar y, que involucran a su vez a los vientos tropicales o las fuertes precipitaciones, aumentan su intensidad y frecuencia. La pérdida de masa del manto de hielo en la Antártida del 2007 al 2016 fue el triple que la que hubo desde el 1997 al 2006, y en Groenlandia fue el doble en el mismo periodo.

Con todos los cambios que se han ido produciendo en el océano y en la criósfera tenemos una serie de impactos directos en los ecosistemas y en las personas:

- **Efectos causados en ecosistemas:**

Todos los cambios producidos por el cambio climático en el océano y la criósfera han afectado notoriamente tanto a las especies como a los ecosistemas terrestres y a los de agua dulce. Los más afectados por estos cambios son los que encontramos en las zonas polares y las de alta montaña, ya que estas regiones han sufrido la aparición de tierra por efecto del deshielo y las alteraciones de los mantos de nieve. Esto ha producido que las especies de estas zonas hayan alterado sus actividades estacionales y hayan variado sus poblaciones y su distribución.

Desde el 1950, múltiples especies marinas han ido sufriendo alteraciones en las áreas de distribución y en sus actividades relacionadas a la estacionalidad, como efecto del calentamiento del mar, la variación biogeoquímica y la mencionada pérdida de oxígeno, entre muchas otras. Todo esto ha alterado drásticamente a la producción de biomasa de estos ecosistemas. A su vez, al alterar las actividades de las especies dentro de un ecosistema (considerando cambios en la forma en la que las especies se relacionan con otras y consigo mismas), se desencadena una serie de impactos en la propia estructura y en el funcionamiento del ecosistema.

Los ecosistemas que encontramos en las zonas costeras se ven altamente afectados por el aumento de la temperatura de los océanos, con la intensificación de las olas de calor marinas, la acidificación de las

aguas y la merma de oxígeno entre muchas otras. Tenemos infiltraciones de agua salada en estuarios por la subida del nivel del mar, lo que hace que las especies marinas hayan tenido que redistribuirse aguas arriba por el acortamiento de sus hábitats. También tenemos la pérdida de los organismos inmóviles calcificadores (como los moluscos y corales) en los arrecifes de coral o en las costas rocosas, por el aumento de la temperatura y la acidificación. Hay una degeneración clara de los arrecifes desde el 1997, teniendo estos una regeneración muy lenta (precisando de más de 15 años).

- **Efectos causados en personas y en servicios ecosistémicos:**

Tenemos una serie de impactos negativos en la seguridad de los alimentos, en los recursos hídricos, en la calidad de las aguas, en los medios de subsistencia y en la salud y el bienestar debido a la pérdida de superficie de la criósfera, del Ártico y de las zonas de alta montaña, desde el siglo XX. Además, estos impactos no han afectado de manera uniforme, sino que ha hay una distribución desigual en la magnitud de los impactos, afectando principalmente a los pueblos indígenas. En los últimos años, debido a los cambios de la criósfera y el aumento del crecimiento demográfico y turístico, ha aumentado la vulnerabilidad de los humanos y las infraestructuras a los peligros naturales. Los cambios producidos por el cambio climático en la nieve y en los glaciares ha hecho que se produzcan notables alteraciones en la cuantía de los recursos hídricos en las cuencas fluviales que se alimentan de estos.

Al producirse cambios en los mares que afectan a los ecosistemas marinos dependiendo de la región en la que nos encontremos, es difícil estimar el resultado neto de estos cambios. Por ejemplo, se tiene en cuenta que ha habido tanto resultados positivos como negativos para la seguridad alimentaria relacionada con la pesca y en los medios de subsistencia. Sin embargo, para los pueblos indígenas y las regiones dependientes de la pesca han sufrido consecuencias negativas. Para los servicios ecosistémicos tenemos más de lo mismo, ya que aparecen respuestas adversas para la salud y el bienestar. Como consecuencia del calentamiento de las aguas, la falta de oxígeno y la acidificación ha habido un incremento de la proliferación de algas perjudiciales, repercutiendo directamente en la seguridad alimentaria.

Hay un gran impacto en las comunidades costeras por el cambio climático, acrecentando el riesgo al que están expuestas frente a ciclones tropicales, la rápida subida del nivel del mar, las inundaciones que conlleva dicha subida y las olas de calor marinas.

4.5. El calentamiento global de 1,5°C.

Pasemos ahora a analizar el **Calentamiento global de 1,5°C** [25]. En este informe especial del IPCC se habla acerca de los impactos que conlleva el aumento de 1,5°C con respecto a los niveles que había en la época preindustrial, así como las trayectorias que deberían seguir las emisiones de los gases de efecto

invernadero, dentro del reforzamiento de la respuesta global a la peligrosidad del cambio climático, el desarrollo sostenible y los intentos por acabar con la pobreza.

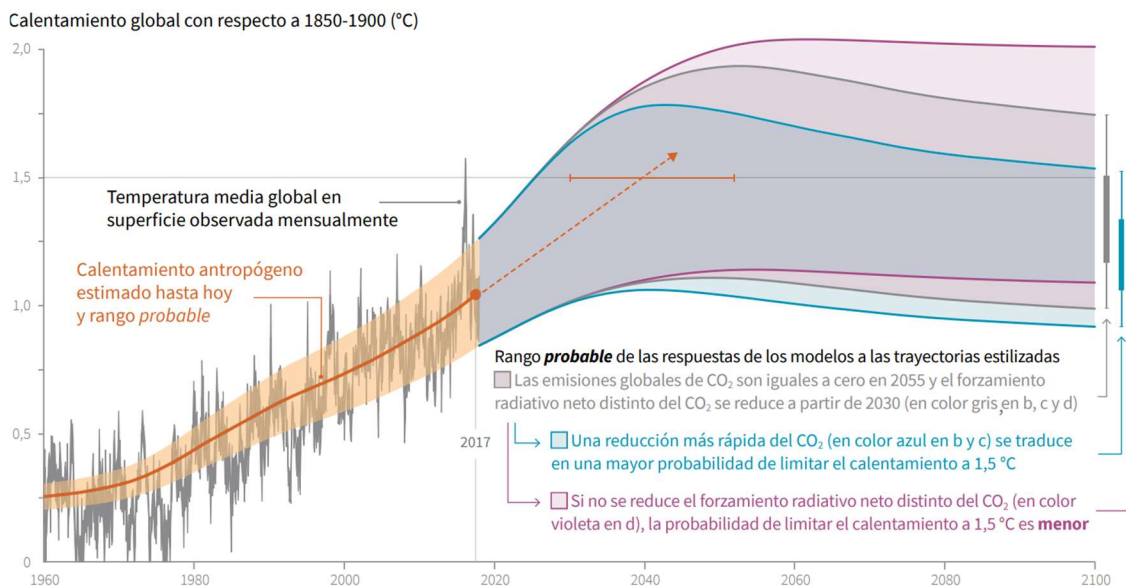


Figura 13: Representación del cambio de la temperatura global observada y las respuestas de los diferentes modelos a las trayectorias estilizadas de las emisiones antropogénicas y del forzamiento.

[25]

Comenzaremos por entender *qué es el calentamiento de 1,5°C*.

Se tiene una gran confianza en que, **desde la época preindustrial, las actividades del ser humano han contribuido a un aumento de 1,0°C a la temperatura global** (en un margen de entre 0,8°C y 1,2°C). Los estudios sobre el calentamiento del clima nos indican que entre 2030 y 2052 se llegará a un calentamiento global de 1,5°C si se mantiene la dinámica que llevamos hasta el momento.

- Tuvimos un calentamiento global de la superficie del 2006 al 2015 de 0,87°C más que el calentamiento producido entre el 1850 y el 1900. Tenemos un calentamiento global causado por las actividades humanas de 0,2°C por cada 10 años, debido tanto a las emisiones del pasado como a las actuales.
- Se está comenzando a tener en múltiples regiones un calentamiento mayor al calentamiento promedio mundial de cada año.
- Existe una relación entre el calentamiento y los fenómenos climáticos y meteorológicos extremos, ya que en épocas en las que se tuvo un calentamiento global de 0,5°C dichos fenómenos tuvieron una mayor frecuencia e intensidad.

El calentamiento climático global debido a las emisiones de las actividades humanas acontecidas desde el periodo preindustrial hasta hoy en día tendrá una duración de siglos a milenios, llegando a generar cambios climáticos a lo largo del tiempo. Sin embargo, dichas emisiones no serán por si solas las causantes del calentamiento de 1,5°C.

- Se sabe que todas las emisiones generadas por la actividad humana no serán capaces a superar un calentamiento global de 0,5°C, por lo menos en un plazo de 20 o 30 años.
- Cabe tener en cuenta que el calentamiento global causado por el ser humano a largo plazo se podría detener únicamente si lográsemos llegar a mantener emisiones globales de dióxido de carbono iguales a 0 (únicamente las de origen antropógeno). A largo plazo, para evitar el calentamiento causado a su vez por la propia retroalimentación terrestre y por la acidificación inversa de los océanos, se necesitaría conservar emisiones globales netas negativas de dióxido de carbono, lo que nos llevaría a su vez a aminorar la subida del nivel del mar.

Obviamente **tenemos una serie de riesgos relacionados con el clima con el aumento de la temperatura global en 1,5°C para los sistemas naturales y para los humanos** en comparación con los que tenemos actualmente, pero estos riesgos serían menores para un calentamiento de 2°C. Cabe decir que la magnitud de los riesgos depende de factores tales como el ritmo del calentamiento, la ubicación geográfica y de las opciones de adaptación y disminución que se tomen contra dicho calentamiento.

- El calentamiento global actual ya ha generado grandes impactos en los sistemas naturales y humanos, cambiando los ecosistemas, así como los servicios que proveían.
- Los riesgos que puedan suceder dependen directamente del ritmo del calentamiento, de su máximo y de su duración. Además, los riesgos serán superiores si el calentamiento global supera los 1,5°C antes de volver a alcanzar los 1,5°C en 2100 que si el calentamiento alcanza progresivamente los 1,5°C y se logra estabilizar.

Pasemos ahora a hablar del ***cambio climático que se prevé para el futuro, sus impactos potenciales y los riesgos que conlleva.***

Los modelos climáticos actuales nos permiten predecir las grandes diferencias que se producirán en las características del clima de cada región en el caso del aumento de la temperatura global de 1,5°C, así como para un calentamiento de 2°C. Principalmente se tendrá un aumento de la temperatura en gran parte de las regiones, episodios de extremo calor en zonas habitadas, aumento de la intensidad de las precipitaciones, así como el aumento de las sequías.

- El aumento de 1,5°C de la temperatura global con respecto a los niveles de la época preindustrial conllevará el aumento de las temperaturas extremas en muchas zonas, el acrecentamiento de la intensidad, frecuencia y cantidad de las precipitaciones en varias zonas y el aumento de la frecuencia y de la intensidad de las sequías.
- Se tiene en cuenta que en las temperaturas extremas sufrirán un mayor aumento que la temperatura global media de la superficie terrestre. Se estima que, en las latitudes medias del globo, para un calentamiento de 1,5°C, los días de mucho calor las temperaturas podrían

aumentar hasta 3°C, y para las noches de mucho frío las temperaturas podrían llegar a aumentar hasta en 4,5°C.

- Para el caso de las precipitaciones intensas se ha calculado que para el aumento de 2°C de la temperatura global sucederán más habitualmente y con mayor intensidad con respecto a un aumento de 1,5°C. Acorde a las precipitaciones intensas, se darán una mayor cantidad de inundaciones de superficie terrestre para el calentamiento de 2°C que para el de 1,5°C. Para el caso de las sequías y falta de lluvias se darán más habitualmente con el calentamiento de 2°C que con el calentamiento de 1,5°C.

Los estudios nos indican que **para el año 2100 tendremos un aumento del nivel del mar medio global de 0,1 metros menor para un calentamiento global de 1,5°C que para el calentamiento global de 2°C**. Como ya sabemos, el aumento del mar perjudica fuertemente a las islas pequeñas, a los deltas y a las costas de poca altitud, y con un aumento del mar más lento surge la oportunidad de anticiparse a los hechos.

- Los modelos del aumento del nivel del mar prevén que para el 2100 el mar habrá aumentado su nivel en un rango de 0,26 metros a 0,77 metros con el calentamiento de 1,5°C, lo que resulta 0,1 metros menos que lo previsto para el calentamiento de 2°C. Estos 0,1 metros significan una diferencia de hasta 10 millones de seres humanos que no sufrirán los riesgos asociados al aumento del nivel del mar.
- Pese a que el calentamiento global se mantenga en los 1,5°C, el nivel del mar seguirá aumentando después del 2100, ya que tenemos la inestabilidad de las capas de hielo marino en la Antártida y se perderá irreversiblemente la capa de hielo que hay en Groenlandia.

Para un calentamiento global de 1,5°C tendremos un menor efecto sobre la superficie de la Tierra, en cuanto a impactos en ecosistemas y biodiversidad (como la extinción de especies) que, para el calentamiento de 2°C, y se podrán conservar una mayor cantidad de servicios ecosistémicos.

- Para un calentamiento de 1,5°C sufrirán una pérdida de más de la mitad de su alcance geográfico el 4% de los vertebrados, el 8% de las plantas y el 6% de los insectos. Sin embargo, para el calentamiento de 2°C lo sufrirán el 8% de los vertebrados, el 16% de las plantas y el 18 % de los insectos.
- El calentamiento de 1,5°C puede generar que hasta el 4% (entre el 2% y el 7%) de la superficie altere el tipo de ecosistema que tiene a otro distinto, mientras que para un calentamiento de 2°C se trataría de un 13% (entre el 8% y el 20%) de la superficie terrestre. Por tanto, puede llegar a haber una diferencia de casi el 50% de superficie que se puede salvar.

Se tiene constancia de que **la limitación del calentamiento global a 1,5°C en vez de a 2°C conllevaría una disminución del aumento de la temperatura del mar, de su acidificación y la merma de su**

nivel de oxígeno. Por tanto, con este límite disminuirán los riesgos de la biodiversidad, de la pesca y de los ecosistemas marinos.

- El calentamiento de 1,5°C traerá consigo la alteración de la distribución de las especies marinas, así como también un aumento en los daños de muchos de los ecosistemas marinos, la disminución de recursos en las costas y una reducción en la pesca. Estos daños serán aún mayores para el calentamiento global de 2°C.
- Con el calentamiento de 1,5°C, la acidificación del mar (a causa del aumento del dióxido de carbono) afectará al crecimiento, desarrollo y supervivencia de muchas especies. Dicha acidificación será aún mayor para el calentamiento de 2°C.

Con el aumento de la temperatura global en 1,5°C **tendremos un aumento en los riesgos ligados al clima para la salud, los medios de vida, los suministros de agua, el crecimiento económico y la seguridad alimentaria y humana**, cuyo riesgo será mayor con un calentamiento de 2°C.

Vamos a hablar ligeramente de *las trayectorias de emisiones y de las transiciones sistémicas coherentes para el calentamiento global de 1,5°C y el de 2°C*.

Las trayectorias de los modelos obtenidos para el caso en el que el calentamiento global no llega a alcanzar 1,5°C, o lo excede ligeramente, las emisiones globales de dióxido de carbono de origen humano deberían disminuir un 45% hasta el 2030 (tomando como nivel inicial de dióxido de carbono el de 2010), y llegar a ser cero en el 2050. En el caso de considerar un calentamiento de 2°C, las emisiones globales de dióxido de carbono deberían disminuir un 25% hasta el 2030 y ser cero en el 2070. Como se puede observar, se necesitan reducciones drásticas en las emisiones de dióxido de carbono para poder ceñirse a las trayectorias enunciadas. Para ello, necesitaremos aplicar transiciones rápidas dentro de los sistemas: energético, urbano y de infraestructuras, industrial y terrestre. Todo esto implica una gran reducción de las emisiones en cada uno de los sectores mencionados, considerar una gran cantidad de opciones de mitigación y, lo más importante, al fin y al cabo, un significativo aumento de las inversiones en todos estos ámbitos.

5. Simulación en programa EN-ROADS relacionada con la influencia del ser humano en el sistema climático.

Ahora que hemos analizado bien a fondo el cambio climático y la influencia del ser humano en ella, vamos a emplear un programa interactivo llamado “EN-ROADS” de *Climate Interactive*, con el cual podemos simular como variará la temperatura de cara al futuro en función del uso de los suministros eléctricos, del transporte, de los edificios e industria, del crecimiento poblacional, de las emisiones de uso de suelo e industria y de la remoción del carbono.

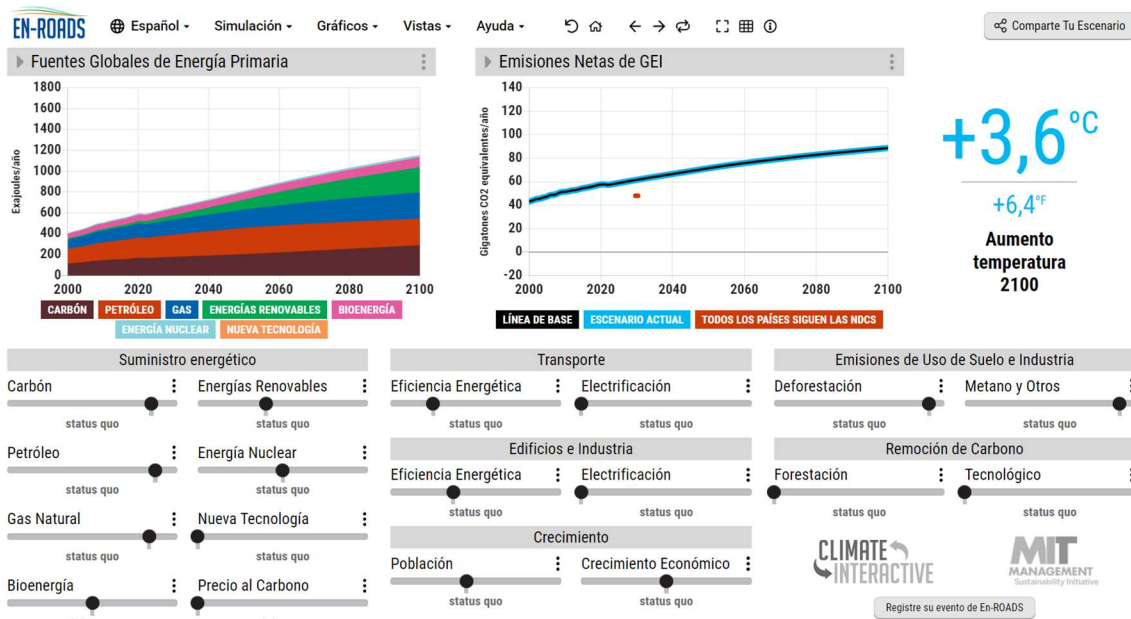


Figura 14: Interfaz interactiva del simulador “EN-ROADS”.

