

ACADEMIA DE CIENCIAS VETERINARIAS DE
CASTILLA Y LEÓN

EL CAMBIO CLIMÁTICO. UNA VISIÓN DESDE LA ZOOTECNIA

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL
Prof. Dr. D. VICENTE GONZÁLEZ EGUREN

Leído en el solemne acto de su recepción pública como Académico
de Número, celebrado el día 22 de noviembre de 2017

Y contestación del Académico de Número
EXCMO. SR. DR. D. VICENTE GAUDIOSO LACASA



LEÓN, 2017

© Universidad de León
Secretariado de Publicaciones
© Vicente González Eguren

ISBN: 978-84-9773-907-7
Depósito legal: LE-404-2017
Impreso en España / *Printed in Spain*
León, 2017

A mis padres, donde estén, por su sacrificio

A Josefina, por su amor y comprensión

A mi hijo Francisco, del que estoy tan orgulloso

INDICE

AGRADECIMIENTOS Y JUSTIFICACIÓN.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. EL SISTEMA CLIMÁTICO DE LA TIERRA.....	21
3. EL PASADO DEL CLIMA DE LA TIERRA.....	29
3.1. El clima antes del cuaternario.....	30
3.1.1. Precámbrico.....	30
3.1.2. Paleozoico.....	33
3.1.3. Mesozoico.....	36
3.1.4. Terciario.....	38
3.2. Cuaternario: Pleistoceno.....	44
3.2.1. Pleistoceno.....	44
3.3. Cuaternario: holoceno.....	53
4. CLIMA RECIENTE.....	61
4.1. Calentamiento global.....	62
4.2. Efectos del calentamiento global.....	66
4.2.1. Ascenso del nivel del mar.....	66
4.2.2. Desaparición del hielo	67
4.2.3. Modificación de las precipitaciones.....	70
4.3. Cambios en la circulación atmosférica y oceánica.....	74
4.4. Gases efecto invernadero.....	77
4.4.1. CO ₂ (dióxido de carbono).....	77
4.4.2. Metano (CH ₄)	84
4.4.3. Óxido nitroso (N ₂ O).....	86
4.4.4. Halocarburos (CFC, HFC, PFC Y SF ₆).....	86
4.4.5. Ozono (O ₃).....	87
4.5. Aerosoles antrópicos.....	88
5. PRONÓSTICOS Y ESTRATEGIAS PARA EL CLIMA FUTURO.....	91

6. ASPECTOS SOCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	101
6.1.Percepción social del cambio climático.....	102
6.2.Enseñanza y divulgación del cambio climático.....	104
6.3.Negacionismo y cambio climático.....	107
7. ECONOMIA, DESARROLLO SOSTENIBLE Y CAMBIO CLIMA.....	111
7.1. Desarrollo sostenible y cambio climático.....	113
7.2. Economías “verdes” frente al cambio climático.....	115
7.3. El informe Stern.....	119
8. ACUERDOS INTERNACIONALES SOBRE CAMBIO CLIMATICO:.....	123
9. SISTEMA AGROALIMENTARIO Y CAMBIO CLIMÁTICO.....	129
9.1. Seguridad en el abastecimiento de alimentos.....	130
9.2. Emisiones de gases de efecto invernadero por el sector agrario.....	131
9.3. Mitigación y adaptación sistema agroalimentario frente al CC.....	134
9.3.1. Repercusiones del cambio climático sobre ganadería.....	137
9.3.2. Ganadería de precisión y cambio climático.....	139
9.3.3. Reducción emisiones GEI en producción agropecuaria....	142
9.3.3.1. Mejora de la eficiencia.....	143
9.3.3.2. Reducción emisiones de metano.....	146
9.3.3.3. Reducción emisiones de óxido nitroso.....	148
9.3.4 Captura de carbono, sector agrario y suelos.....	149
9.3.5 Alimentación humana sostenible	153
9.3.6 Políticas agrarias y financiación frente al cambio climático.....	159
10. A MODO DE CONCLUSIÓN.....	163
11. BIBLIOGRAFIA.....	165
12. LAUDATIO Y CONTESTACIÓN POR EL ACADÉMICO DE NÚMERO EXCMO. SR. DR. D. VICENTE GAUDIOSO LACASA	183

SIGLAS Y ABREVIATURAS

a C: antes de Cristo

ASOUT: Agricultura, ganadería, silvicultura (actividad forestal) y otros usos de la tierra

CFC: Clorofluorocarbono

CH₄: Metano

CMNUCC: Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CO₂: Dióxido de carbono

CO₂-eq: CO₂ equivalente

COP: Conferencia de las Partes en la CMNUCC

Cu: Cobre

d C: después de Cristo

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Fe: hierro

GEI: Gases de Efecto Invernadero

Gt: Gigatoneladas

GtC: Gigatoneladas de carbono

IC: Índice de conversión (o Índice de Transformación)

IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático

Ka: kiloaños (miles de años)

Ma: Millones de años

MS: materia seca

N₂O: óxido nitroso

ONU: Organización de las Naciones Unidas

O₃: Ozono

SA: Sistema Agroalimentario

t:Tonelada

W/m²: Vatios por metro cuadrado

Zn: Cinc

AGRADECIMIENTOS Y JUSTIFICACIÓN

Excelentísimos Sres. Presidente y Secretario General de la Academia de Ciencias Veterinarias de Castilla y León,

Excelentísimos Señoras y Señores Académicos,

Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades,

Compañeros, Amigos y Familiares,

Señoras y Señores.