Estos son todos los parámetros que nos muestra la página junto con las variables que nos permite modificar la página.

Dentro del simulador tenemos la opción de analizar diversos tipos de gráficos, tales como el Total de Demanda energética de las Fuentes Globales de Energía Primaria, las Emisiones Netas de gases de efecto invernadero (GEI), el Cambio de Temperatura y la Subida del Nivel del Mar entre otras. A su vez, dentro de cada una de las variables que podemos ir modificando, encontramos dentro de ellas un mayor despliegue de características con las que podemos ir jugando, como podemos apreciar a continuación:

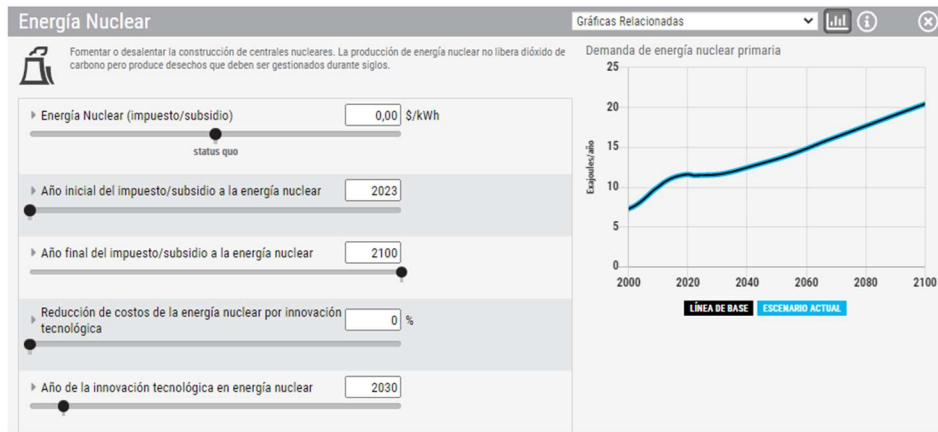


Figura 15: Despliegue de las variables de la Energía Nuclear.

Al variar la barra que encontramos dentro del Suministro energético de la Energía Nuclear, lo que estamos haciendo es decidir la cuantía de impuestos que recibiría la producción de dicha energía, pudiendo hacer que se impongan altos impuestos (lo que no fomentaría su uso) o hacer que dicha energía sea altamente subsidiada. No solo con eso, como podemos apreciar en la figura anterior, podemos llegar a modificar otros parámetros dentro de la propia Energía Nuclear, como decidir en qué medida queremos que se impulse la Energía Nuclear y a partir de qué año, así como decidir la cantidad de reducción de los costes de la energía nuclear debido a la innovación tecnológica.

- ▶ Totales de Demanda de Energía Primaria
- ▶ Tipos de Demanda de Energía Primaria
- ▶ Totales de Consumo de Energía Final
- ▶ Tipos de Consumo Final de Energía
- ▶ Población & PIB
- ▶ Emisiones de CO₂
- ▶ Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
- ▶ Remociones y Uso del Suelo
- ▶ Financiero
- ▼ Impactos
 - Cambio de Temperatura
 - Concentración de CO₂
 - Concentración de Gases de Efecto Invernadero
 - Subida del Nivel del Mar
 - Subida del Nivel del Mar—Mapa de Riesgo de Inundación
 - Población Expuesta al Aumento del Nivel del Mar
 - Acidificación de los Océanos
 - Contaminación del Aire por Energía
 - Contaminación del Aire por Energía por Fuente—Área
 - Probabilidad de Verano Sin Hielo en el Ártico
 - Disminución del Rendimiento de Cultivos por la Temperatura
 - Especies que Pierden Más del 50% de su Rango Climático
 - Muertes Adicionales por Calor Extremo
- ▶ Comparación de Modelos—Histórico

Figura 16: Ejemplos de gráficos que nos provee el programa.

Como podemos apreciar, con la gran cantidad de gráficos que podemos emplear, junto con todas las posibilidades de variación de los parámetros tenemos una infinidad de posibles escenarios. Debido a

esto, consideraremos únicamente generar un par de escenarios afines a todo lo que hemos visto a lo largo de este trabajo. Debemos tener en cuenta que el programa nos va a permitir simular la evolución de nuestros escenarios hasta el año 2100.

Los aspectos más importantes para tener en cuenta frente al cambio climático serían el **Cambio de Temperatura**, la **Concentración de CO₂**, la **Concentración de Gases de Efecto Invernadero**, las **Emisiones Netas de GEI**, así como analizar también cómo evolucionarían las **Fuentes Globales de Energía Primaria** y la **Subida del Nivel del Mar**.

Pues bien, con todo lo que tenemos podemos simular varios casos característicos. Comenzaremos analizando un escenario inicial en el que se mantengan todos los parámetros en estatus quo, es decir, simulando qué sucedería globalmente si mantenemos todas las medidas contra el cambio climático como las tenemos hasta hoy en día y ni las endurecemos ni las debilitamos. Seguidamente intentaremos simular unas condiciones en las que lleguemos a tener un aumento de la temperatura de entre unos 1,5°C y unos 2°C. Para ello intentaremos generar un caso más o menos realista, imponiendo unas medidas acordes a la realidad que vivimos, porque recordemos que el mundo no es perfecto y, pese a que el cambio climático es un tema muy recurrente y supone un gran problema global, no se están llegando a tomar medidas lo suficientemente recias frente a ello. Finalmente generaremos dos escenarios extremos, en los que llevaremos al límite las medidas frente al cambio climático, tanto para bien como para mal.

Todas estas simulaciones nos ayudarán a entender cómo ciertas acciones del ser humano llegan a influir en el clima de una manera bastante visual, y que nos ayudará a entender cuáles son los sectores que mayor influencia pueden tener sobre el clima.

5.1. Caso 1: Mantenemos las medidas frente al cambio climático intactas.

Como podremos observar en todos los gráficos, nos va a aparecer siempre la “Línea de base” que corresponde a la predicción de “EN-ROADS” de la evolución hasta el 2100 sin cambiar las medidas frente al cambio climático. En el Caso 1 nos va a coincidir siempre la “Línea de base” con la de “Escenario actual”, ya que es en este primer caso en el que consideramos que mantenemos las medidas intactas hasta el 2100.

A su vez, al ser este el primer caso que vamos a exponer, realizaremos un análisis detallado de qué es lo que estamos viendo realmente en cada uno de los gráficos.

Una vez tenemos nuestro caso creado, el simulador nos ofrece una tabla con una serie de resultados sobre la simulación, donde se incluyen el Incremento de la temperatura, la Concentración de CO₂ en 2100, el Aumento del Nivel del Mar en 2100 y las Emisiones acumuladas evitadas de CO₂ en 2100.

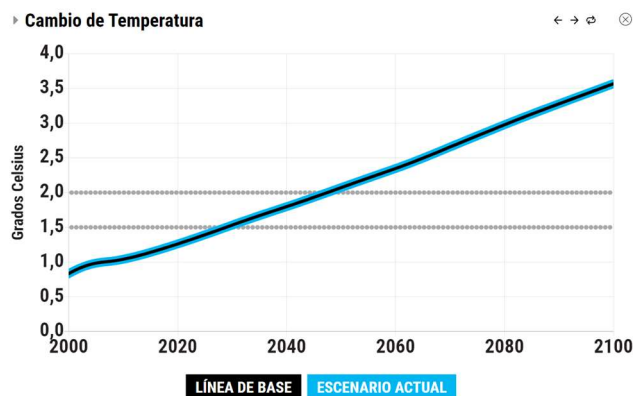


Gráfico 1: Representación del Cambio de Temperatura para el Caso 1.

En este gráfico se representa el cambio de la temperatura, representándose en el eje de las ordenadas la temperatura en Grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), y en el eje de las abscisas los años. Como se puede apreciar tenemos dos líneas de puntos para el caso de $1,5^{\circ}\text{C}$ y para los 2°C . Estos dos valores vienen indicados en el gráfico porque, como ya hemos visto, son dos temperaturas bastante importantes a la hora de hablar del cambio climático. Esto se debe a que son las temperaturas que se tomaron como objetivo en el Acuerdo Climático de París (se propuso limitar el calentamiento climático muy por debajo de los 2°C y aspirar a llegar a limitarlo a $1,5^{\circ}\text{C}$), y a su vez ya conocemos cuales son los efectos que causarían tanto el aumento de $1,5^{\circ}\text{C}$ como el de 2°C .

A la hora de analizar el gráfico vemos que hay un aumento progresivo de la temperatura, como era de esperar. Se puede apreciar que para el año 2030 se llega a alcanzar un aumento de $1,5^{\circ}\text{C}$ (lo cual ya vimos que es lo que predicen los científicos en el capítulo “*Calentamiento global de $1,5^{\circ}\text{C}$* ”), y que para el año 2050 se llega a alcanzar el aumento de 2°C .

Finalmente, para el año 2100 llegamos a tener un aumento de $3,6^{\circ}\text{C}$, el cual es un valor claramente descabellado, sobre todo una vez se tiene noción de todos los aspectos perjudiciales que lleva consigo el aumento de únicamente $1,5^{\circ}\text{C}$, como pudimos ver en el apartado 4.5. *El Calentamiento Global de $1,5^{\circ}\text{C}$* .

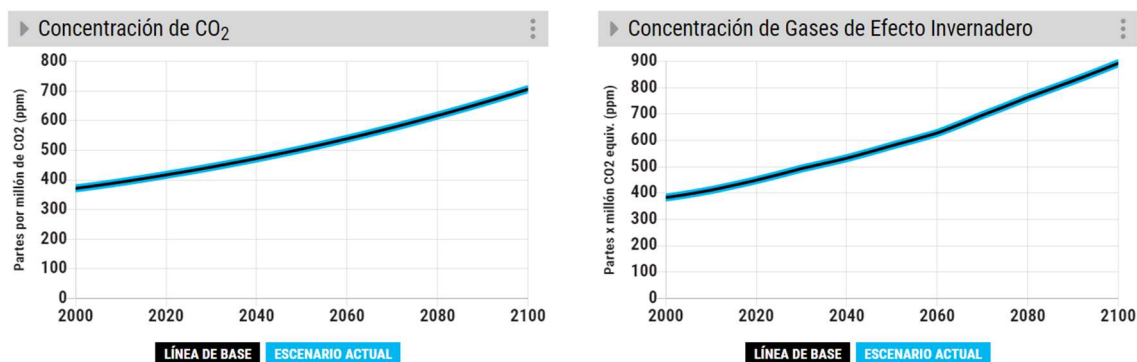


Gráfico 2: Representaciones de la Concentración de CO_2 y la Concentración de Gases de Efecto Invernadero para el Caso 1.

Representaremos estos dos gráficos juntos ya que están altamente relacionados, y nos es más fácil analizarlos a los dos juntos.

El gráfico de la concentración de CO_2 representa la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera en partes por millón (ppm). Dicha concentración refleja la acumulación atmosférica tanto de las fuentes de CO_2 de origen humano (por ejemplo, la quema de combustibles fósiles) como las provenientes de las fuentes naturales (por ejemplo, la emisión de CO_2 de los océanos). Debemos tener en cuenta para cada uno de los casos que, para llegar a no tener unos grandes impactos en el sistema climático, se necesita limitar el aumento de la temperatura a no más de $2^\circ C$ respecto a los niveles preindustriales. Esto significa que la concentración de CO_2 en la atmósfera no debe superar las 350-450 ppm. Dentro de este gráfico se llega a los resultados de que para el año 2032 se alcanza una concentración de 448,82 ppm, y para el 2033 ya se superan las 450 ppm, alcanzando 451,67 ppm. Esto significa que, sin ningún cambio en las medidas contra el cambio climático, ya se superaría para el año 2033 el límite que se impuso. Para el año 2100 se llegaría a la desorbitada cantidad de 706,27 ppm de CO_2 en la atmósfera, lo cual sería casi duplicar los niveles del 2020.

El gráfico de la concentración de gases de efecto invernadero representa la concentración total de gases de efecto invernadero en partes por millón (ppm) de equivalentes de CO_2 en la atmósfera. Las contribuciones de los GEI provienen de la producción de energía de CO_2 , de las fuentes de uso de la tierra de CO_2 , de óxido nitroso (N_2O), del metano (CH_4) y de los gases fluorados. Los equivalentes de CO_2 se calculan a partir del potencial de calentamiento global a 100 años de cada gas a efectos de información. A su vez, en este gráfico, el forzamiento radiativo de cada gas se modela explícitamente en función de su ciclo atmosférico y su eficiencia radiativa. Como podemos observar, es un gráfico bastante similar al de la concentración de CO_2 , ya que, como ya se ha mencionado, se está considerando la concentración de equivalentes de CO_2 . Cuando hablamos de equivalentes de CO_2 nos estamos refiriendo a la medida de la huella de carbono, que es el nombre dado a la totalidad de la emisión de los GEI. La masa de estos gases emitidos se mide por su equivalencia en CO_2 , lo que viene a ser que todos los gases distintos al CO_2 son convertidos a su valor equivalente en CO_2 .

Por tanto, obviamente ambos gráficos seguirán una tendencia similar por el hecho de que el gráfico de la derecha contiene al de la izquierda, solo que se le añaden las concentraciones del resto de GEI. Comparándola con la del CO_2 tenemos que para el año 2032 se alcanza una concentración de 500,76 ppm de CO_2 equivalente, y para el año 2100 se alcanzarán 892,97 ppm de CO_2 equivalente.

Por tanto, del total de emisiones de GEI a la atmósfera, el 79,09% corresponden al CO_2 para el año 2100.

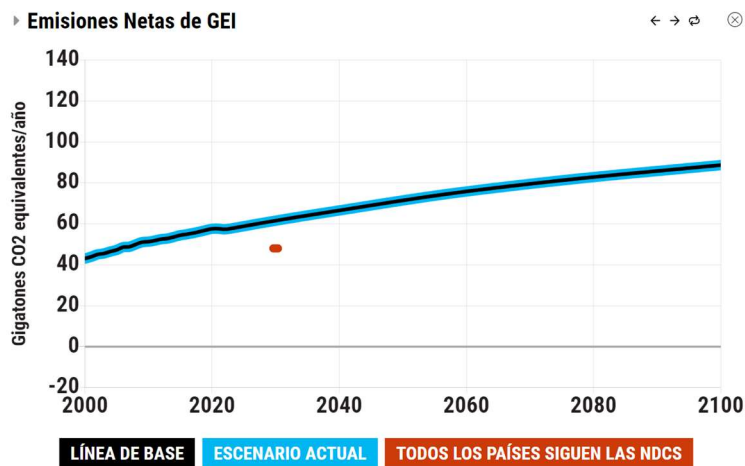


Gráfico 3: Representación de las Emisiones Netas de Gases de Efecto Invernadero para el Caso 1.

El gráfico anterior representa las emisiones mundiales netas de GEI, medidas en Gigatoneladas de equivalentes de CO_2 por año. Lo que vemos representado es el total de las emisiones brutas de GEI menos el total de la eliminación de CO_2 antropogénico neto.

Como podemos apreciar en el gráfico, nos aparece un punto naranja, el cual viene marcado por “todos los países siguen las NDCS”. Este punto viene a significar el nivel aproximado de emisiones en 2030 si todos los países de la ONU siguieran sus compromisos de emisiones presentados a la UNFCCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) de sus NDCS (contribuciones determinadas a nivel nacional).

Una vez sabido esto, se puede observar claramente que, si no se toman medidas contra el cambio climático, y siendo más concretos, las presentadas por la UNFCCC, se puede apreciar que las emisiones netas de GEI superarán con creces el límite impuesto para el 2030. Para hacernos a la idea, si los países de la ONU siguen sus NDCS pactadas, para el 2030 deberíamos tener unas 48 Gigatoneladas de CO_2 equivalentes. Sin embargo, si no se toman dichas medidas, para el 2030 llegaríamos a tener un total de 61,54 Gigatoneladas de CO_2 equivalentes emitidas. A su vez, siguiendo esta tendencia, para el año 2100 llegaríamos a una emisión de 88,67 Gigatoneladas de CO_2 equivalentes.

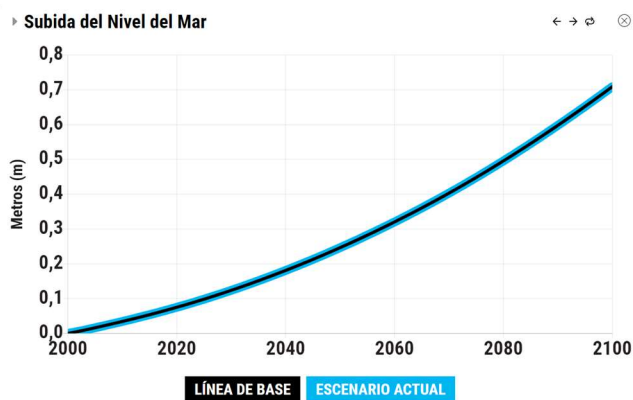


Gráfico 4: Representación de la Subida del Nivel del Mar para el Caso 1.

El gráfico de la subida del nivel del mar representa el promedio de aumento global del nivel del mar por encima del nivel en el año 2000 medido en metros (m). Ya hemos visto en este trabajo que hay múltiples componentes que contribuyen al aumento del nivel del mar, pero vamos a recordar los principales, que son: la expansión térmica del agua, el deshielo de los glaciares, el derretimiento de la capa de hielo en la Antártida y Groenlandia, y los cambios inducidos por el hombre en el almacenamiento de agua en la tierra (ya que se llega a recoger más agua subterránea que termina en los océanos que la que se encuentra en reservorios artificiales).

La propia expansión térmica del agua es el principal impulsor del aumento del nivel del mar observado en las últimas décadas. A medida que el planeta aumenta su temperatura, el agua del mar se va volviendo cada vez menos densa y por tanto va expandiéndose. La estimación del aumento del nivel del mar que emplea este simulador se basa en la relación histórica que hay entre la temperatura global del planeta y el aumento del nivel del mar. Teniendo en cuenta que las capas de hielo pueden llegar a derretirse más rápido que en el pasado, el programa parte con la siguiente suposición:



Figura 17: Suposición de “EN-ROADS” de la contribución del deshielo de la Antártida y de Groenlandia en el aumento del nivel del mar.

Como podemos ver, se nos permite variar dicho valor, ya que la contribución de este deshielo aumenta gradualmente al aumentar la temperatura global, pero mantendremos los valores iniciales por ser estos bastante neutrales. Por tanto, analizando el gráfico podemos apreciar que para el año 2030 tendremos un aumento del nivel del mar con respecto al año 2000 de 0,12 metros y para el año 2100 tendremos un aumento de 0,71 metros respecto al 2000.

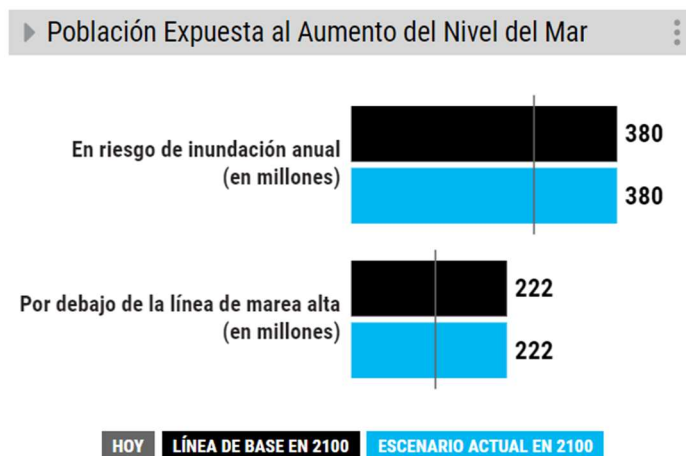


Gráfico 5: Representación de la Población expuesta al Aumento del Nivel del Mar para el Caso 1.

Gracias a la ayuda del gráfico anterior podemos entender cómo llega a afectar el aumento del nivel del mar de nuestra simulación a nivel global.

Como podemos apreciar, se nos muestra el riesgo de inundación anual, el cual representa el número de personas que viven en terrenos que están por debajo de los niveles de inundación anual. Por tanto, las viviendas y los negocios que encontramos en estos terrenos pueden estar expuestos a inundaciones cada año. La inundación real puede ser menor debido a los diques y a otras medidas de protección frente a inundaciones.

Por debajo de la línea de marea alta representa el número de personas que viven en terrenos que están por debajo de la línea de marea alta. Las viviendas y negocios de estas zonas se inundarían constantemente. Los terrenos realmente inundados pueden ser menores por las protecciones de las que ya hemos hablado en el riesgo de inundación anual.

Como imaginaremos, el aumento del nivel del mar y sus impactos varían mucho en función de la región. Las zonas bajas con alta densidad de población y bajos ingresos son las más vulnerables frente a esto. A su vez, la subida puede agravar también la gentrificación, ya que los residentes más ricos se retiran de las propiedades frente al mar a terrenos más altos en el interior, desplazando a las personas que residen allí debido a que no pueden llegar a permitirse el consiguiente aumento del coste de la vivienda y de la vida. Por tanto, recordemos que es una simulación y que no es precisa al 100%, pero nos ayuda a hacernos a la idea de los resultados del cambio climático a largo plazo.

Como podemos apreciar, el número de personas en riesgo de inundación anual hoy en día es de 260 millones de personas, mientras que la estimación para el 2100 será de un total de 380 millones de personas. Recordemos que en el mundo somos unas 7,8 miles de millones de personas, por lo que hoy en día un 3,33% de la población mundial se encuentra en riesgo de inundación anual.

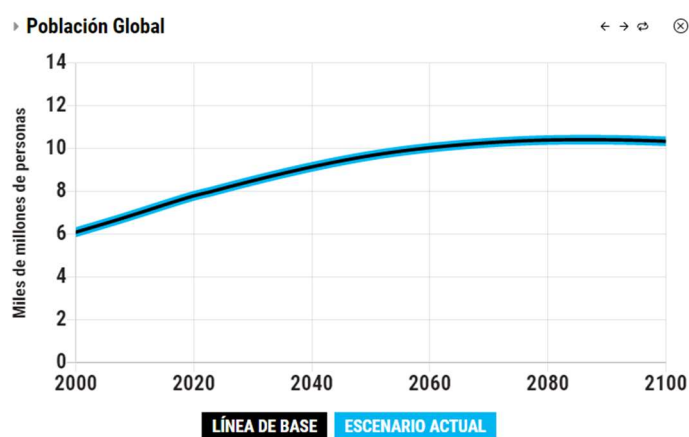


Gráfico 6: Representación de la Población Global para el Caso 1.

Recurriendo a “EN-ROADS” encontramos un gráfico que nos proporciona una estimación del aumento de la población global medida en miles de millones de personas. Pues bien, para el año 2100 se llegará

a un total de 10,35 miles de millones que, si lo comparamos con el número de personas en riesgo de inundación anual, tendríamos un 3,67% de la población en riesgo.

Por otra parte, el número de personas por debajo de la línea de marea alta es actualmente de 119 millones (esto supone un 1,53% de la población global), mientras que para el 2100 será de 222 millones (lo que supondrá un 2,14%).

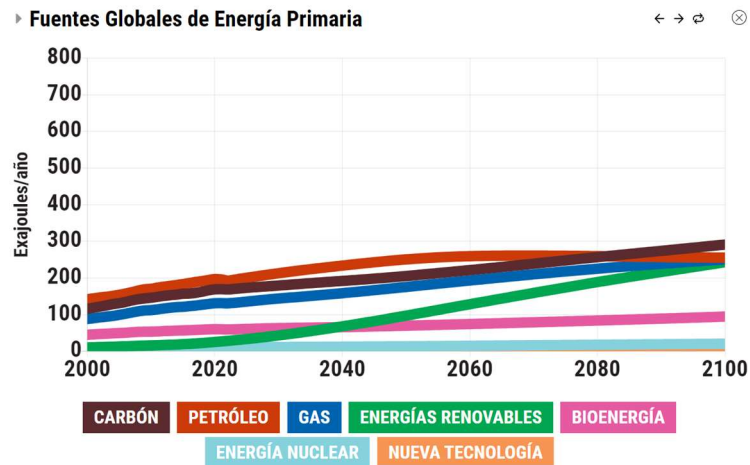


Gráfico 7: Representación de la demanda de las Fuentes Globales de Energía Primaria para el Caso 1.

Tenemos representado en el gráfico anterior la energía global total de cada fuente que se requirió para cumplir la demanda de energía global. Cuando hablamos de energía primaria nos referimos a la energía total de una fuente de energía cruda, la cual se convierte en energía consumible. Un ejemplo que nos ayudará a entender esto es la demanda del petróleo. La demanda de energía de petróleo primaria se refiere a la cantidad total de energía de petróleo crudo que es extraído, refinado y consumido.

La energía primaria es mayor que el consumo final de esta energía, porque en la demanda se incluyen las ineficacias en el procesamiento, la conversión térmica y la transmisión y distribución de estas. Como vemos en el gráfico, la demanda de la energía primaria viene medida en exajulios/año (es decir, en $Julios \cdot 10^{18}/año$) por cada fuente de energía para fuentes eléctricas y no eléctricas combinadas. Debemos tener en cuenta que, a la hora de hablar de las energías renovables, el simulador considera dentro de este grupo a la energía eólica, la solar, la hidroeléctrica y la geotérmica.

Como podemos apreciar en el gráfico, y como ya bien sabremos, la demanda del petróleo se encuentra casi la mayoría del tiempo encabezando a todo el grupo de fuentes de energía, seguido de muy cerca de la demanda de carbón y la del gas. Por otra parte, la demanda de las energías renovables, con el paso del tiempo, sufre un aumento considerable pasando prácticamente de ser nula a casi llegar a ponerse en cabeza para el 2100. Para hacernos un poco a la idea de la demanda global, vamos a comparar las diferentes demandas para el 2030 y para el 2100:

Fuente energética	Demanda (Exajulios) por año	
	2030	2100
Carbón	179.25	291.04
Petróleo	212.8	255.28
Gas	143.79	250.66
Energías renovables	43.15	242.86
Bioenergía	63.1	94.48
Energía nuclear	11.59	20.44
Nueva tecnología	0	0

Figura 18: Comparativa de demandas energéticas entre el 2030 y el 2100 del Caso 1.

Podemos apreciar que el valor de la nueva tecnología no varía de su valor nulo, debido a que es un parámetro introducido por el propio simulador que nosotros mismos podemos modificar.

Finalmente, como ya mencionamos al inicio de este caso, el simulador nos ofrece una tabla de resultados en los que nos ofrece un resumen de la simulación que hayamos generado:

Resultados

Incremento de la temperatura en 2100

3,6 °C / 6,4 °F

Concentración de CO₂ en 2100

706 ppm

Aumento del Nivel del Mar en 2100

0,7 m / 2,4 ft

Emisiones acumuladas evitadas de CO₂ en 2100

0 gigatoneladas de CO₂

Figura 19: Resultados finales obtenidos con el Caso 1.

Ya hemos analizado previamente estos resultados, a excepción de las emisiones acumuladas evitadas de CO₂ en 2100, ya que este parámetro dependerá de las modificaciones que hagamos en nuestro escenario (que recordemos que en el Caso 1 no hemos realizado ninguna).

Ahora que tenemos una idea de la evolución de los cambios en el sistema climático vamos a pasar a los siguientes casos.

5.2. Caso 2: Aumento de la temperatura entre 1,5°C y 2°C para 2100.

Como ya hemos mencionado, vamos a intentar generar un escenario en el que el aumento de la temperatura para el 2100 se encuentre entre los 1,5°C y los 2°C con respecto a los niveles preindustriales. Podemos hacernos a la idea de que el escenario que vamos a generar resultaría bastante exigente de llevar a cabo en la realidad que vivimos. Afirmamos esto porque, analizando el caso anterior en el que no realizábamos ningún cambio en las medidas contra el cambio climático, se llegaban a superar los 2°C en el 2050.

Una vez hemos conseguido generar el escenario que queríamos, comenzaremos analizando todas las medidas que se deberán tomar según nuestro escenario para lograr el objetivo propuesto.

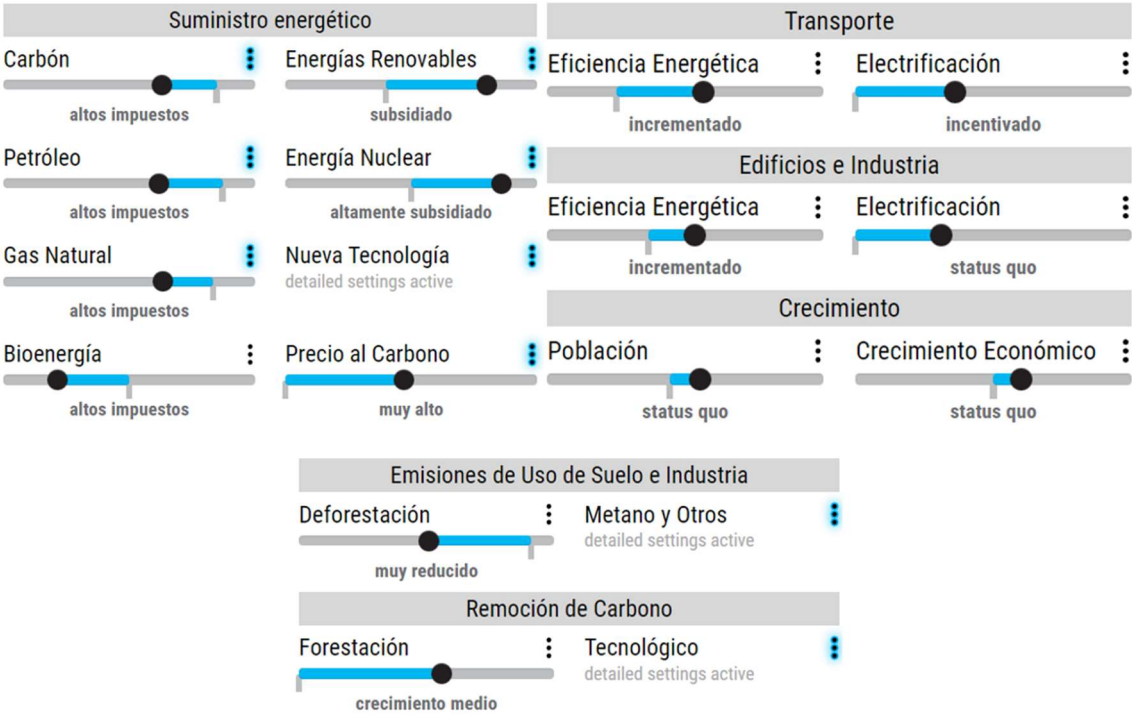


Figura 20: Total de modificaciones realizadas en el simulador para el Caso 2.

En la figura anterior podemos ver todas las modificaciones que hemos realizado en los parámetros de suministros energéticos, en el transporte, en edificios e industria, en el crecimiento, en las emisiones de uso de suelo e industria y en la remoción del carbono. El programa nos permite mover una barra para modificar a nuestro antojo cada uno de los parámetros. Como ya dijimos, dentro de categoría tenemos a su vez un despliegue de variables que podemos modificar, que encontraremos si pulsamos los 3 puntos verticales de cada parámetro. Se puede, o bien, modificar estas variables simplemente moviendo la barra que encontramos, o entrar en los 3 puntos y modificar más detalladamente estos parámetros. Podemos apreciar que algunos de los puntos se hayan con un color azul, lo que indica que hemos alterado alguno de los parámetros detallados. Veamos un ejemplo, como puede ser el suministro energético de carbón:

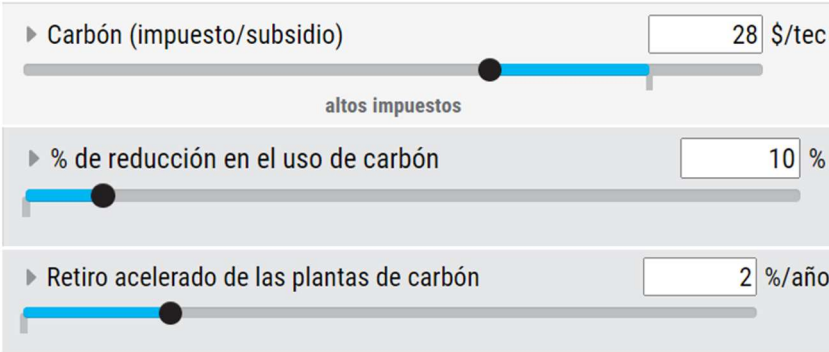


Figura 21: Detalle de los cambios realizados en el suministro energético de carbón en el Caso 2.

Como podemos apreciar por la figura anterior, no únicamente hemos alterado el impuesto que recibirá el carbón en el Caso 2, sino que también hemos variado el porcentaje de reducción en el uso de carbón y el retiro acelerado de las plantas de carbón.