En primer lugar, quisiera manifestar mi agradecimiento a los Académicos que han posibilitado mi incorporación como Académico de Numero de esta Docta Institución de las Ciencias Veterinarias de Castilla y León, a la que deseo corresponder, dentro de mis posibilidades, en cuanto me sea requerido. En particular, deseo recordar a aquellos que, con su aval personal, posibilitaron mi candidatura de numerario en la sección de Zootecnia y Medio Ambiente, profesores Rodríguez Ferri, Rojo Vázquez y Gaudioso Lacasa. Los dos primeros, Presidente y Secretario General de esta Academia, todo un honor para mí. A Vicente Gaudioso, mi maestro, al que tanto debo, quiero agradecerle también que haya aceptado realizar la “Laudatio y Contestación” a este discurso.

Resultaría inoportuno, y seguramente desmedido, mencionar aquí a todas las personas que a lo largo del tiempo han contribuido a mi proyecto vital, tanto en la faceta profesional como en lo personal. Además, correría el riesgo de omitir, sin pretenderlo, a alguna de ellas.

En lo profesional, manifestar en primer lugar mi gratitud y respeto por los compañeros de universidad, de Facultad y sobre todo del departamento de producción animal. El frío de la planta baja se combate con el cariño, la amistad y algún que otro radiador. También quiero recordar ahora a todos los alumnos que desde hace 35 años han marcado mi proyecto vital, en especial a los de doctorado,

que con su ilusión y juventud ocupaban los despachos de becarios, ahora tan vacíos.

En segundo lugar, profesionalmente siempre estaré en deuda con el Colegio Oficial de Veterinarios de Zamora y con la Sociedad Euromediterránea para la Vigilancia de la Fauna Salvaje conocida por sus iniciales en inglés como WAVES. Allí siempre me he sentido como en casa y fue donde renové mi pasión por la fauna silvestre. Gracias a todos por vuestro cariño y comprensión, no siempre correspondida. Tampoco quiero olvidarme del Centro Cinegético de Valsemana de la Junta de Castilla y León de cuyos responsables tanto he aprendido y también disfrutado de su hospitalidad y afecto. Este año he sentido no haber podido acompañaros.

Para terminar este apartado profesional, tengo que mencionar a la Asociación Canina de León, que tengo el honor de presidir y gracias a la cual miro con cariño a los montes de luna y con preocupación a su pantano.

Para finalizar, quiero dar las gracias a Josefina, mi mujer, por su permanente apoyo, cariño y comprensión. Su discreción y sensatez son el contrapunto perfecto a mi impulsivo carácter. Tampoco quiero olvidarme de nuestro hijo Francisco, ahora tan cerca, con el que actualmente comparto preocupaciones profesionales, y del que tan orgulloso me siento.

Desde el momento en que me comunicaron que había sido elegido como Académico de Número en la sección de Zootecnia y Medio Ambiente he considerado conveniente que mi discurso de ingreso incluyera las dos facetas de esta sección de la Academia de Ciencias Veterinarias de Castilla y León: por un lado la Producción Animal, Zootecnia en sus orígenes, o ciencia animal y por otro el Medio Ambiente. Ambos términos me han acompañado a lo largo de mi devenir académico y profesional.

En un principio pensé en desarrollar un tema relacionado con la problemática ambiental que ocasionan los residuos de las explotaciones ganaderas intensivas, que, a pesar de su indudable interés, mi olfato me decía que resultaría poco atractivo para desarrollar en esta Academia.

Descartada esta posibilidad quedaba la alternativa de tratar un tema relacionado con la ganadería extensiva y su relación con el Medio Ambiente, incluyendo la fauna silvestre. Mi vinculación con los animales silvestres comienza en el año 1995, en Zamora, con el Máster en Veterinaria y Fauna Salvaje, pionero en la materia dentro nuestro país. Este Máster de especialización profesional se realizó

en virtud de un acuerdo entre la Universidad de León y el Colegio Oficial de Veterinarios de Zamora. Como Director Académico del Master tenía que pronunciar la conferencia de clausura del Máster. El tema elegido fue la relación entre ganadería y fauna salvaje, lo que en aquel momento era un reto y también un atrevimiento por mi parte. Con no poco esfuerzo, logré preparar un documento que recogía aspectos tanto de la ganadería intensiva como de la extensiva en relación con la fauna y con el medio ambiente. Entre los diferentes apartados destacaban la prevención de los incendios forestales por la ganadería extensiva o la contribución de la ganadería a la alimentación de predadores y carroñeros.

Para desarrollar este discurso de ingreso, pensé en un principio en una actualización de la citada conferencia pero la decisión del profesor de Luis Calabuig de centrar su discurso de ingreso, como Académico de Número por la sección de Ciencias afines, en agroecosistemas, gestión ambiental y cambio global me hizo descartar esa idea. Aunque el Dr. Calabuig incluía el cambio global, me adelanto que solo dedicaría al mismo un pequeño apartado. A partir de ese momento comencé a pensar que quizá podría hablar de cambio climático y ganadería. Y los que me conocen ya saben lo que hago. Acumular todo el material que puedo, generalmente en formato pdf. La cuestión es que en este tema la información desborda cualquier previsión. No hablo del cambio climático en general, me refiero al aspecto concreto de la relación entre el cambio climático y el sector agropecuario y alimentario. Si alguien está interesado tiene a su disposición varios centenares de separatas relacionadas con este tema.

Escribir sobre cambio climático es todo un reto por muchas razones, pero fundamentalmente porque implica escribir un poco de todo. De hábitos cotidianos, de convicciones políticas, de cuál es la dieta más adecuada, de la tecnología que necesitas para combatirlo, de las percepciones sobre meteorología, del paisaje que te rodea, de los medios de transporte o de las vacaciones que planificas durante once meses al año. El cambio climático es el problema del siglo XXI. Por ello, está presente continuamente, impregnándolo todo. Esa es también su maldición. A diferencia de otras cuestiones científicas, no se inscribe en ninguna esfera; al contrario, constituye una que engloba la totalidad de la actividad humana. Además, España, como estamos viendo estos últimos meses, o mejor dicho años, es un país especialmente vulnerable a los posibles efectos adversos del cambio climático, tanto por su situación geográfica como por sus características socioeconómicas.