Pasamos entonces a ver todas las modificaciones concretas que hemos realizado para conseguir los objetivos del Caso 2. Debemos tener en cuenta que el programa “EN-ROADS” nos permite una gran amplitud de modificaciones a la hora de generar una simulación, pero nosotros variaremos únicamente las que mayor impacto tienen dentro del sistema climático, y algunas que nos puedan llegar a llamar la atención:

Acciones

Carbón

- Carbón (impuesto/subsidio) = 28 \$/tec
- % de reducción en el uso de carbón = 10 %
- Retiro acelerado de las plantas de carbón = 2 %/año

Petróleo

- Petróleo (impuesto/subsidio) = 29 \$/bep
- % de reducción en el uso de petróleo = 10 %

Gas Natural

- Gas Natural (impuesto/subsidio) = 1,2 \$/Mpc
- % de reducción en el uso de gas = 10 %

Bioenergía

- Bioenergía (impuesto/subsidio) = 17 \$/bep

Energías Renovables

- Energía Renovable (impuesto/subsidio) = -0,02 \$/kWh
- Reducción de costos de la energía renovable por innovación tecnológica = 10 %

Energía Nuclear

- Energía Nuclear (impuesto/subsidio) = -0,05 \$/kWh
- Reducción de costos de la energía nuclear por innovación tecnológica = 10 %

Nueva Tecnología

- Año del avance en Nueva Tecnología = 2040
- Costo inicial relativo al carbón = 1,0

Precio al Carbono y Estándares de Energía

- Precio al Carbono = 118 \$/t CO2
- Años para conseguir el impuesto inicial al carbono = 30 años

Eficiencia Energética del Transporte

- Eficiencia Energética de los Nuevos Medios de Transporte = 2,4 %/año

Electrificación de Transporte

- Electrificación de nuevos medios de transporte–terrestre = 36 %
- Electrificación de nuevos medios de transporte–aéreo y marítimo = 36 %

Edificios e Industria Eficiencia Energética

- Eficiencia Energética de Nuevos Edificios e Industrias = 2,2 %/año

Electrificación de edificios e industria

- Electrificación de nuevos edificios e industrias = 31 %

Población

- Población = 10,8 mil millones en 2100 (status quo)

Crecimiento Económico

- Crecimiento económico a largo plazo (PIB por persona) = 1,7 %/año

Deforestación

- Deforestación (reducción/incremento) = -4,4 %/año

Metano & Otros Gases

- Emisiones de la agricultura y los residuos (CH₄ & N₂O) = -25 %
- Emisiones de la energía e industria (CH₄, N₂O, & gases fluorados) = -25 %
- Años para alcanzar otros objetivos de gases de efecto invernadero = 20 años
- Año de inicio de eliminación de HFC = 2060 año

Forestación

- Porcentaje de tierra disponible utilizada para reforestación = 56 %

Eliminación Tec Carbono

- Bioenergía Captura&Almacenamiento de Carbono (BECCS) (% del máximo) = 80 %
- Captura directa de aire (% del potencial máximo) = 80 %
- Mineralización mejorada (% del potencial máximo) = 80 %
- Secuestro de carbono del suelo agrícola (% del potencial máximo) = 80 %
- Biocarbón (% del potencial máximo) = 80 %

Figura 22: Total de acciones implementadas en el Caso 2.

En la figura anterior vemos todas las acciones que deberán implementarse para que nuestro pronóstico se lleve a cabo. Vamos a analizar cada una de ellas para entender lo que realmente estamos haciendo al modificarlas.

Carbón: El carbón es el combustible fósil más dañino en términos de emisiones de carbono y de contaminantes del aire que causan graves impactos en la salud. Sin embargo, es una fuente de energía dominante a nivel mundial porque es relativamente barato para minar y transportar.

- Dentro del carbón encontramos inicialmente Carbón (impuesto/subsidio). Cuando variamos este factor lo que hacemos es crear un impuesto o un subsidio en \$/tce (dólares por tonelada de carbón equivalente) a todos los productores de carbón. Un subsidio generaría una reducción del coste de la energía procedente del carbón, mientras que un impuesto aumenta el coste del carbón. Por tanto, al tener un valor positivo de 28 \$/tce significa que estamos añadiendo un impuesto a la producción de carbón.
- Seguidamente encontramos el % de reducción en el uso de carbón. Este porcentaje indica la reducción de la utilización del carbón en las plantas de procesamiento y centrales eléctricas.
- Por último, encontramos el Retiro acelerado de las plantas de carbón. Nos permite aumentar la tasa anual de cierre de las plantas de carbón utilizadas para la electricidad, por tanto, cuantas menos plantas, menor producción de carbón.

Petróleo: Como bien sabemos, el petróleo es un combustible fósil que se usa ampliamente en automóviles, barcos y aviones, así como en la industria, la calefacción y la electricidad. El acceso al petróleo genera graves conflictos y los derrames de petróleo pueden amenazar los ecosistemas y el agua.

- En el petróleo encontramos un caso similar al del carbón en Petróleo (impuesto/subsidio). En esta ocasión, el impuesto o subsidio se mide en \$/pbp (dólares por barril de petróleo)
- Encontramos también el % de reducción en el uso de petróleo. Como en el caso del carbón, nos indica la reducción del empleo del petróleo en las plantas de refinado de petróleo y las centrales eléctricas.

Gas Natural: Variamos la cantidad de perforación y la quema de gas natural para obtener energía. El gas natural es un combustible fósil que se emplea para electricidad, calefacción e industria. Al quemarlo se libera CO_2 , y si consigue fugarse al aire contiene altas cantidades de metano. A su vez, la perforación con gas natural emplea grandes cantidades de agua y puede llegar a causar contaminación.

- Dentro del gas natural encontramos un apartado similar a los dos anteriores, el de Gas Natural (impuesto/subsidio). Aquí se mide el impuesto o subsidio expresado en \$/Mpc (dólares por mil pies cúbicos) que impondremos a los productores de gas natural.
- Tenemos también el % de reducción en el uso de gas, que cumple la misma función que en los anteriores casos, pero referido al gas natural.

Bioenergía: Podemos variar el uso de árboles, desechos forestales y cultivos agrícolas para crear energía. La bioenergía es la energía producida a partir de la quema o combustión de material orgánico vivo como la madera. Hay una gran cantidad de fuentes de bioenergía, de las cuales algunas pueden ser sostenibles y otras pueden resultar peores que quemar carbón y comprometen la seguridad alimentaria.

- Dentro de la bioenergía hemos modificado únicamente la Bioenergía (impuesto/subsidio), el cual está medido en esta ocasión por \$/bdpe (dólares por barril de petróleo equivalente).

Energías Renovables: Se nos permite fomentar o desalentar la construcción de paneles solares, geotérmicos y turbinas eólicas, lo que nos permite producir energía con poca o ninguna emisión de CO_2 o contaminación del aire.

- Podemos observar que dentro de Energía Renovable (impuesto/subsidio) aparece un valor negativo, lo que significa que, en vez de imponer impuestos, estamos imponiendo un subsidio de 0,02 \$/kWh (dólares por kilovatios por hora). Dicho subsidio genera una reducción en el coste de la energía procedente de las energías renovables, por lo que hace que sean más atractivas para el mercado y se empleen más.
- Hallamos a su vez la Reducción de costos de la energía renovable por innovación tecnológica. Esto viene a ser el porcentaje que tendría un avance en investigación y desarrollo (I+D), lo que reduciría el coste del suministro de las energías renovables.

Energía Nuclear: Podemos fomentar o desalentar la construcción de centrales nucleares, las cuales no liberan dióxido de carbono, pero producen desechos que deben ser gestionados durante siglos.

- Inicialmente encontramos Energía Nuclear (impuesto/subsidio), que, como en el caso anterior, mide la reducción o el aumento de los impuestos de la producción de energía nuclear, medido en \$/kWh.
- Como en las energías renovables, tenemos a su vez la Reducción de costos de la energía nuclear por innovación tecnológica.

Nueva Tecnología: Simulamos el descubrimiento de una nueva fuente de electricidad barata que no emite GEI, como por ejemplo el hidrógeno verde o la fusión nuclear.

- En los parámetros de la nueva tecnología hemos optado por emplear configuraciones detalladas (como podemos apreciar en la figura 20). Estas configuraciones son el Año del avance en Nueva Tecnología (que viene a ser el año en el que queremos que se produzca el avance tecnológico, por lo que podemos realizar el avance de que se comercialice de forma subsecuente para que tenga efecto en el mercado) y el Costo inicial relativo al carbón (que es el coste inicial de la nueva energía de cero emisiones de carbono en relación con el coste del carbón, por lo que si el coste de la nueva energía es menor que el coste del carbón, habrá un aumento significativo en la demanda).

Precio al Carbono y Estándares de Energía: Nos permite establecer un precio global al carbono que hace que las fuentes de energía sean más caras dependiendo de la cantidad de CO_2 que liberen.

- El Precio al Carbono es el precio impuesto a la energía en función de la cantidad de dióxido de carbono que emite. Se emplea para simular un impuesto sobre el carbono o mercados de comercio y de derechos de emisión. Se mide en \$/t CO_2 (dólares por cada tonelada de CO_2 emitido).

- Modificamos a su vez la parte de Años para conseguir el impuesto inicial al carbono, que son los años que queremos que se tarde en alcanzar el objetivo inicial del precio de carbón.

Eficiencia Energética del Transporte: Podemos aumentar o disminuir la eficiencia energética de los vehículos, los envíos, los viajes aéreos y los sistemas de transporte. La eficiencia energética incluye cosas como automóviles híbridos, transporte público ampliado y formas en que las personas puedan moverse empleando menos energía. Adoptar medidas energéticas eficientes puede mejorar la salud pública y ahorrar dinero.

- La Eficiencia Energética de los Nuevos Medios de Transporte nos permite realizar un cambio proyectado en la cantidad de energía que emplea el transporte. Es una medida de la mejora anual de la intensidad energética de los nuevos capitales que demandan energía para el transporte, y medimos dicha mejora en %/año.

Electrificación de Transporte: Podemos aumentar la compra de nuevos automóviles, camiones, aviones y barcos eléctricos. El uso de los motores eléctricos permite reducir las emisiones de GEI, así como la contaminación del aire (si la electricidad proviene de fuentes bajas en carbono).

- La Electrificación de nuevos medios de transporte-terrestre nos permite incentivar un mandato político para que el nuevo transporte terrestre se alimente de electricidad en lugar de combustibles.
- La Electrificación de nuevos medios de transporte-aéreo y marítimo nos permite incentivar un mandato de política pública para que los nuevos medios de transportes aéreos y marítimos se alimenten de electricidad en vez de combustibles.

Edificios e Industria Eficiencia Energética: Podemos decidir cómo queremos que sea la eficiencia energética de edificios, electrodomésticos y otras máquinas. La eficiencia energética incluye cosas como construir viviendas bien aisladas, reducir la cantidad de uso de las fábricas de energía. Las prácticas energéticamente eficientes pueden llegar a ahorrar dinero mediante la disminución de necesidades de energía, como también pueden mejorar la salud de las personas en dichos edificios.

- La Eficiencia Energética de Nuevos Edificios e Industrias se refiere al cambio proyectado en la cantidad de energía empleada en los nuevos edificios, la industria, electrodomésticos y otra maquinaria. Como podemos apreciar el valor se mide en %/año, siendo la mejora anual de la intensidad energética de los nuevos edificios y la industria, debido al cambio tecnológico. Lo que estamos haciendo al incrementar este valor es aumentar las tasas de mejora de la intensidad energética media global, lo que desencadena una reducción en la demanda energética.

Electrificación de edificios e industria: Se nos permite aumentar el uso de la electricidad, en vez de emplear combustibles como el petróleo o el gas, en edificios, sistemas de calefacción y otras máquinas.

El uso de motores eléctricos ayuda a reducir las emisiones y mejorar la calidad del aire si dicha electricidad proviene de fuentes con bajas emisiones de carbono.

- Hallamos en este apartado la Electrificación de nuevos edificios e industrias, lo que nos permite aplicar una política para que la construcción de los nuevos edificios, del sector industrial y de electrodomésticos lleguen a funcionar con electricidad en lugar de combustibles.

Población: Aquí podemos asumir un mayor o menor crecimiento de la población. Ya sabemos que existe una trayectoria de crecimiento de la población, pero pasos como la educación de las mujeres y el acceso a la planificación familiar permiten retrasar el crecimiento de la población.

- Dentro de este parámetro encontramos Población (rango de los escenarios de la ONU), que nos permite establecer la población mundial dentro del rango de probabilidad del 95% que la ONU proyecta para la población mundial. Dicha estimación va a ir medida en miles de millones de personas para el año 2100.

Crecimiento Económico: Somos capaces de asumir un mayor o menor crecimiento de los bienes producidos y los servicios prestados. El crecimiento económico se mide en Producto Interno Bruto (PIB) por persona, y es un factor clave en el consumo energético. Debemos tener en cuenta que podremos modificar el crecimiento económico tanto a largo plazo como a corto plazo, teniendo unos valores iniciales de 1,5 %/año (a largo plazo) y de 2,5 %/año (a corto plazo).

Deforestación: Podemos variar la cantidad de pérdida de bosques para uso agrícola y de productos de madera. La deforestación implica la quema y eliminación de bosques para despejar la tierra para cultivos, construcciones...

- La Deforestación (reducción/incremento) indica el cambio porcentual anual (es decir, lo medimos en %/año) en las emisiones de CO_2 por el uso de tierra y forestación relativas a la línea base. Como podemos apreciar, tenemos un valor negativo, lo que indicaría una reducción de dichas emisiones.

Metano & Otros Gases: Se nos concede la oportunidad de disminuir o aumentar las emisiones del metano, el óxido nitroso y los gases fluorados. El metano es emitido principalmente por vacas, la agricultura, la perforación de gas natural y los desechos. El óxido nitroso proviene de los fertilizantes. Los gases fluorados provienen principalmente de la industria y los aires acondicionados. Aquí hemos optado por emplear una configuración detallada para ser más precisos:

- Encontramos dentro de esta configuración Emisiones de la agricultura y los residuos (CH_4 & N_2O), que indicará el porcentaje de acción máxima para reducir las fuentes agrícolas de fuentes de metano y óxido nitroso.
- Seguidamente están las Emisiones de la energía e industria (CH_4 , N_2O & gases fluorados), donde variamos el porcentaje de acción máxima para reducir estas fuentes. Afecta a su vez al

porcentaje anual de gas natural que se escapa a la atmósfera a través de la minería, producción y distribución.

- A su vez, están los Años para alcanzar los objetivos de gases de efecto invernadero, que como ya imaginamos es el tiempo que se tardará en lograr las reducciones previstas de otros GEI.
- Finalmente tenemos el Año de inicio de eliminación HFC, que es el año en el que los hidrofluorocarburos (HFC) comenzarán a ser eliminados en los nuevos bienes de capital. Debido al capital existente que emplea los HFC y al tiempo que se tarda en adaptar todos los usos existentes de los HFC, una eliminación completa llevaría varias décadas.

Forestación: Decidiremos en qué medida queremos que se planten nuevos bosques y restaurar los viejos. A medida que los árboles crecen, extraen el carbono del aire, lo que reduce la concentración de CO_2 . Por otra parte, si no se cuida dicha forestación, la reforestación a gran escala puede llegar a comprometer la biodiversidad y los derechos históricos de la tierra.

- Tenemos entonces el Porcentaje de tierra disponible utilizada para reforestación, el cual, como su propio nombre indica, será el porcentaje de tierra máxima disponible que queremos que se emplee para la silvicultura.

Eliminación Tecnológica del Carbono: Esto es la extracción del CO_2 del aire con nuevas tecnologías que mejoren las eliminaciones naturales, o que consigan secuestrar y almacenar carbono de forma manual. Las tecnologías de remoción de CO_2 incluyen: la captura directa de aire, la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono, el biocarbón y otros. La remoción de CO_2 actualmente no está muy extendida, y la mayoría de los enfoques enfrentan barreras importantes para la implementación.

- La Bioenergía Captura&Almacenamiento de Carbono (BECCS) (% del máximo) se refiere al aumento total de la eliminación de CO_2 mediante la captura y el almacenamiento del carbono de la bioenergía (BECCS). Para contribuir a la eliminación neta de carbono, la BECCS consiste en la quema de biomasa para obtener energía, la captura de las emisiones de CO_2 , el almacenamiento de las emisiones a largo plazo y la recultivación exitosa de la biomasa utilizada. La BECCS depende directamente del éxito de las nueva tecnologías y de la disponibilidad de fuentes sostenibles de biomasa.
- Hallamos también la Captura directa de aire (% del potencial máximo), que nos permite aumentar la eliminación de CO_2 a partir de la captura de aire directa (CDR). La CDR es una tecnología emergente que extrae el CO_2 del aire. Para llegar a obtener un beneficio neto de eliminación el carbono capturado debe almacenarse a largo plazo.
- La Mineralización mejorada (% del potencial máximo), es el máximo porcentaje de las tierras de cultivo que queremos que sean aptas para ser empleadas en la mineralización mejorada, conocida como erosión mejorada. Implica extraer, procesar y esparcir rocas específicas como el basalto cada año para poder así absorber CO_2 y convertirlo en minerales de carbonato.

- El Secuestro de carbono del suelo agrícola (% del potencial máximo) nos permite realizar un aumento de la eliminación de CO_2 de las prácticas para mejorar el carbono del suelo agrícola.
- Por último, el Biocarbón (% del potencial máximo) nos va a permitir aumentar la eliminación de CO_2 de los esfuerzos de biocarbón a gran escala. Recordemos que el biocarbón es materia orgánica convertida en carbón vegetal y enterrada para retener el carbono.

Como podemos ver, tenemos una infinidad de parámetros con los que podemos ir jugando para modificar nuestra simulación en función de nuestros intereses, pero esos parámetros serán los que emplearemos en todos los casos que tenemos.

Ahora que hemos visto cada uno de los cambios que hemos realizado en el Caso 2, pasamos a analizar los gráficos que resultan de dichas alteraciones.

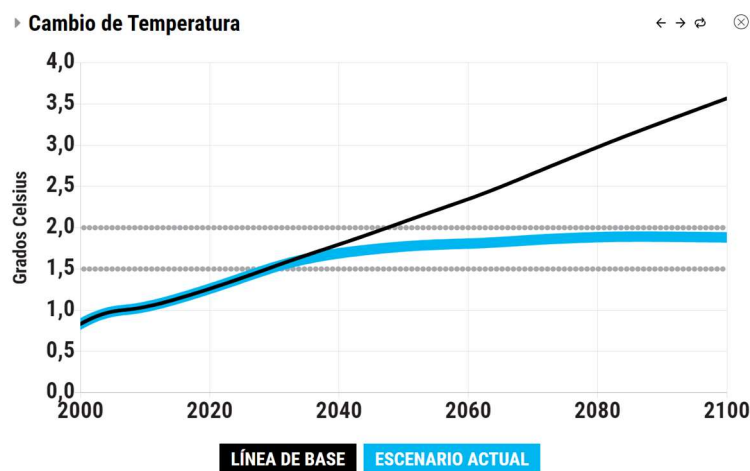


Gráfico 8: Representación del Cambio de Temperatura para el Caso 2.

Comenzaremos por analizar el cambio de temperatura del Caso 2. Como podemos apreciar en el gráfico, hemos conseguido el objetivo que nos propusimos de llegar a mantener una subida de la temperatura de entre 1,5°C y 2°C. Se consigue alcanzar un aumento de la temperatura de tan solo 1,9°C. Comparando con la línea base (es decir, con la predicción que ya vimos en el Caso 1), las curvas se separan notoriamente gracias a las modificaciones en las medidas contra el cambio climático. Cabe destacar que, de todos los parámetros que hemos modificado, los que tienen un mayor efecto en el cambio de la temperatura global, y en el resto de los gráficos que analizaremos, son los siguientes: el precio del carbono, la electrificación de edificios e industria, el crecimiento económico y el de la población, las emisiones de metano y otros gases, y la remoción de carbono tecnológico.

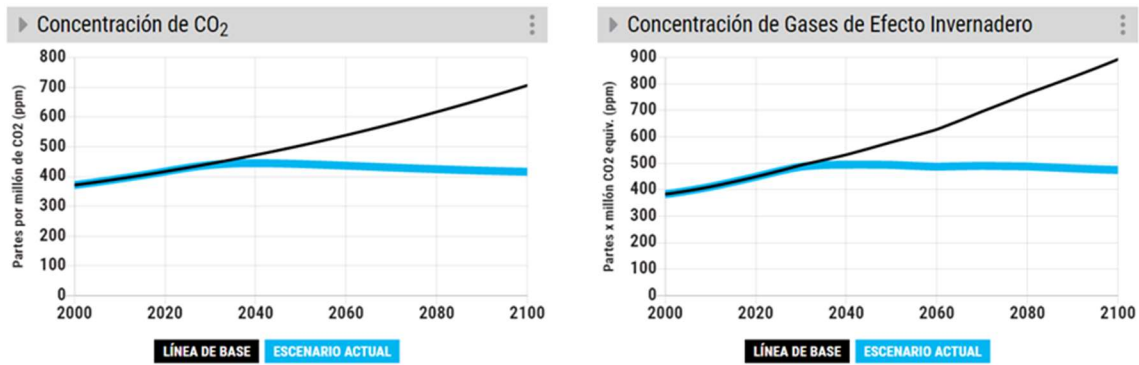


Gráfico 9: Representaciones de la Concentración de CO₂ y la Concentración de Gases de Efecto Invernadero para el Caso 2.

Tenemos en los dos gráficos anteriores las representaciones de las concentraciones de CO₂ y de todos los GEI. Como podemos apreciar, para lograr el objetivo del Caso 2 debemos conseguir una bajada significativa de la concentración de todos los GEI, llegando a tener una concentración de 414,79 ppm de CO₂ en la atmósfera y un total de 473,15 ppm de CO₂ equivalente para el año 2100. Esto viene a significar que el 88,72% de las emisiones totales de GEI son correspondientes al CO₂.

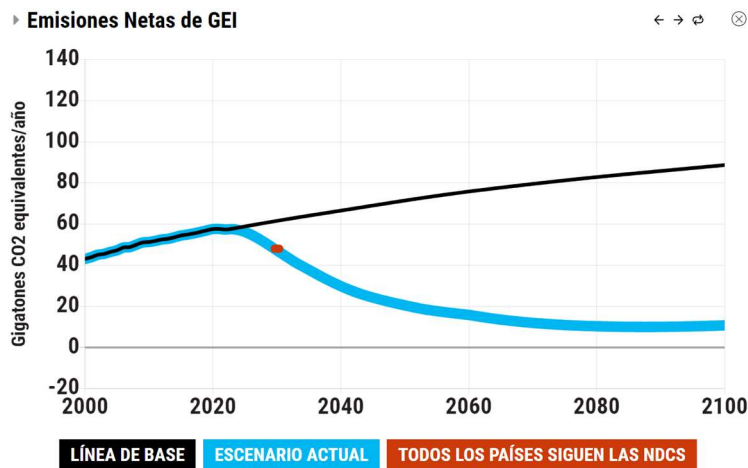


Gráfico 10: Representación de las Emisiones Netas de Gases de Efecto Invernadero para el Caso 2.

En el gráfico anterior tenemos la medición de las emisiones netas de GEI. Como podemos apreciar, con las modificaciones que hemos realizado en el Caso 2, hemos logrado seguir la tendencia de que todos los países de la ONU sigan las NDCS. Con estos cambios, para el 2100 llegaríamos a tener una emisión de 10,04 Gigatoneladas de CO₂ equivalente (recordemos que la tendencia del Caso 1 nos indicaba que para el 2100 tendríamos una emisión de 88,67 Gigatoneladas de CO₂ equivalentes).

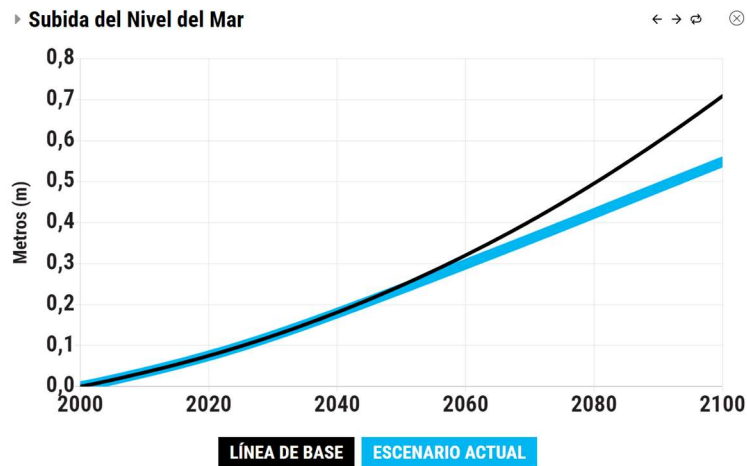


Gráfico 11: Representación de la Subida del Nivel del Mar para el Caso 2.

En el gráfico anterior podemos observar la tendencia que tendrá la subida del nivel del mar a nivel mundial. Se puede apreciar que se necesitan un par de décadas para que la tendencia del Caso 2 diverja de la del Caso 1, por lo que los cambios realizados para esta simulación no son completamente eficaces en cuanto a la disminución de la subida del nivel del mar. Comparándolas, tenemos para el Caso 1 una subida de 0,71 metros para el 2100, mientras que para el Caso 2 tendremos una subida de 0,55 metros. Vamos a analizar a continuación el impacto real de la diferencia de 0,16 metros que tenemos entre ambos casos:

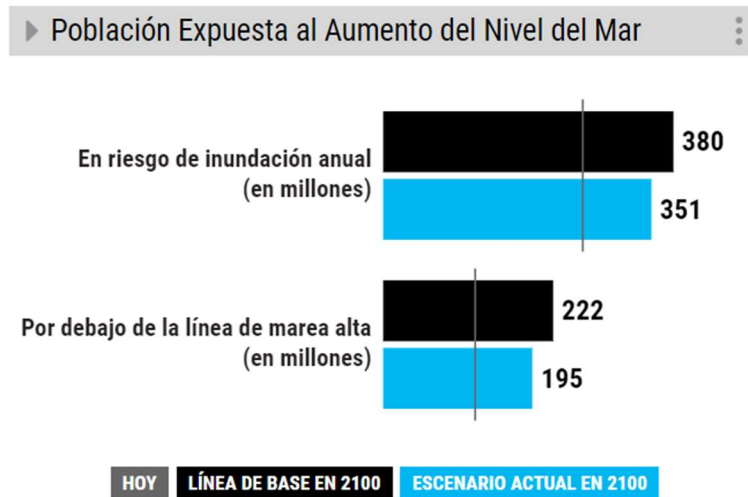


Gráfico 12: Representación de la Población expuesta al Aumento del Nivel del Mar para el Caso 2.

Como podemos apreciar en el gráfico anterior, esos 0,16 metros significan una diferencia de 29 millones de personas en riesgo de inundación anual, y 27 millones de personas por debajo de la línea de marea alta, lo cual es una diferencia claramente notable. Para poder conocer el porcentaje total de personas en riesgo de inundación anual y las que se encuentran por debajo de la línea de marea alta vamos a comprobar previamente la evolución de la población global:

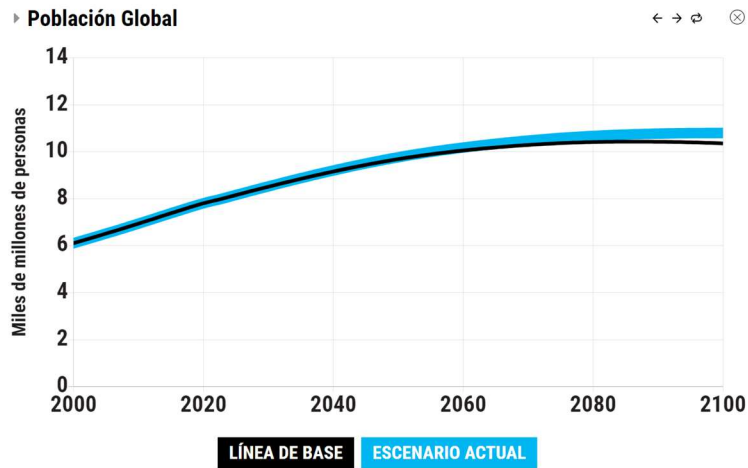


Gráfico 13: Representación de la Población Global para el Caso 2.

Apreciamos un aumento de la población en la simulación del Caso 2 para el año 2100 con respecto al Caso 1, debido a que nosotros mismos hemos estimado dicho aumento con los parámetros variables del propio simulador. Por tanto, para el año 2100 tendremos un total de población global de 10,79 miles de millones de personas.

Así que, volviendo a la población que se encuentra expuesta a la subida del nivel del mar tenemos un 3,25% de la población en riesgo de inundación anual, y un 1,81% de la población por debajo de la línea de marea alta.

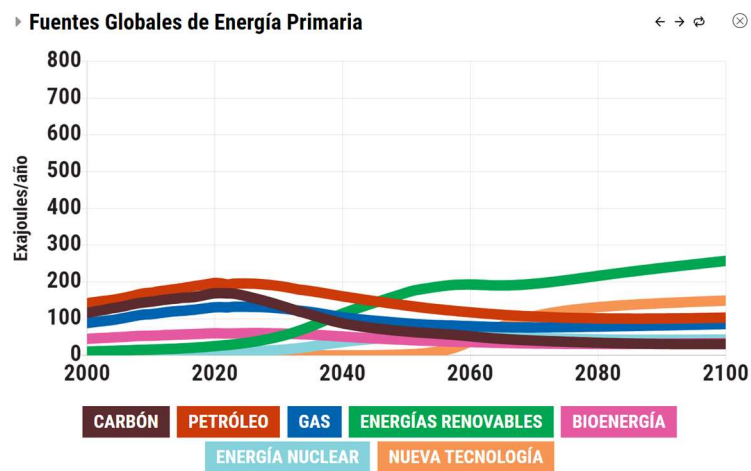


Gráfico 14: Representación de la demanda de las Fuentes Globales de Energía Primaria para el Caso 2.

Tenemos en el gráfico anterior representada la evolución de la demanda de las fuentes globales de energía primaria. Con los cambios que hemos realizado en la simulación podemos apreciar como la demanda de las fuentes más perjudiciales para el sistema climático desciende drásticamente, mientras que la demanda de las energías menos dañinas para el medio ambiente no hace más que aumentar. Vamos a comparar las diferentes demandas para el 2030 y para el 2100:

Fuente energética	Demanda (Exajulios) por año	
	2030	2100
Carbón	131.79	30.97
Petróleo	188.75	94.73
Gas	128.34	83.81
Energías renovables	50.69	261.42
Bioenergía	59.67	32.91
Energía nuclear	14.83	43.81
Nueva tecnología	0	151.58

Figura 23: Comparativa de demandas energéticas entre el 2030 y el 2100 del Caso 2.

Podemos ver que las principales fuentes de energía para el 2100 serán las procedentes de las energías renovables y la nueva tecnología para el Caso 2.

Para terminar con el Caso 2, vamos a echar un vistazo a los resultados finales obtenidos con todos los cambios que hemos introducido a la simulación:

Resultados

Incremento de la temperatura en 2100

1,9 °C / 3,4 °F

Concentración de CO₂ en 2100

416 ppm

Aumento del Nivel del Mar en 2100

0,5 m / 1,9 ft

Emisiones acumuladas evitadas de CO₂ en 2100

3.609 gigatoneladas de CO₂

Figura 24: Resultados finales obtenidos con el Caso 2.

5.3. Caso 3: Medidas extremas para evitar el cambio climático.

Como bien nos indica el propio enunciado del apartado, en el Caso 3 nos vamos a centrar en intentar imponer las medidas más extremas y beneficiosas para el sistema climático. Esto nos ayudará a ver hasta donde podríamos llegar si la población mundial se pusiera como objetivo evitar el cambio climático, y entender cómo los cambios en parámetros como la disminución de emisiones de GEI pueden ayudar a evitar el cambio climático antropogénico.

Vamos a comenzar por analizar todas las medidas impuestas en nuestra simulación:

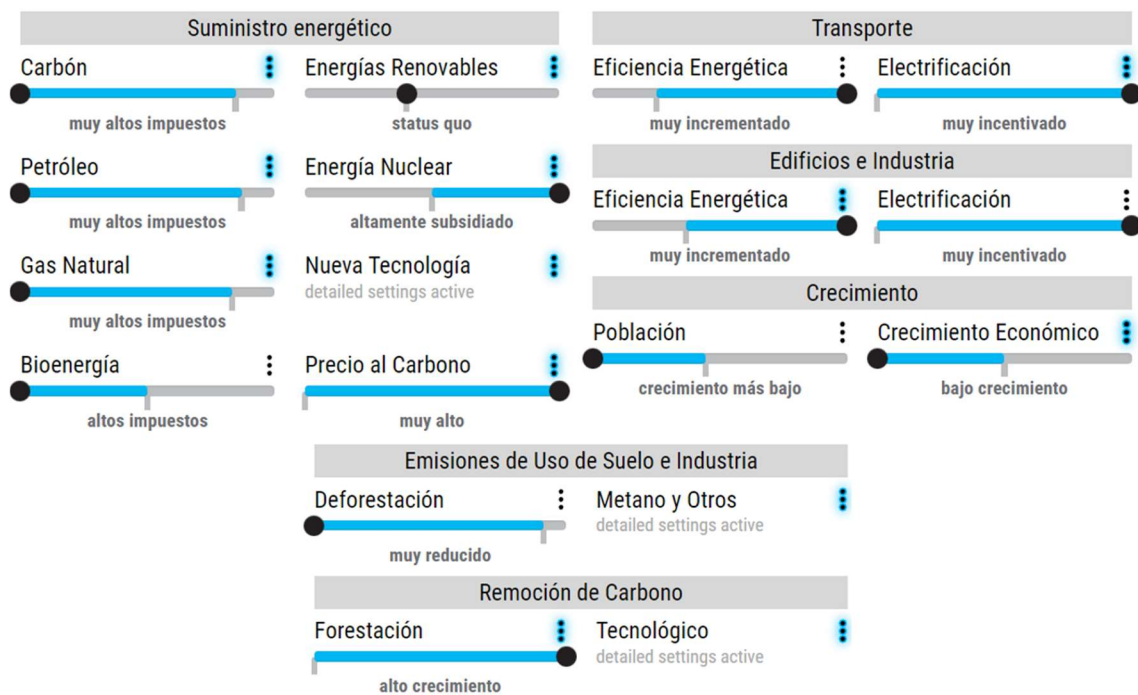


Figura 25: Total de modificaciones realizadas en el simulador para el Caso 3.