Unir el cambio climático con el sector agroalimentario, particularmente con la zootecnia, o si se prefiere con la producción animal, obedece a las implicaciones

que existen entre ambos, especialmente con la emisión de gases de efecto invernadero por la ganadería. Aunque estoy de acuerdo con el profesor Gaudioso que las denominaciones de Zootecnia, Producción Animal o Ciencia Animal son sinónimas, he preferido utilizar la primera de ellas debido a qué es el nombre de la sección de esta Academia de Ciencias Veterinarias de Castilla y León a la que hoy tengo el honor de incorporarme: “Zootecnia y Medio Ambiente”. Es además un pequeño homenaje a la mayoría de los académicos fundadores y de honor que cursaron esta materia, la zootecnia, durante su carrera. Es también un sentido recuerdo al profesor Sotillo, maestro de maestros, que con su emblemático libro “bases fisiozootecnicas de la producción animal”, señaló el comienzo del cambio de denominación de esta rama de la ciencia en nuestro país.

En cualquier caso, el cambio climático es un tema con numerosas dificultades la primera de ellas es el amplio abanico de disciplinas que es necesario conocer para tratarlo con un cierto rigor. En efecto el cambio climático está relacionado con las Ciencias de la Tierra que presenta un abanico mucho más amplio que las clásicas disciplinas de las ciencias experimentales: física, química, matemáticas, biología y sobre todo los diferentes aspectos relacionados con la geología. En cualquier caso las Ciencias y las Tierra tienen en común el flujo de energía, lo que está relacionado con la termodinámica, una de mis materias favoritas cuando comencé la carrera de veterinaria. Además, la complejidad del cambio climático en la actualidad hace que sean necesarios conocimientos sobre economía, sociología, historia o política.

Al final, como si fuese un agujero negro, el cambio climático ha devorado a la zootecnia y casi también al que les habla. De ahí el título del discurso. Si alguno tiene en sus manos la publicación quiero tranquilizarlo. Gracias a la generosa extensión de la misma y a su segura lectura, por su parte, con posterioridad a este acto, me siento liberado de explicar muchas cosas, por lo que prometo brevedad en mi intervención.

1.- INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por las consecuencias del cambio climático en la sociedad actual ha provocado un notable incremento de los esfuerzos científicos para afrontar los problemas relacionados con el cambio climático y adquirir un mejor conocimiento del funcionamiento del sistema climático de nuestro planeta.

El medio ambiente en general y el cambio climático en particular serán los temas dominantes del siglo XXI. No obstante, como señala Terradas (2010), no estamos preparados ni institucionalmente, ni en nuestras ideas, ni quizá en los propios mecanismos intelectuales, ya que nuestras limitaciones como especie para pensar a nivel de grandes escalas de espacio y tiempo nos hacen albergar dudas sobre la capacidad de enfrentarnos a los impresionantes retos globales que se nos presentan. Además, El cambio climático es el principal reto al que se ha enfrentado la sociedad humana. Pero es un reto con el que nos tenemos que enfrentar, ya que la alternativa es un futuro desagradable y potencialmente incompatible con la vida humana (Mann y Kump, 2015). En los últimos años, el cambio climático ha eclipsado al resto de problemas ambientales provocados por las actividades humanas. Por ello, el simple gesto de hablar y debatir sobre el cambio climático va más allá de la defensa y protección del medio ambiente es simplemente algo útil y beneficioso para nosotros y, sobre todo, para el futuro de nuestra especie en este planeta.

Analizaremos el sistema climático así como la historia del clima de nuestro planeta, lo que es necesario para ayudarnos a comprender el actual calentamiento global de origen antropogénico. Pretendemos explicar también los escenarios futuros del clima de la Tierra y los impactos que puede provocar. En este sentido, abordaremos la problemática social y económica del cambio climático intentando conocer los errores cometidos en la comunicación a la sociedad de este grave problema. Estudiaremos también la incidencia de la ganadería sobre el cambio

climático. Por último, veremos las herramientas de las que disponemos para la lucha contra el cambio climático (adaptación y mitigación).

El Cambio Climático es un cambio significativo y duradero de los patrones locales o globales del clima por causas naturales (variaciones en la energía que se recibe del Sol, erupciones volcánicas, circulación oceánica, etc.) o antrópicas (emisión de CO₂ y otros gases que atrapan calor, alteración del uso de grandes extensiones de suelos, etc.) que provocan un calentamiento global¹ de nuestro planeta.

En cualquier caso, según Escrivá (2017), la expresión **Cambio Climático** (CC) está estrechamente relacionada con, al menos, cuatro conceptos que no son totalmente equiparables²: **efecto invernadero**, **calentamiento global**, **cambio climático antropogénico** y **cambio global**, que describiremos a continuación.

El **efecto invernadero** es el proceso físico por el que el planeta Tierra está más caliente de lo que lo estaría sin la atmósfera debido a la presencia de los gases de efecto invernadero (GEI), que son capaces de conservar parte del calor que irradia nuestro planeta (onda larga) mientras que dejan pasar radiación de, es decir: la luz del sol (onda corta). El efecto invernadero es esencial para la vida del planeta, ya que sino la temperatura media de la Tierra sería unos 33 °C menos, del orden de 18 °C bajo cero, lo que haría inviable la vida. Se trata por tanto de un proceso natural que puede ser amplificado por una serie de actividades humanas.