Como ya vimos en el caso anterior, estos son la mayoría de los cambios realizados en nuestra simulación. En dicha figura no se aprecian todos los cambios precisos realizados ya que, como recordaremos, cada parámetro tiene a su vez una serie de variables con las que podemos jugar para lograr el objetivo deseado. Esta figura sirve para hacernos una idea visual de los cambios que hemos realizado a gran escala en el Caso 3. Tenemos a continuación todas las acciones precisas que hemos realizado para lograr los objetivos de la simulación:

Acciones

Carbón

- Carbón (impuesto/subsidio) = 110 \$/tec
- % de reducción en el uso de carbón = 100 %
- Detener la construcción de nueva infraestructura de carbón
- Año en el que se dejará de construir nueva infraestructura para el carbón = 2023
- Retiro acelerado de las plantas de carbón = 10 %/año

Petróleo

- Petróleo (impuesto/subsidio) = 100 \$/bep
- % de reducción en el uso de petróleo = 100 %

Gas Natural

- Gas Natural (impuesto/subsidio) = 5,0 \$/Mpc
- % de reducción en el uso de gas = 100 %

Bioenergía

- Bioenergía (impuesto/subsidio) = 30 \$/bep

Energías Renovables

- Energía Renovable (impuesto/subsidio) = 0,02 \$/kWh
- Reducción de costos de la energía renovable por innovación tecnológica = 50 %
- Año de la innovación tecnológica en energía renovable = 2023

Energía Nuclear

- Energía Nuclear (impuesto/subsidio) = -0,07 \$/kWh
- Año de la innovación tecnológica en energía nuclear = 2023

Nueva Tecnología

- Año del avance en Nueva Tecnología = 2023
- Tiempo de comercialización de la Nueva Tecnología = 1 años
- Costo inicial relativo al carbón = 0,5

Precio al Carbono y Estándares de Energía

- Precio al Carbono = 250 \$/t CO₂
- Años para conseguir el impuesto inicial al carbono = 1 años

Eficiencia Energética del Transporte

- Eficiencia Energética de los Nuevos Medios de Transporte = 5,0 %/año

Electrificación de Transporte

- Electrificación de nuevos medios de transporte-terrestre = 100 %
- Electrificación de nuevos medios de transporte-aéreo y marítimo = 100 %

Edificios e Industria Eficiencia Energética

- Eficiencia Energética de Nuevos Edificios e Industrias = 5,0 %/año
- Porcentaje de edificios e industria modernizados = 20,00 %/año

Electrificación de edificios e industria

- Electrificación de nuevos edificios e industrias = 100 %

Población

- Población = 8,8 mil millones en 2100 (crecimiento más bajo)

Crecimiento Económico

- Crecimiento económico a largo plazo (PIB por persona) = 0,5 %/año
- Crecimiento económico a corto plazo (PIB por persona) = 1,7 %/año
- Tiempo de transición = 10 años

Deforestación

- Deforestación (reducción/incremento) = -10,0 %/año

Metano & Otros Gases

- Emisiones de la agricultura y los residuos (CH₄ & N₂O) = -100 %
- Emisiones de la energía e industria (CH₄, N₂O, & gases fluorados) = -100 %
- Años para alcanzar otros objetivos de gases de efecto invernadero = 10 años

Forestación

- Porcentaje de tierra disponible utilizada para reforestación = 100 %
- Tiempo para asegurar tierra para la forestación = 1 años

Eliminación Tec Carbono

- Bioenergía Captura&Almacenamiento de Carbono (BECCS) (% del máximo) = 100 %
- Captura directa de aire (% del potencial máximo) = 100 %
- Año inicial de la captura directa de aire = 2023
- Mineralización mejorada (% del potencial máximo) = 100 %
- Año inicial de la mineralización mejorada = 2023
- Secuestro de carbono del suelo agrícola (% del potencial máximo) = 100 %
- Biocarbón (% del potencial máximo) = 100 %

Figura 26: Total de acciones implementadas en el Caso 3.

La figura anterior nos muestra la gran cantidad de cambios precisos que hemos realizado manualmente en la simulación.

Cabe mencionar que los cambios que hemos ido realizando en la simulación tienen su por qué. Por ejemplo, llama la atención que en el Caso 3, si analizamos el suministro energético de las energías renovables lo hemos mantenido en estatus quo, en lugar de incentivarlo bajando los impuestos. Esto se debe a que, al analizar todos los gráficos que tenemos a nuestra disposición, la concentración de CO₂ en la atmósfera aumentaba. Por tanto, todas las decisiones que se han tomado en esta simulación tienen el objetivo de ser lo más beneficiosas para el sistema climático posibles.

Conocemos ya la gran mayoría de acciones que aparecen en el Caso 3 por haber aparecido en el Caso 2, pero vamos a explicar algunas nuevas que han aparecido:

Carbón: Dentro de este parámetro encontramos Detener la construcción de nueva infraestructura de carbón, lo que nos permite decidir el año en el que se dejará de construir nueva infraestructura para el carbón.

Nueva tecnología: Aquí podemos encontrar el Tiempo de comercialización de la Nueva Tecnología, que permite decidir los años que tardará en comercializarse el nuevo avance de carbono cero (es decir, pasar del laboratorio al catálogo de productos).

Edificios e Industria Eficiencia Energética: Tenemos en este parámetro el Porcentaje de edificios e industria modernizados, lo que viene a ser el ritmo al que los edificios y la industria se adaptarán para que las infraestructuras más antiguas obtengan mejoras de eficiencia energética de nuevo capital.

Crecimiento económico: Encontramos una serie de variables, que son:

- El Crecimiento económico a largo plazo (PIB por persona), el cual ya explicamos en el caso 2. El Crecimiento económico a corto plazo (PIB por persona), que viene a ser el crecimiento medio anual a corto plazo del PIB per cápita, lo que impulsa el consumo de energía. Finalmente tenemos el Tiempo de transición, que es el tiempo que tarda la tasa de crecimiento a corto plazo en converger con la tasa de largo plazo.

Forestación: Hallamos aquí el Tiempo para asegurar tierra para la forestación, que será el número medio de años necesarios para identificar terrenos adecuado, convertirlos y establecer medidas de conservación.

Eliminación Tecnológica del Carbono:

- Tenemos el Año inicial de la captura directa en aire, que como su propio nombre indica, nos permite decidir el año en el que se inicia el esfuerzo de captura directa en aire, siendo el 2030 el valor predeterminado del propio programa y que podemos modificar.
- Por otra parte, tenemos el Año inicial de la mineralización mejorada, que es el año de inicio del esfuerzo de mineralización, siendo el 2030 el año predeterminado por el programa.

Ahora que conocemos todos los parámetros que hemos modificado y la magnitud en la que lo hemos realizado, pasamos a analizar los diferentes gráficos que tenemos:

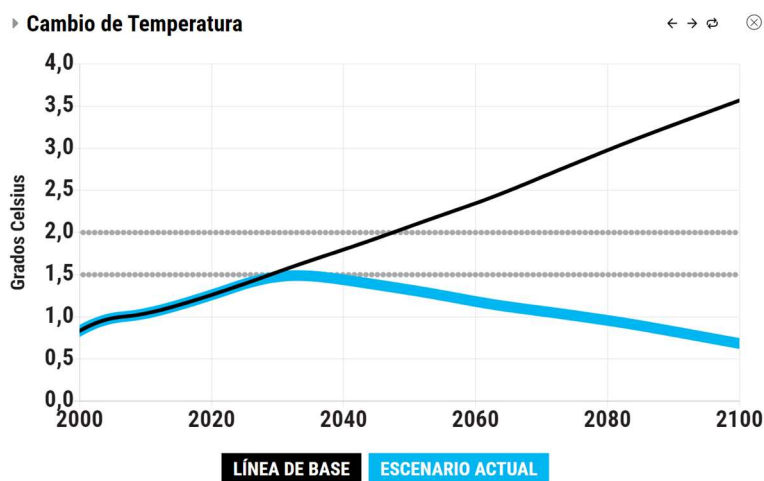


Gráfico 15: Representación del Cambio de Temperatura para el Caso 3.

Como siempre, comenzamos por analizar el cambio de temperatura que sufrirá la atmósfera hasta el año 2100. Gracias a las condiciones de la simulación del Caso 3, se logra que la temperatura por fin deje de aumentar con el paso de los años. De hecho, con el escenario generado se llega a lograr que la

temperatura no llegue a encontrarse ni a 1,5°C por encima de los niveles de la época preindustrial. El máximo del aumento de la temperatura en este caso es de 1,49°C en el año 2033. A partir de ese año, la temperatura no hará más que disminuir hasta llegar a alcanzar un valor de aumento de temperatura de 0,68°C por encima de los niveles de la época preindustrial en el 2100. Este escenario significaría un gran logro para la humanidad porque, como hemos visto ya en el desarrollo de este trabajo, evitaríamos una gran cantidad de problemas climáticos.

Sin embargo, al ir disminuyendo tan drásticamente las temperaturas, deberíamos monitorizar la evolución de esta, porque dicha disminución podría desencadenar una glaciación del sistema climático, lo cual no es lo que buscamos. Aún con esto, al conseguir disminuir tanto la temperatura media global, podríamos volver al punto de partida. Es decir, llegaríamos a un punto similar a la época preindustrial, con lo que podríamos decidir si se necesita un aumento o un descenso de la temperatura en función del desarrollo del sistema climático. Para ello simplemente deberíamos ir variando algunos de los parámetros que ya hemos visto.

Destacamos a su vez que, en esta simulación, tenemos un aumento de la temperatura en 2023 de 1,34°C, y comparando dicho valor con el del 2100, se llegaría a lograr que la temperatura global disminuya un total de 0,66°C.

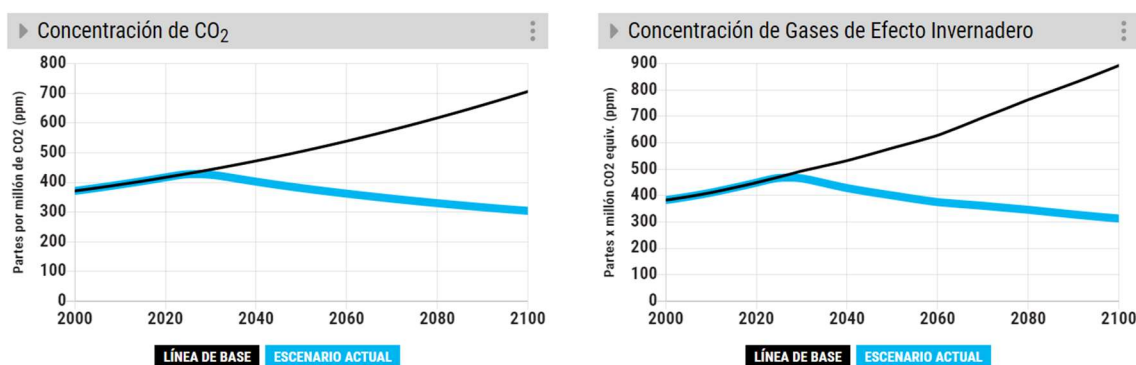


Gráfico 16: Representaciones de la Concentración de CO₂ y la Concentración de Gases de Efecto Invernadero para el Caso 3.

Tenemos representado en los dos gráficos anteriores las concentraciones de CO₂ y de todos los GEI en la atmósfera. Podemos apreciar que, con respecto a la línea base tenemos una bajada significativa de las concentraciones de todos los GEI en la atmósfera. Sin embargo, si lo comparamos con el Caso 2 la diferencia no es tan significativa entre ambos casos. Esto se puede deber a que, pese a disminuir las emisiones de CO₂ y del resto de GEI a la atmósfera, siempre va a haber una gran cantidad de emisión, tanto de origen natural como antropogénica.

Para el caso de la concentración de CO₂ se llega a tener una concentración de 304,17 ppm de CO₂ atmosférico en el 2100, mientras que la concentración de GEI será de 313,01 ppm de CO₂ equivalente para el 2100. Por tanto, un 97,18% de las emisiones de GEI son correspondientes al CO₂.

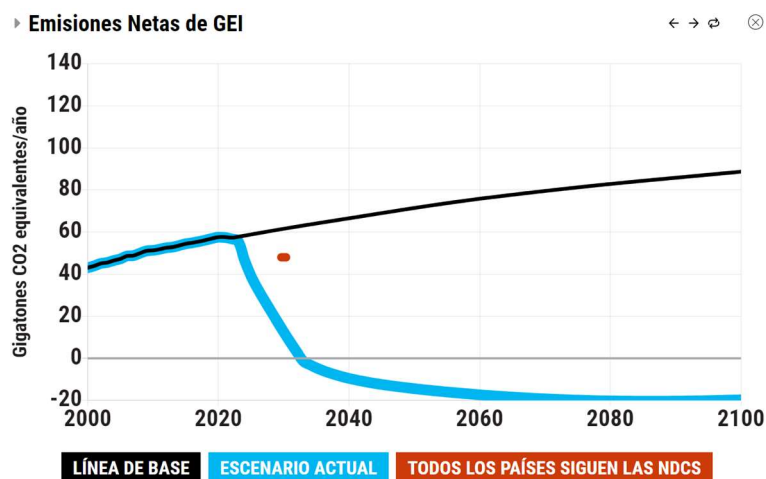


Gráfico 17: Representación de las Emisiones Netas de Gases de Efecto Invernadero para el Caso 3.

El gráfico anterior tenemos representadas las emisiones netas de GEI. Recordemos que en este gráfico se estaban representando las emisiones netas mundiales de GEI, mediante el total de las emisiones brutas de GEI menos el total de la remoción de dióxido de carbono, es decir, de su eliminación. Por tanto, se puede apreciar que entre el 2032/2033 se alcanzan valores negativos de emisión. Esto quiere decir que se logra que haya una mayor eliminación de GEI que la cantidad total que se llega a emitir.

Apreciamos a su vez que se consigue seguir con creces la tendencia de la ONU sobre las NDCs. Tenemos finalmente un total de -19,72 Gigatoneladas de CO₂ equivalente para el año 2100. Como ya hemos mencionado en el caso de la temperatura global, se debería tener cuidado con la drástica disminución de estas emisiones, ya que no queremos una sexta glaciación mundial (recordemos que los GEI nos ayudan a amortiguar las temperaturas).

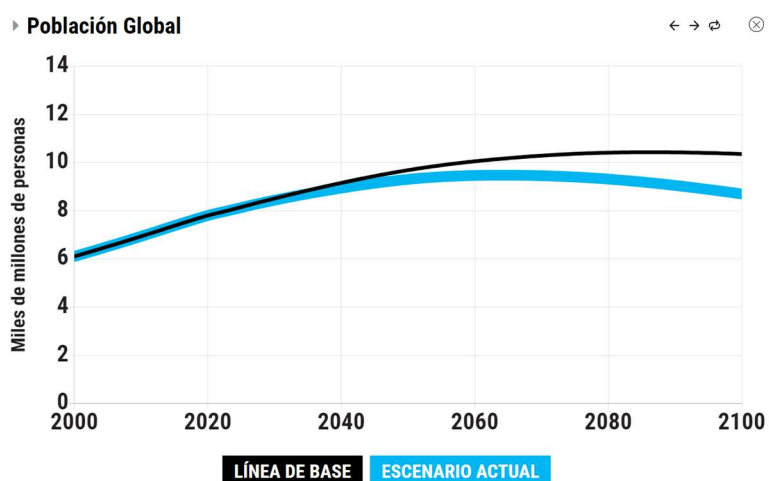


Gráfico 18: Representación de la Población Global para el Caso 3.

Vamos a pasar a analizar cómo es la evolución de la población global para esta simulación. Podemos apreciar cómo tenemos una disminución de la población con respecto a la línea base, lo que nos indica directamente que la disminución de la población global significaría un impacto positivo para el sistema

climático (como ya era de esperar). Por tanto, en el Caso 3 se prevé que para el 2100 tengamos un valor de población global de 8,7 miles de millones de personas. Esto realmente significa una total de 1,65 miles de millones de personas menos con respecto a la estimación del Caso 1.

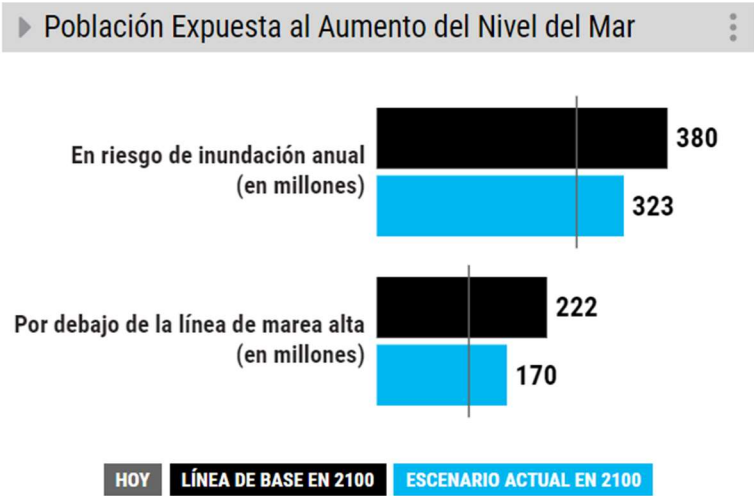


Gráfico 19: Representación de la Población expuesta al Aumento del Nivel del Mar para el Caso 3.

Pasamos ahora a analizar la cantidad de la población que se encontrará expuesta al aumento del nivel del mar en el Caso 3. Como podemos apreciar, aun con todos los cambios drásticos que hemos tenido que realizar para hacer que el cambio climático sea lo más pequeño posible, sigue habiendo un aumento de la población expuesta a la subida del mar. Con la simulación del Caso 3, para el año 2100 se llega a tener un total de 323 millones de personas en riesgo de inundación anual, lo que significaría un 3,71% de la población global. Por otra parte, para el 2100 tendremos un total de 170 millones de personas por debajo de la línea de marea alta, que viene a ser el 1,95% de la población global.

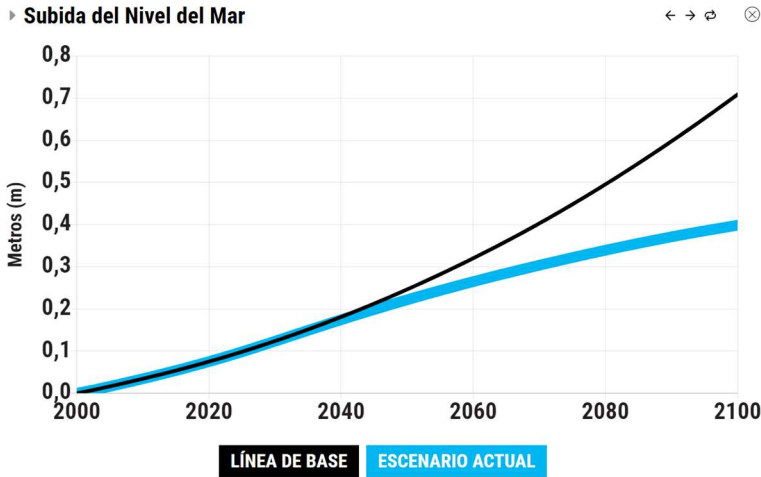


Gráfico 20: Representación de la Subida del Nivel del Mar para el Caso 3.

El gráfico anterior nos muestra cómo va a ir subiendo el nivel del mar a nivel global con el paso del tiempo. Podemos apreciar a simple vista que logramos detener el ascenso exponencial que estaba teniendo dicha subida, haciendo que ambas líneas diverjan para el año 2045. Con las medidas tomadas

en el Caso 3 contra el cambio climático se logra que la curva de la subida del nivel del mar va consiguiendo tomar una forma más horizontal, por lo que, en algún punto pasado el año 2100, se llegará a frenar dicha subida, lo cual tiene sentido por la propia inercia térmica del agua. Pese a esta estabilidad de la subida del nivel del mar, tendremos, como mínimo, un aumento de 0,4 metros con respecto al 2000.

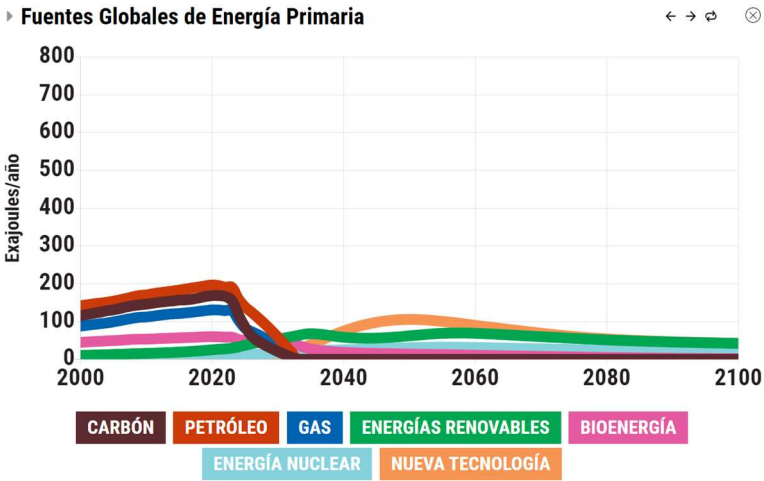


Gráfico 21: Representación de la demanda de las Fuentes Globales de Energía Primaria para el Caso 3.

Podemos observar en el gráfico anterior cómo va a evolucionar la demanda de las fuentes globales de energía primaria para la simulación del Caso 3. Como podemos ver, a partir del año 2023, todas las demandas de fuentes de energía primaria más perjudiciales para el sistema climático decaen por completo (ya que es lo que hemos impuesto con nuestras restricciones). Al mismo tiempo, las fuentes de energía más verdes sufren un aumento de su demanda. Pese a ello, llega un momento en que la demanda energética de todas estas fuentes decae bastante. Esto se debe a que, con las condiciones que hemos generado, llegará un momento en que la sostenibilidad será tal, que no precisaremos de fuentes de energía primaria para que siga funcionando el mundo.

Recordemos que se trata de un caso completamente extremo que no puede llevarse a cabo, pero resulta curioso poder analizar hasta donde se podría llegar. Pasemos a analizar los diferentes valores de demandas energéticas para el 2030 y el 2100:

Fuente energética	Demanda (Exajulios) por año	
	2030	2100
Carbón	20.8	0
Petróleo	58.62	0
Gas	34.84	0
Energías renovables	53.49	42.05
Bioenergía	46.76	1.5
Energía nuclear	16.13	15.04
Nueva tecnología	8.71	42.37

Figura 27: Comparativa de demandas energéticas entre el 2030 y el 2100 del Caso 3.

Como podemos apreciar en la figura anterior y comparándolo con el gráfico que ya hemos visto, las demandas energéticas para el 2100 serán realmente bajas. Se llega incluso a tener valores de demanda nulos para las fuentes de energía perjudiciales como son el petróleo, el carbón y el gas. También tenemos una reducción de la demanda de bioenergía, pero dicha reducción no es total, ya que recordemos que algunas de las fuentes de bioenergía pueden ser sostenibles.

Finalmente, y como en todos los casos, tenemos los resultados finales fruto de las decisiones que hemos tomado en nuestra simulación para el Caso 3:

Resultados

Incremento de la temperatura en 2100

0,7 °C / 1,2 °F

Concentración de CO₂ en 2100

304 ppm

Aumento del Nivel del Mar en 2100

0,4 m / 1,4 ft

Emisiones acumuladas evitadas de CO₂ en 2100

5.484 gigatoneladas de CO₂

Figura 28: Resultados finales obtenidos con el Caso 3.

Como podemos apreciar, con las decisiones que hemos tomado, hemos sido capaces de evitar un total de 5,484 Gigatoneladas de emisiones acumuladas de CO₂.

5.4. Caso 4: Medidas extremas para aumentar el cambio climático.

Pasamos finalmente al último caso que tenemos, que es el Caso 4. En esta simulación intentaremos recrear un escenario en el que se tomen todas las medidas más perjudiciales para el medio ambiente y el sistema climático, para analizar cuan vasta es nuestra capacidad de desestabilizar el planeta.

Como en los casos anteriores, comenzaremos exponiendo todas las modificaciones aplicadas a nuestra simulación para lograr nuestro fin:

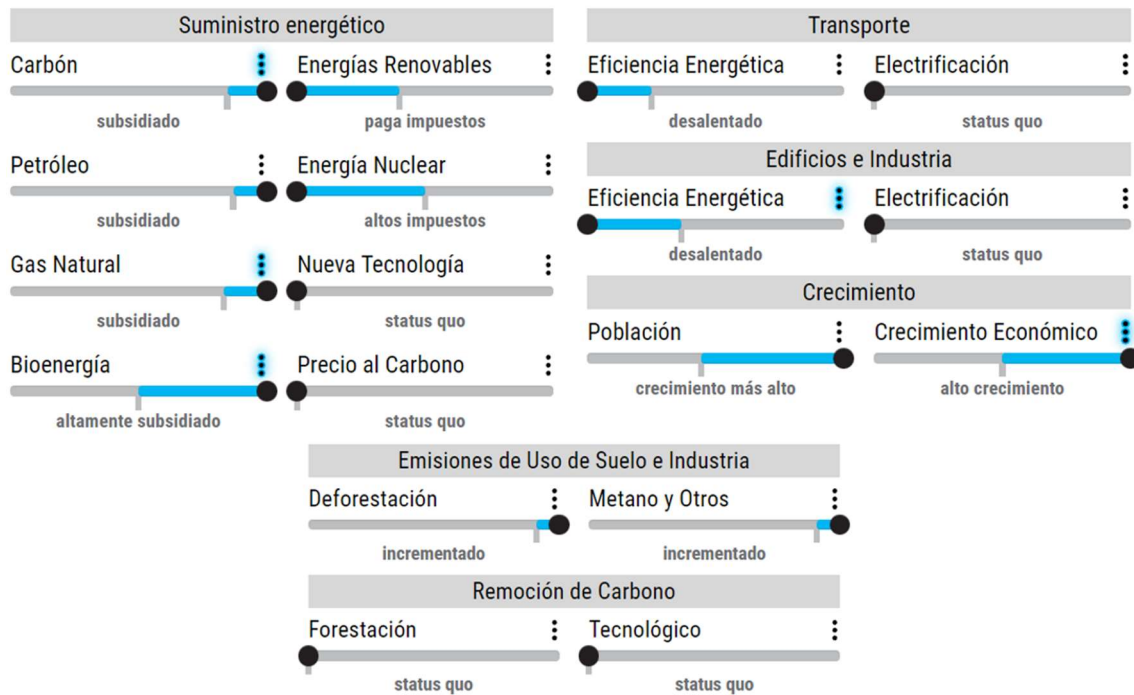


Figura 29: Total de modificaciones realizadas en el simulador para el Caso 4.

Tenemos representada en la figura anterior todas las modificaciones que hemos realizado en la simulación para llegar a conseguir nuestro objetivo, generar el escenario más caótico y perjudicial para el sistema climático y el planeta en sí. Como ya podíamos intuir, lo único que necesitamos para ello es fomentar el uso de todos los combustibles fósiles, reduciendo altamente sus impuestos. Simultáneamente, debemos elevar los impuestos de las fuentes de energía sostenibles para que dejen de usarse, optando así por las otras. A su vez, el aumento de capital en todo el mundo fomenta el consumismo, y con ello, la contaminación asciende considerablemente. Ligado a esto tenemos el aumento de la población, que a su vez retroalimenta lo que acabamos de mencionar. Finalmente hay que dar de lado a las eficiencias energéticas de cualquier tipo, incrementar la deforestación y las emisiones de metano y otros gases y ya tendríamos el escenario completo.

A continuación, tenemos representados todos los cambios precisos que se han realizado en la simulación del Caso 4, que nos ayudarán a entender la magnitud del asunto:

Acciones

Carbón

- Carbón (impuesto/subsidio) = -20 \$/tec
- Captura y Almacenamiento de Carbono del Carbón (CAC) (impuesto/subsidio) = 0,03 \$/kWh

Petróleo

- Petróleo (impuesto/subsidio) = -15 \$/bep

Gas Natural

- Gas Natural (impuesto/subsidio) = -1,0 \$/Mpc
- Captura y Almacenamiento de Carbono de Gas (CAC) (impuesto/subsidio) = 0,03 \$/kWh

Bioenergía

- Bioenergía (impuesto/subsidio) = -30 \$/bep
- Reducción de costos de la bioenergía por innovación tecnológica = 50 %

Energías Renovables

- Energía Renovable (impuesto/subsidio) = 0,02 \$/kWh

Energía Nuclear

- Energía Nuclear (impuesto/subsidio) = 0,07 \$/kWh

Eficiencia Energética del Transporte

- Eficiencia Energética de los Nuevos Medios de Transporte = -1,0 %/año

Edificios e Industria Eficiencia Energética

- Eficiencia Energética de Nuevos Edificios e Industrias = -1,0 %/año
- Porcentaje de edificios e industria modernizados = 0,00 %/año

Población

- Población = 12,4 mil millones en 2100 (crecimiento más alto)

Crecimiento Económico

- Crecimiento económico a largo plazo (PIB por persona) = 2,5 %/año
- Crecimiento económico a corto plazo (PIB por persona) = 3,7 %/año
- Tiempo de transición = 150 años

Deforestación

- Deforestación (reducción/incremento) = 1,0 %/año

Metano & Otros Gases

- Metano y otros gases (reducción/incremento) = 10 %

Figura 30: Total de acciones implementadas en el Caso 4.

Como ya hemos mencionado antes, podemos apreciar que, para lograr nuestro objetivo, simplemente hemos fomentado el uso de los combustibles fósiles que más emisión de CO_2 producen, sumado al aumento vertiginoso de la población y el económico.

Aparecen en esta figura una serie de cambios que no hemos visto en los anteriores casos, y pasamos ahora a conocer qué son cada uno de ellos:

- **Carbón:** Encontramos dentro del apartado del Carbón la Captura y Almacenamiento de Carbono del Carbón (CAC) (impuesto/subsidio), lo que nos permite obstaculizar o promover (en \$/kWh) la generación eléctrica de carbón producido con captura y almacenamiento de carbono. Para hacernos a la idea, el impuesto de 0,03 \$/kWh representa un impuesto aproximado del 20%, por lo que estamos entorpeciendo dicha captura y almacenamiento.
- **Gas Natural:** Aquí tenemos la Captura y Almacenamiento de Carbono de Gas (CAC) (impuesto/subsidio), siendo similar al que acabamos de ver en el carbón, pero referido al gas natural.
- **Bioenergía:** En este apartado hallamos la Reducción de costos de la bioenergía por innovación tecnológica, siendo el porcentaje que tendría un avance en I+D capaz de reducir el coste del suministro de la bioenergía. Por tanto, al tener una reducción de coste, se fomenta su uso, y recordemos que la bioenergía era una fuente incluso peor que quemar el carbón.

- **Metano & Otros Gases:** En este apartado aparece la opción de modificar Metano y otros gases (reducción/incremento), lo que nos permite modificar de golpe todas estas emisiones. Representa el porcentaje del cambio máximo total del metano y otros GEI desde el nivel base. Tenemos agrupados aquí al metano, el óxido nitroso y los gases fluorados. Dicho porcentaje actúa también en la cantidad anual de gas natural que escapa a la atmósfera a través de la minería, producción y distribución. Es decir, nos permite modificar todos los parámetros del Metano & Otros Gases que vimos en los casos anteriores, pero simultáneamente.

Una vez conocidos y analizados todos los cambios, procedemos a analizar los gráficos correspondientes al Caso 4:

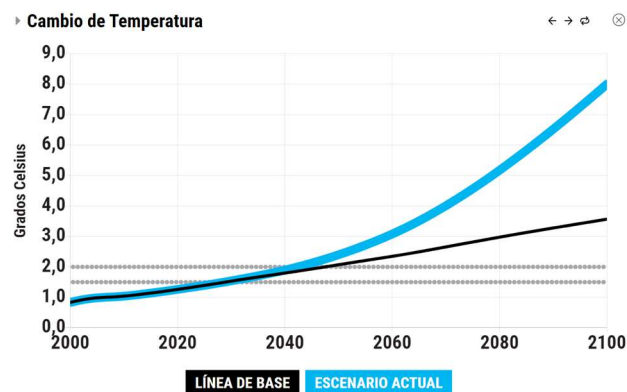


Gráfico 22: Representación del Cambio de Temperatura para el Caso 4.

Comenzamos como siempre por el análisis del cambio de la temperatura. Como podíamos intuir por el tipo de caso que queríamos generar, el aumento de la temperatura es significativamente magno. Asimismo, notemos que la curva del aumento de la temperatura va adquiriendo cada vez una forma más exponencial, por lo que el aumento será cada vez mayor con el paso del tiempo.

En la simulación del Caso 4 se llega a la intimidante cantidad de un aumento de la temperatura por encima de los niveles preindustriales de 8°C. Debemos hacernos a la idea de lo que significarían esos 8°C de más a nivel mundial, ya que tenemos una idea de la magnitud de un aumento de 1,5°C. A su vez, si lo comparamos con el aumento de la línea base, hay una diferencia de 4,43°C. De hecho, si nos pusiéramos en el caso del aumento de 8°C, no se daba tal aumento de la temperatura desde hace unos 40 millones de años.

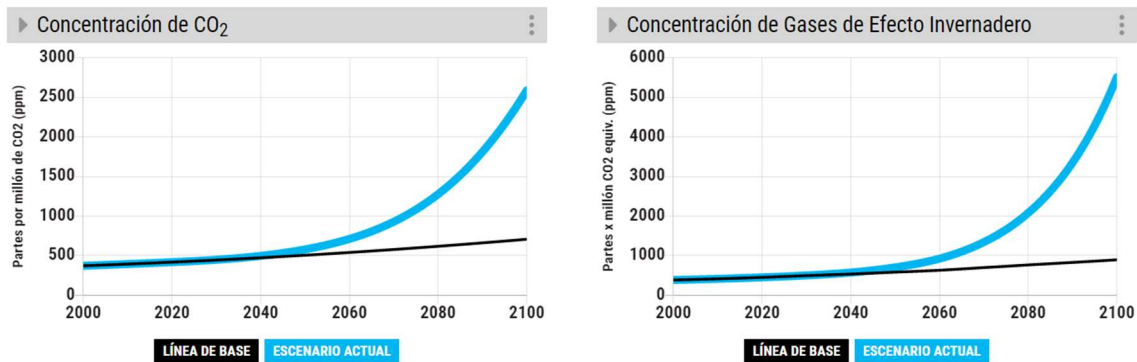


Gráfico 23: Representaciones de la Concentración de CO_2 y la Concentración de Gases de Efecto Invernadero para el Caso 4.

Los dos gráficos anteriores nos demuestran la evolución de las concentraciones de CO_2 y de todos los GEI en la atmósfera de la simulación del Caso 4. Como era de imaginar, ambas curvas iban a tener una forma exponencial por el considerable aumento del uso de los combustibles fósiles. A su vez, como en esta simulación no hemos fomentado para nada la reducción de las emisiones, el aumento de las concentraciones ha sido mucho más notorio.

Para el caso del primer gráfico, tenemos un total de 2587,29 ppm de CO_2 en la atmósfera para el 2100. En el segundo gráfico tenemos un total de 5505,98 ppm de CO_2 equivalente atmosférico para el 2100. Esto significa que un 46,99% de las emisiones totales de GEI corresponden a CO_2 . Como podemos observar, hay una gran diferencia de concentraciones entre ambos gráficos, cuando en las anteriores simulaciones dicha diferencia no era tan cuantiosa. Esto nos puede ayudar a entender que el sobre exceso de la concentración de CO_2 en la atmósfera resulta dañino, pero la concentración de otros gases (como los gases fluorados) puede llegar a ser peor.

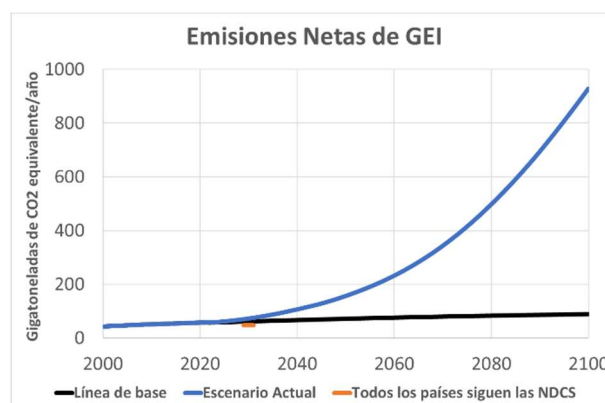


Gráfico 24: Representación en Excel de las Emisiones Netas de Gases de Efecto Invernadero para el Caso 4.

En el gráfico anterior se muestran el total de emisiones netas de GEI. Podemos apreciar que la curva del Caso 4 asciende con tal magnitud, que la curva de la línea base parece horizontal, cuando en las

simulaciones anteriores éramos capaces de observar su forma parabólica característica (debido a esto, el gráfico del programa no nos mostraba la curva entera del escenario actual, por salirse éste de los parámetros del gráfico, y hemos tenido que exportar los datos a Excel para poder analizarlos).