El **calentamiento global** es la principal manifestación del CC y hace referencia al incremento gradual de las temperaturas de atmósfera y océanos de la Tierra que se ha detectado en las últimas décadas, además del continuo aumento que se prevé en el futuro. Para la mayor parte de la comunidad científica hay más de un 90% de probabilidad de que dicho calentamiento este provocado por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero por actividades humanas, como la deforestación y la quema de combustibles fósiles.

Las otras dos expresiones: cambio climático antropogénico y el cambio global o cambio climático global quieren resaltar la importancia de las actividades humanas en el cambio climático actual, que van más allá del efecto invernadero y del calentamiento global.

¹ La energía recibida por la Tierra desde el Sol debe estar en balance con la radiación emitida desde la superficie terrestre, es decir debe existir un equilibrio energético. Cualquier factor que genere un cambio sostenido entre la cantidad de energía que entra al sistema (la Tierra y su atmósfera) y la energía que salen del mismo, puede generar un cambio climático.

² Es decir, no son sinónimos, aunque en muchas ocasiones se emplean como tales..

El *cambio climático antropogénico* son aquellas alteraciones en el clima que surgen a partir del resultado de las actividades del hombre. Así, dichas actividades, además del calentamiento producido por el fortalecimiento del efecto invernadero, han originado modificaciones en: los patrones de precipitaciones, la evaporación, las corrientes oceánicas, la circulación atmosférica, así como en los fenómenos meteorológicos extremos.

El *cambio global*³ hace referencia al conjunto de cambios ambientales afectados por la actividad humana, con especial referencia a cambios en los procesos que determinan el funcionamiento del sistema Tierra, incluyendo aquellas actividades que, aunque ejercidas localmente, tienen efectos que trascienden el ámbito local o regional para afectar al conjunto del planeta (Duarte, 2006). Es decir, todos los impactos provocados por nuestra especie sobre el medio ambiente, no sólo aquellos que tienen que ver con el clima: contaminación de aguas, suelos y aire o el empleo de la superficie terrestre para las actividades agropecuarias. En este sentido, Luis-Calabuig, (2017), define el cambio global como la expresión de los resultados de la manipulación humana con efectos detectables a escala planetaria.

En cualquier caso tenemos que diferenciar entre tiempo y clima. El primero está relacionado con el estado de la atmósfera y tiene un alcance en el tiempo mucho más corto (varios días). Sin embargo, el clima hace referencia al sistema climático de nuestro planeta y se determina mediante valores medios de una serie de variables ambientales, como, por ejemplo, la temperatura, en periodos de tiempo largos (la Organización Meteorológica Mundial-OMM- establece 30 años), con diferencias en la distribución espacial y temporal.

No obstante, es cierto que climatología y meteorología son dos ciencias que están íntimamente relacionadas ya que emplean las mismas variables, e incluso también las mismas herramientas, aunque las utilizan de forma muy diferente.

Cuando hacemos referencia al clima estamos analizando lo que con más propiedad se denomina sistema climático, que analizaremos en el siguiente apartado. No obstante, en numerosas ocasiones se simplifica el sistema climático para hacer

³ El cambio es algo consustancial al planeta Tierra que, a lo largo de sus miles de millones de años de historia, ha experimentado continuos cambios, algunos mucho más intensos que los que nos puede deparar el futuro próximo. Incluso, muchos de los cambios más importante en la biosfera han estado forzados por organismos. Por ello, las expresiones cambio global y cambio climático para referirse a los efectos indicados anteriormente no son las más adecuadas, pues su antónimo, la inmutabilidad o constancia global y climática, no ha existido en la convulsa historia de nuestro planeta.

referencia solo a la parte atmosférica, concretamente a precipitaciones y temperatura, aunque existen numerosas variables que se deben de considerar: presión atmosférica, humedad, viento, extensión de los hielos, etc.

Debemos distinguir entre “cambio de clima” (que es una simplificación de “cambio del sistema climático”) y “cambio climático”. Si analizamos la historia del clima de nuestro planeta observaremos que este cambia porque lo normal es que un sistema tan complejo como el climático presente variaciones a lo largo del tiempo. El clima de hoy en día es diferente del clima de hace 3.000 años y, con toda seguridad, el clima futuro será diferente al actual. Como señala un conocido divulgador sobre el tema “en el clima lo único que permanece es el cambio” (Brasero, 2017). En definitiva, esto es a lo que nos referimos cuando hablamos de cambio de clima. No se tiene en cuenta ni el funcionamiento del sistema climático ni el origen de los cambios.

Por otro lado está el cambio climático. Es necesario aclarar que en inglés no se puede distinguir entre las expresiones “cambio de clima” y “cambio climático” ya que utiliza de forma genérica “climate change”, pero con las dos acepciones que hemos visto en nuestro idioma. Generalmente, los científicos cuando hablan de “cambio climático” se refieren al cambio del estado del clima de la Tierra, o simplificado cambio de clima (primera acepción), con independencia de las causas (naturales o provocadas por el ser humano) que provocan dicho cambio. En cuanto a la segunda acepción de “climate change”, comenzó a difundirse a raíz de la Cumbre de Río de Janeiro de 1992, aproximadamente un mes después de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático donde realmente se había establecido la misma. En dicha Convención se define “cambio climático” como un cambio de clima inducido directa o indirectamente por la actividad humana y que se superpone a la variabilidad natural del clima. Esta expresión de cambio climático la que utilizan habitualmente políticos, ONG y medios de comunicación.