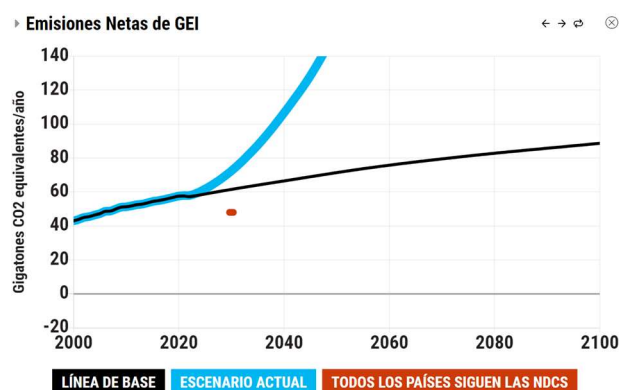


Gráfico 25: Representación de las Emisiones Netas de Gases de Efecto Invernadero para el Caso 4.

Añadimos el gráfico que el propio programa nos muestra para poder analizar el ascenso de las emisiones en los primeros años del Caso 4. Podemos notar en el gráfico anterior cómo la curva se aleja por completo de las emisiones totales propuestas por la ONU.

Volviendo al primer gráfico, se llega a un total de emisiones netas de GEI de 928,5 Gigatoneladas de CO_2 equivalente para el 2100. Recordemos que en el Caso 1 se llegaba a un total de 88,67 Gigatoneladas de CO_2 equivalente.

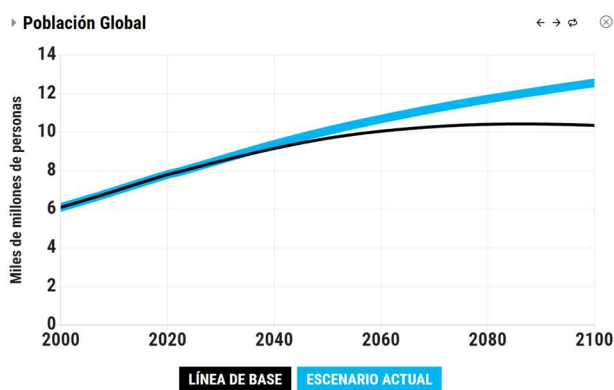


Gráfico 26: Representación de la Población Global para el Caso 4.

Recordemos que para recrear los objetivos propuestos para el Caso 4, habíamos mencionado que el aumento poblacional a nivel mundial era una pieza clave para acrecentar el cambio climático. Como podemos observar, tenemos un aumento de la población. Se alcanzará para el año 2100 un total de población global de 12,56 miles de millones de personas. Si bien es cierto que, a simple vista no parece un gran aumento, se trata de una subida de 2,21 miles de millones de personas con respecto a la línea base (para hacernos una idea de la magnitud de dicho aumento, la población en América actualmente es de unas 1000 millones de personas).

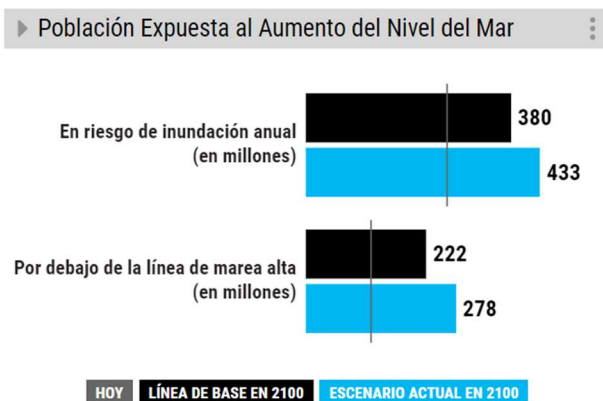


Gráfico 27: Representación de la Población expuesta al Aumento del Nivel del Mar para el Caso 4.

Ahora que conocemos el aumento de la población global, vamos a analizar cuál es la cantidad de población expuesta al aumento del nivel del mar. Como consecuencia de la cantidad de emisiones de GEI junto con el aumento de la temperatura, se tiene un aumento de la población expuesta a este riesgo. Concretamente, para el 2100 se llegará a tener un total de 443 millones de personas en riesgo de inundación anual, lo que es un 3,53% de la población mundial. Asimismo, tendremos en 2100 un total de 278 millones de personas por debajo de la línea de marea alta, siendo esto un 2,21% de la población mundial.

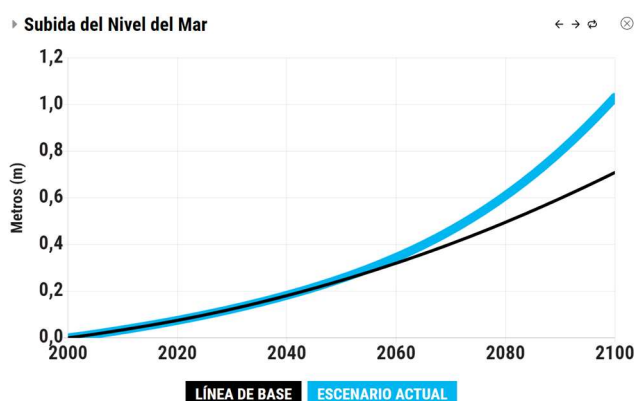


Gráfico 28: Representación de la Subida del Nivel del Mar para el Caso 4.

Pasamos ahora a analizar la subida del nivel del mar en el Caso 4. Como ya hemos mencionado, a raíz de las decisiones tomadas en esta simulación, tenemos como resultado un gran aumento del nivel del mar. Dicho aumento significará un grandísimo problema, no únicamente para la población mundial como acabamos de ver, sino que también será un gran aprieto para el sistema climático, como pudimos ver en el capítulo “*El océano y la criósfera en un clima cambiante*”.

Con la simulación del Caso 4 se llega a una subida total de 1,03 metros con respecto al 2000 para el año 2100. Si comparamos dicha subida con la del Caso 1 tenemos una diferencia de 0,32 metros.

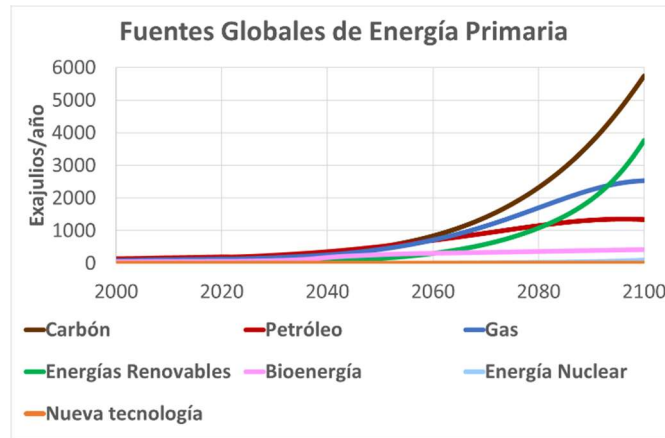


Gráfico 29: Representación de la demanda de las Fuentes Globales de Energía Primaria para el Caso 4.

Tenemos representado en el gráfico anterior la evolución de la demanda de las fuentes de energía primaria. Con los parámetros inducidos a nuestra simulación, era de esperar que la demanda de las fuentes de energía más contaminantes y dañinas para el planeta fuera en aumento. Como podemos observar, el carbón y el gas son predominantes durante casi todo el tiempo, a excepción del final, donde aparecen las energías renovables como segunda fuente energética. Esto puede deberse a que, con la alta demanda energética de fuentes como el petróleo, al ser estos combustibles fósiles, lleguen a acabarse las reservas.

Analicemos entonces los diferentes valores de las demandas entre el 2030 y el 2100:

Fuente energética	Demanda (Exajulios) por año	
	2030	2100
Carbón	214.3	5742
Petróleo	249.5	1343
Gas	175.1	2527
Energías renovables	48.02	3760
Bioenergía	81.73	414.3
Energía nuclear	11.66	101.5
Nueva tecnología	0	0

Figura 31: Comparativa de demandas energéticas entre el 2030 y el 2100 del Caso 4.

Como era de esperar, con la bajada de impuestos de las diferentes fuentes de energía, sumado al aumento poblacional y económico, y la falta de medidas frente al cambio climático, la demanda energética de todas casi todas las fuentes se disparan considerablemente. Esto a su vez retroalimentaría la decadencia del sistema climático hasta sumirlo en unas condiciones completamente catastróficas. Para terminar con este caso, vamos a ver el resumen de los resultados finales de la simulación:

Resultados

Incremento de la temperatura en 2100

8,0 °C / 14,4 °F

Concentración de CO₂ en 2100

2.587 ppm

Aumento del Nivel del Mar en 2100

1,0 m / 3,5 ft

Emisiones acumuladas evitadas de CO₂ en 2100

-16.757 gigatoneladas de CO₂

Figura 32: Resultados finales obtenidos con el Caso 4.

Resulta curioso analizar las emisiones acumuladas evitadas de CO₂ en 2100 para el Caso 4, ya que, como podemos ver, nos da un valor de -16.757 Gigatoneladas de CO₂. Esto quiere decir que, en vez de haber evitado acumular emisiones, lo que se ha hecho ha sido producir emisiones acumuladas de CO₂.

Para dar por finalizadas las simulaciones con el programa “EN-ROADS”, pasamos a agrupar los resultados finales de cada caso en una tabla para facilitar la comparación entre los diferentes escenarios que hemos creado:

		AÑO 2100			
		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Cambio de Temperatura (°C)		3.6	1.9	0.68	8
Concentración	CO ₂ (ppm CO ₂)	706.27	414.79	304.17	2587.29
	Todos los GEI (ppm CO ₂ eq)	892.97	473.15	313.01	5505.98
Emisiones GEI (Gt CO ₂ eq)		88.67	10.04	-19.72	928.5
Población (millones)	Global	10350	10790	8700	12560
	Riesgo inundación anual	380 (3.67%)	351 (3.25%)	323 (3.71%)	433 (3.53%)
	Por debajo marea alta	222 (2.14%)	195 (1.81%)	170 (1.95%)	278 (2.21%)
Subida nivel del mar (m)		0.71	0.55	0.4	1.03
Demanda (Exajulios)	Carbón	291.04	30.97	0	5742
	Petróleo	255.28	94.73	0	1343
	Gas	250.66	83.81	0	2527
	Energías Renovables	242.86	261.42	42.05	3760
	Bioenergía	94.48	32.91	1.5	414.3
	Energía Nuclear	20.44	43.81	15.04	101.5
Nueva Tecnología		0	151.58	42.37	0

Figura 33: Comparativa de todas las medidas obtenidas en las diferentes simulaciones.

Ahora que hemos analizado una serie de eventos, desde los más extremos hasta los más realistas, somos un poco más conscientes de la importancia de nuestras acciones, y la gran repercusión que pueden llegar a tener en un futuro. Cabe destacar que el control de todas las medidas que hemos podido ver en este trabajo no dependen directamente de la gente de a pie como nosotros, sino de altas empresas, gobiernos... Pese a esto, existen por suerte grandes corporativas como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, que nos permiten conocer la gravedad del asunto, y junto con las acciones contra el cambio climático de empresas como el BBVA, el Banco Santander, Endesa o Inditex, se pueden evitar grandes daños para el futuro. Lo primero es siempre conocer el problema, y luego

intentar resolverlo. El contratiempo aparece a la hora de encontrar a quien quiera resolver dicho problema. Por suerte (o por desgracia), al aumentar los problemas que trae consigo el cambio climático, va aumentando la preocupación, y con ello las medidas frente al cambio climático.

6. Conclusión.

Este trabajo de fin de grado ha analizado la influencia del ser humano en el cambio climático y se han analizado las causas subyacentes de las emisiones de gases de efecto invernadero y las consecuencias ambientales del cambio climático. Como hemos podido observar, no cabe duda de que el ser humano es el principal responsable del calentamiento global y los cambios en el sistema climático por las emisiones de gases de efecto invernadero en el desarrollo de sus actividades. Hemos podido conocer todos los procesos físicos que suceden en la atmósfera terrestre, centrándonos especialmente en los causados por el exceso de emisiones de gases de efecto invernadero. Todo esto nos ha servido para poder comprender con mayor facilidad la influencia del ser humano en el cambio climático, como hemos podido ver con los resúmenes de los informes del IPCC.

Sin duda alguna, la simulación en el programa EN-ROADS nos ha ayudado notablemente a comprender, de una manera interactiva y visual, la magnitud que poseen las diferentes actividades antropogénicas en el cambio climático. Hemos conocido cuales son los factores que más alteran dicho sistema climático, los cuales son el precio que posea el carbono en el mercado, la capacidad de electrificar los edificios y la industria para mitigar las emisiones de los gases de efecto invernadero, el crecimiento económico mundial, junto con el crecimiento de la población, la cantidad de emisiones de metano y otros gases (como el óxido nitroso), y la extracción del dióxido de carbono del aire con nuevas tecnologías que nos permitan mejorar la eliminación natural de este gas. Resulta interesante que el crecimiento económico repercuta de manera negativa en el sistema climático, ya que, al poder poseer una mayor cantidad fondos, se podrían invertir en investigación para frenar el cambio climático, y en toda la infraestructura que se necesita para poder llevar a cabo la merma del cambio climático. Es decir, podríamos llegar a diseñar un crecimiento económico sostenible que redujera las emisiones y protegiera el medio ambiente. Para ello, se deberían implementar políticas y tecnologías que promovieran la eficiencia energética y las energías renovables, así como reducir la dependencia de los combustibles fósiles como ya hemos podido observar.

Sin embargo, el programa considera que dicho aumento económico se emplearía para continuar acrecentando el ritmo de todas las actividades humanas que mayor cambio al sistema climático inducen. Esto se debe a que el crecimiento económico se basa a menudo en la producción y consumo de la energía fósil, lo que aumenta el cambio climático. A su vez, dicho crecimiento puede conducir a la degradación del medio ambiente y a la pérdida de la biodiversidad.

Por tanto, para conseguir evitar un cambio climático perjudicial para todos, es de necesaria importancia adoptar políticas y prácticas sostenibles para mitigar estos impactos negativos.

7. Referencias.

- [1] Universidad de Murcia, «Tema 3. La atmósfera.», [En línea]. Disponible: https://www.um.es/sabio/docs-cmsweb/materias-pau-bachillerato/tema_3_.pdf.
- [2] Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica, «La atmósfera y sus capas.», [En línea]. Disponible: <https://agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/la-atmosfera-y-sus-capas>.
- [3] James S. Monroe, Reed Wicander, Manuel Pozo, «Geología. Dinámica y evolución de la Tierra.» Capítulo 19.
- [4] Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, “Abstract” de «Anoxygenic photosynthesis modulated Proterozoic oxygen and sustained Earth’s middle age.», [En línea]. Disponible: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0909248106>.
- [5] Isidoro Martínez, «Termodinámica de la atmósfera.», [En línea]. Disponible: <http://imartinez.etsiae.upm.es/~isidoro/Env/Atmospheric%20thermodynamics.pdf>.
- [6] NSW Government, Environment & Heritage, «Climate systems.», [En línea]. Disponible: <https://web.archive.org/web/20190506123249/https://climatechange.environment.nsw.gov.au/About-climate-change-in-NSW/Climate-systems>.
- [7] Instituto de Tecnologías Educativas, Gobierno de España, «Estructura de la atmósfera.», [En línea]. Disponible: https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion03/1_estructura_vertical.html.
- [8] Laboratorio Nacional de Ciclotrones Superconductores de la Universidad Estatal de Michigan, «What are cosmic rays?», [En línea]. Disponible: <https://web.archive.org/web/20120712052716/http://www.nsl.msu.edu/files/PAN%20cosmic%20ray%20articles.pdf>.
- [9] Universidad de Murcia, «Tema 3. Composición y estructura vertical de la atmósfera. Presión y vientos.», [En línea]. Disponible: <https://www.um.es/geograf/clima/tema03.pdf>.
- [10] Perfil vertical de densidad y presión, [En línea]. Disponible: https://www.monografias.com/trabajos105/tiempo-atmosferico-y-clima/tiempo-atmosferico-y-clima_
- [11] Gradientes adiabáticos, [En línea]. Disponible: <http://www.rinconsolidario.org/meteorologia/webs/dingra.htm>.
- [12] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «La radiación solar y su paso por la atmósfera.», [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la->

- [25] IPCC, «Calentamiento global de 1,5°C.», [En línea]. Disponible:
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf.
- [26] IPCC, «El cambio climático y la tierra.», [En línea]. Disponible:
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf.
- [27] IPCC, «El océano y la criósfera en un clima cambiante.», [En línea]. Disponible:
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2020/07/SROCC_SPM_es.pdf.
- [28] IPCC, «Human Influence on the Climate System.», [En línea]. Disponible:
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter03.pdf.
- [29] Jesús Santamaría Antonio, XI Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica, «Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera.», [En línea]. Disponible:
<https://rac.es/ficheros/doc/00914.pdf>.
- [30] Laboratorio de Glaciología, «Albedo.», [En línea]. Disponible:
<https://glaciologia.cl/glosario/glosario-pag-1/albedo>.
- [31] Ciencia contada en español, foto de DICYT: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Espana-registra-mayores-tasas-de-crecimiento-anual-de-concentraciones-de-CO2-en-la-troposfera>.
- [32] Foto de Valentin de Bruyn, Wikipedia:
https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Cloud_types_en.svg.
- [33] Miguel Ángel García, «Dinámica del viento.», [En línea]. Disponible:
http://iespoetaclaudio.centros.educa.jcyl.es/sitio/index.cgi?wid_item=1827&wid_seccion=19.