2.- EL SISTEMA CLIMÁTICO DE LA TIERRA

Los diferentes procesos que ocurren en nuestro planeta son posibles gracias a la energía solar que nos llega en forma de radiación electromagnética. El clima en la Tierra es algo cambiante y dinámico, determinado por una serie de causas externas e internas a nuestro planeta que cambian con el transcurso del tiempo. La vida en el planeta ha estado vinculada con las condiciones climáticas imperantes en cada momento. Aunque generalmente omitimos esa realidad creyendo en la perpetuidad de las condiciones de equilibrio climático que conocemos y en las cuales hemos vivido mucho tiempo.

El clima es consecuencia de la energía que recibe la Tierra del Sol y de los intercambios de energía que se producen entre distintas partes (subsistemas) del denominado sistema climático. Los mencionados subsistemas son:

- a) Atmósfera (envoltura gaseosa del planeta).
- b) Hidrosfera (agua presente en fase líquida en nuestro planeta: océanos mares lagos ríos etc.).
- c) Criosfera (hielos que cubren parte de océanos y continentes).
- d) Litosfera (corteza sólida emergente de los continentes)
- e) Biosfera (conjunto de seres vivos de nuestro planeta).

El clima queda caracterizado por una serie de variables ambientales (fundamentalmente: temperatura, humedad, presión atmosférica viento y precipitación) durante periodos de tiempo largos en una determinada región. Más brevemente también se puede decir que el clima es la estadística del tiempo atmosférico sobre un intervalo de 30 años. La diferencia con el tiempo meteorológico es que este se refiere a las variables anteriormente vistas pero en un plazo corto (Alonso, 2011).

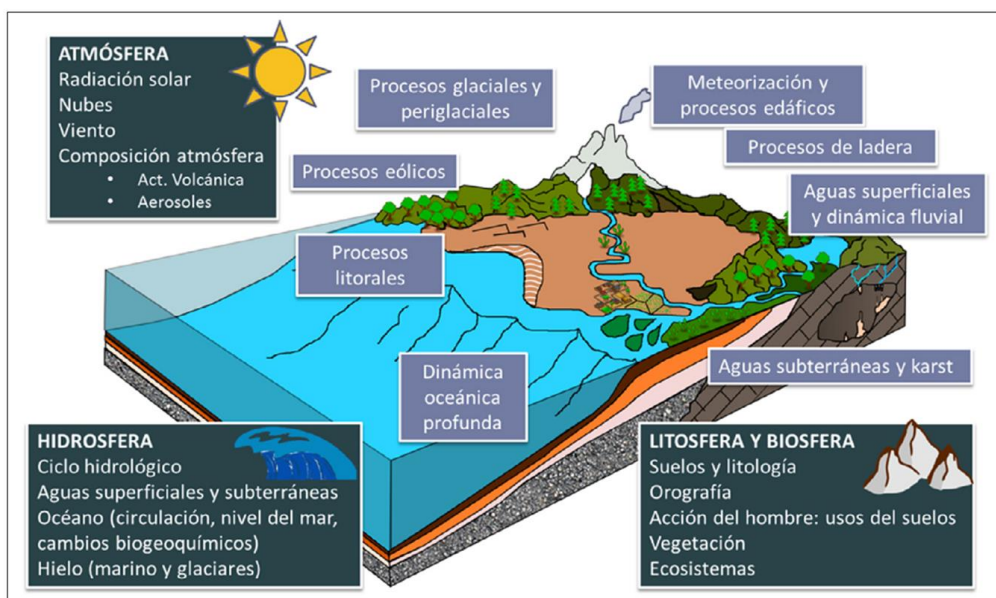


Figura 1. Principales subsistemas del sistema climático de la Tierra (IPCC, 2014)

En la Figura 1 podemos observar un esquema de los diferentes componentes del sistema climático con los principales procesos e interacciones entre los mismos. En cualquier caso los diferentes subsistemas del sistema climático presentan dinámicas muy diferentes. Así algunos como la litosfera apenas si tienen respuesta ante las perturbaciones mientras que otros presentan cambios continuos y apreciables como es el caso de la atmósfera (Alonso, 2011).

La distribución de la energía del sol entre los distintos subsistemas y el intercambio entre unos y otros da lugar a la gran variedad de climas que hay en distintas regiones de nuestro planeta. Además, debido a que la energía que procede del sol no llega en igual intensidad a lo largo del tiempo existen variaciones temporales en el clima (Alonso, 2011).

En la variabilidad del clima de la Tierra además de influir una serie de causas naturales también pueden existir otras ocasionadas por las actividades de los seres humanos.

Ya hemos señalado que los diferentes procesos que se originan en el sistema climático de nuestro planeta tienen como fuente prácticamente exclusiva a la energía solar. La energía emitida por el Sol se desplaza por el espacio como radiación electromagnética (radiación solar o de onda corta), hasta alcanzar

nuestro planeta la Tierra que recoge o intercepta esa energía aunque no siempre lo hace de manera uniforme ya que va a depender de la posición de la órbita de nuestro planeta a lo largo del tiempo. Por otro lado una parte de la energía solar no es aprovechada por el sistema climático siendo de vuelta al espacio por el efecto albedo, por reflexión que se produce en las nubes y en la superficie de la Tierra. El valor medio de reflexión o albedo en nuestro planeta es del orden del 30%. Si la Tierra no dispusiera de atmósfera la superficie de nuestro planeta se encontraría a una temperatura media de -18°C , que sería justo la necesaria para mantener el balance de radiación, es decir el equilibrio energético resultante del balance entre la radiación solar (onda corta) que penetra y la radiación que emite la Tierra (onda larga o infrarroja) a esa temperatura. En este sentido los componentes atmosféricos absorben relativamente poca radiación solar especialmente cuando hay ausencia de nubes pero son muy absorbentes para las radiaciones infrarrojas emitidas por la Tierra y por la propia atmósfera. Por ello, se origina un calentamiento en las capas bajas de la atmósfera que modifica el balance de radiación alcanzando una temperatura media de 15°C a nivel de la superficie. Este comportamiento diferente de nuestra atmósfera respecto a la radiación solar y a la emitida por nuestro planeta recibe el nombre de **efecto invernadero**, por las similitudes que tienen con el comportamiento de esta estructura, aunque físicamente son muy diferentes. No obstante, el término ya está plenamente aceptado por la comunidad científica. El responsable principal del efecto invernadero es el vapor de agua explica alrededor del 80% del efecto total, seguido a mucha distancia por el dióxido de carbono. El efecto invernadero es fundamental en el clima de nuestro planeta y ha permitido la vida al menos en la forma que la conocemos y cualquier alteración en dicho mecanismo modificaría el clima (Alonso, 2011).

En cualquier caso, el balance de energía del sistema climático puede verse alterado por una serie de causas que pueden dividirse en ser internas y externas. Entre las **causas internas** al sistema climático destacan:

1. Desigual distribución del balance energético según la latitud del planeta. A pesar de que globalmente nuestro planeta está en equilibrio de radiación, dicho equilibrio no ocurre en cada lugar. Así, en latitudes altas hay un déficit de energía mientras que en latitudes bajas hay un superávit.
2. Dinámica interna del sistema para reequilibrar las diferencias entre latitudes. Los dos grandes fluidos de la Tierra (océanos y atmósfera) por medio de corrientes marinas (circulación

termohalina) y vientos tienden a disminuir la diferencia entre latitudes bajas y altas respecto al aporte neto de energía.

3. Cambios en la composición atmosférica. El efecto invernadero está provocado por la diferente absorción de la radiación solar y de la radiación terrestre por parte de la atmósfera. Dicha absorción la realizan los gases que constituyen la atmósfera y también las partículas que se encuentran en suspensión en el aire. Por ello, cualquier cambio en la composición atmosférica o en la concentración de sus componentes altera sus propiedades de absorción y por tanto el efecto invernadero, aunque los mayores contribuyentes son el vapor de agua y el CO₂ (Duarte *et al.*, 2009).
4. Presencia de aerosoles en la atmósfera. En la atmósfera podemos gran cantidad de partículas materiales en suspensión (denominadas aerosoles). Se originan en el suelo y sobre toda en la superficie de los océanos (formación de nubes). Además las erupciones volcánicas y las actividades humanas también introducen estos aerosoles en la atmósfera. Los aerosoles tienen dos efectos sobre el clima: un efecto directo sobre el albedo (que provoca una disminución de la temperatura) y otro indirecto al modificar las condiciones en que se forman las nubes y su duración, aunque las consecuencias de este efecto indirecto no se conocen bien (Alonso, 2011).
5. Influencia de las nubes. Las nubes pueden favorecer o disminuir el efecto invernadero en función de su tipo y altura. Las nubes altas dejan pasar la radiación procedente del sol pero absorben la terrestre, mientras que las nubes medias prácticamente no permiten el paso de la radiación solar (Duarte *et al.*, 2009; Alonso, 2011).

La modificación del balance de energía también puede producirse por causas externas al sistema climático, como la actividad solar, el movimiento relativo entre la Tierra y el sol y, excepcionalmente, el impacto de meteoritos o cometas.

Por lo que se refiere a la actividad solar, se conocen cambios que se produjeron en el pasado, siendo el más conocido el denominado Mínimo de Maunder, que ocurrió entre los años 1350 y 1850, coincidiendo con la denominada Pequeña Edad de Hielo (Alonso, 2011). No obstante, no se conoce con exactitud la respuesta del sistema climático frente a estos ciclos en la actividad del Sol (Duarte *et al.*, 2009).

En cuanto a los movimientos relativos entre la Tierra y el Sol hay que señalar en nuestro planeta gira alrededor del Sol influido por tres parámetros básicos (ver figura 2) que modifican los movimientos de traslación y rotación del planeta, según la *Teoría de los ciclos de Milankovitch* (Berger, 1988)). Milankovitch postula un control orbital sobre los cambios climáticos de carácter periódico que se han producido a lo largo de la historia de la Tierra y que tienen frecuencias de decenas a cientos de miles de años, por su teoría se denomina también Teoría Astronómica del Cambio Climático (Martín-Chivelet *et al.*, 2015). En cualquier caso, los parámetros que explican esta Teoría son:

- **Excentricidad** de la órbita.
- **Oblicuidad** (inclinación del eje).
- **Precesión** (giro del eje de rotación).

La **excentricidad** hace referencia a la desviación de la órbita respecto a una circunferencia perfecta. La órbita que describe la Tierra en su desplazamiento de traslación alrededor del Sol es elíptica (moderadamente) por lo que en algún momento del año nuestro planeta estará más cercano al mismo, recibiendo mayor cantidad de radiación solar. La excentricidad de esta elipse varía entre sus valores extremos con una periodicidad aproximada de unos 100.000 años⁴, lo que provoca que la Tierra se encuentre a una distancia del Sol que no viene siendo igual año tras año al recorrer su órbita y que, además es cambiante (Alonso, 2011). Las variaciones en la excentricidad afectan de notablemente a la energía solar que incide en el perihelio (Sol más cerca: 146 millones de kilómetros) y en el afelio (Sol más alejado: 151 millones de kilómetros) en el *tope de la atmósfera* (frontera de la Tierra con el espacio exterior). Actualmente, dicha diferencia es de un 3,5 %. La diferencia de insolación se incrementa cuando la excentricidad es mayor y se reduce cuando es menor. En los períodos de excentricidad máxima, la diferencia de insolación incidente en *tope* superior de la atmósfera entre el día del perihelio y el del afelio alcanza un valor de un 30 %. (Uriarte, 2010).

⁴ La órbita de la Tierra, aunque suele representarse como una elipse bastante achatada se aproxima bastante a una circunferencia, por lo que su excentricidad es muy baja (actualmente 0,0167). Dicha excentricidad varía gradual y periódicamente a lo largo del tiempo, oscilando entre muy baja (0,0005) y bastante baja (0,0607). Aunque se da un valor medio de 100.000 años (100 kiloños, ka) esta variación es compleja, ya que es resultado de la superposición de varias frecuencias (405, 95, 124, 99, 131 y 2.380 ka) aunque normalmente se asume la existencia de dos ciclos dominantes, uno de 405 ka y otro de aproximadamente 100 ka (Martín-Chivelet *et al.*, 2015).

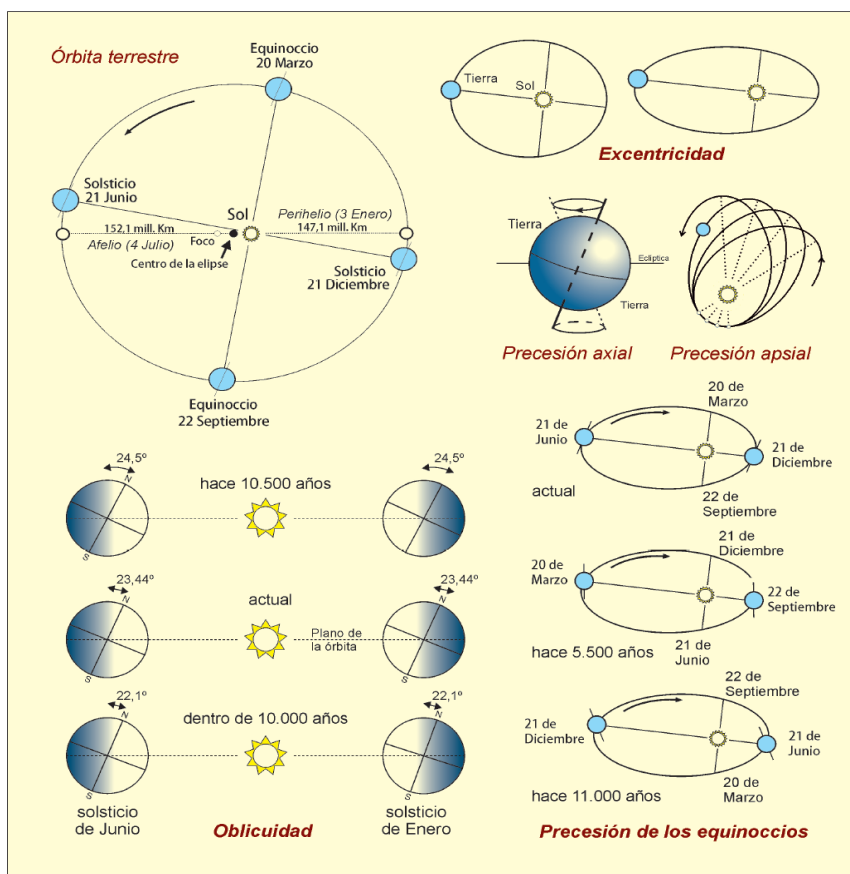


Figura 2. Parámetros fundamentales de la órbita terrestre y ciclos orbitales (Ciclos de Milankovitch). Según Martín-Chivelet *et al.*, 2015.

Por otro lado, la inclinación del eje del planeta en relación al plano de la órbita se denomina **oblicuidad** y no es constante en el tiempo sino que la prolongación del eje de rotación señala puntos diferentes de la cúpula celeste en ciclos de aproximadamente 41.000 años (Duarte *et al.*, 2009). El ciclo de oblicuidad define cambios en ese ángulo, que varía de forma muy regular entre 22,1 y 24,5 grados (Laskar *et al.*, 2004); si el ángulo fuese cero no habría estaciones (Uriarte, 2010). En la actualidad el valor de la oblicuidad es de 23,44 grados y está disminuyendo (Martín-Chivelet *et al.*, 2015). Al aumentar la inclinación del eje terrestre, los inviernos se hacen más fríos y los veranos más cálidos. Este parámetro no cambia la cantidad de radiación que recibe nuestro planeta, aunque si su distribución sobre la superficie (Alonso, 2011).

Por último, la elipse orbital cambia de orientación en el espacio, dando lugar a lo que se denomina ***precesión de los equinoccios***. Esto provoca que las estaciones astronómicas ocurran en diferentes lugares de la órbita con una periodicidad de unos 21.000 años⁵. La precesión es debida al achatamiento de nuestro planeta y su efecto sobre el clima es consecuencia de la modificación de la posición relativa de solsticios y equinoccios respecto a la mayor o menor cercanía de la tierra al sol. Este parámetro es más determinante en las zonas tropicales que en las polares, en las que influye especialmente la inclinación del eje (Uriarte, 2010).

El resultado final de los tres parámetros que intervienen en el movimiento relativo entre la Tierra y el Sol, modifican la energía que incide en el sistema climático, que además se distribuye de forma diferente sobre la superficie del planeta. Así, agrupando los efectos de los tres parámetros de los ciclos de Milankovitch el mínimo de insolación (máximo frío) que facilitaría el aumento de la superficie ocupada por los casquetes polares, se corresponderían con la mayor distancia al Sol, que esta ocurriese en el mes de diciembre y con la máxima inclinación del eje terrestre. La teoría de los ciclos de Milankovitch permite explicar, junto con algún mecanismo interno la sucesión de eras geológicas, con glaciaciones y periodos interglaciares.

Milankovitch mantenía que la fuerza que impulsó las glaciaciones no era la insolación total sino la insolación en altas latitudes del hemisferio Norte durante el verano cuyas variaciones pueden llegar a ser del 20% en función de los valores que adopten excentricidad, oblicuidad y precesión (Berger, 1988). Así, la glaciación debía de producirse cuando en latitudes altas y durante el verano, la intensidad de la insolación fuese especialmente débil. Esto sucede cuando el eje de rotación de la Tierra está muy poco inclinado (oblicuidad baja) y cuando el punto más alejado de la órbita terrestre con el Sol (el “afelio”) coincide con el verano. Por tanto, la clave no estaba tanto en la nieve que pudiera acumularse en invierno en las zonas polares, sino en la menor fusión del mismo en los meses de verano, factor crítico en el crecimiento del casquete polar. Milankovitch reconocía las latitudes altas del

⁵ En realidad, este valor es el resultado de dos tipos de “precesiones”: la primera es la “***precesión axial***”, un “cabeceo” similar al que describe una peonza que gira inclinada sobre una superficie horizontal (dicho giro tarda unos 26.000 años en completarse) y la segunda es la “***precesión apsidal***”: la línea que une los ápsides de la Tierra (eje mayor de la elipse orbital) rota lentamente en torno al Sol completando un giro completo cada 112.000 años; la combinación de las dos “precesiones” resulta en la precesión de los equinoccios que tiene un período promedio de unos 21.000 años, con dos picos espectrales principales de 23.000 y 19.000 años (Martín-Chivelet *et al.*, 2015).

Hemisferio Norte como el área clave para que las variaciones en la insolación tuviesen un mayor efecto climático (Martín-Chivelet *et al.*, 2015).

Algunos investigadores, señalan que la Tierra durante el Pleistoceno tiende a un estado glacial, que es roto en ocasiones por periodos interglaciales. La oblicuidad es más determinante que la precesión y que la excentricidad en esas rupturas de equilibrio (Huybers & Wunsch, 2005). Los ciclos glaciales durante la primera mitad del Pleistoceno (cuaternario) seguirían claramente la periodicidad de unos 41.000 años, debido a los deshielos de Groenlandia y de la costa de la Antártida Oriental. Después en el último millón de años, el aumento del frío en los márgenes de la Antártida Oriental haría que se deshelase con mayor dificultad, tal y como ocurre en la actualidad, por lo que el efecto de la oblicuidad quedaría más difuminado y prevalecerían los ciclos de unos 100.000 años, en los cuales aparece con mayor claridad la influencia de las otras variantes orbitales, la precesión y la excentricidad (Raymo, 2006).

La última causa externa que puede originar modificaciones en el clima de nuestro planeta es el impacto de meteoritos o cometas. Se trata de algo difícilmente predecible pero que según el tamaño que presenten puede tener importantes repercusiones sobre el clima de la Tierra. la extinción de algunas especies como los dinosaurios parece que tuvo su origen en el impacto de un meteorito o puede que un cometa (Duarte *et al.*, 2009).

3.- EL PASADO DEL CLIMA DE LA TIERRA

Por otro lado, a pesar de que conocemos con bastante exactitud cómo se ha comportado el clima en los últimos dos siglos (época instrumental), sabemos también con cierto nivel de detalle cómo fue su evolución los siglos anteriores, pero si nos remontamos más atrás en el tiempo, la información presentan numerosas lagunas, tanto más cuanto más lejos se encuentre en el tiempo. A pesar de la dificultad, nuestro conocimiento sobre el clima del pasado remoto no para de crecer, hasta el punto de poder estar razonablemente seguros de algunos hitos que ocurrieron en esa “historia” del clima.

En cualquier caso, sintetizar en unas pocas páginas el pasado geológico del clima de la Tierra (Paleoclimatología) no es una labor sencilla, aunque es algo necesario si queremos profundizar en el conocimiento del complejo sistema climático de nuestro planeta. Esto último resulta a su vez fundamental para el desarrollo de los modelos climáticos, gracias a los cuáles podemos realizar las proyecciones del clima futuro con un menor grado de incertidumbre.

Desde la aparición de nuestra especie en la Tierra, la vida del hombre ha estado estrechamente ligada a las condiciones climáticas de su entorno físico. Dichas condiciones, han moldeado nuestras costumbres, los rasgos culturales, y han sido determinantes en la expansión o reducción de la población a lo largo de la historia, en la escasez o abundancia de alimentos (que condicionó a su vez la práctica del nomadismo o el sedentarismo), en las estructuras jerárquicas de las sociedades, así como en nuestras creencias.

El continuo cambio de las condiciones climáticas a través de la historia, se conoce gracias a los métodos directos e indirectos de estudio de los climas del pasado de la Paleoclimatología. Dichos cambios están generados por diversidad de factores naturales, tanto internos como astronómicos, a pequeña o gran escala temporal, ayudando a establecer, por medio de su conocimiento, lo que constituye variabilidad climática y cambio climático.

3.1.-EL CLIMA ANTES DEL CUATERNARIO (4.500 Millones de años a 2,6 Millones de años)

Este larguísimo periodo que analizamos en este apartado, abarca la evolución del clima en nuestro planeta antes de las glaciaciones del cuaternario (quinta y última era glacial). Durante este vasto período de tiempo han tenido lugar el resto de las grandes eras glaciales o edades de hielo (Huroniana, Criogénicas, Andina – Sahariana y Karoo), que no debemos de confundir con las glaciaciones. A pesar de ello, durante la mayor parte de la historia (más del 85% del tiempo) de nuestro planeta el clima ha sido mucho más caluroso que el actual:

A pesar de que, desde el punto de vista geológico, en este gran apartado se analizan diferentes escalas: **Eones** (Precámbrico), **Eras** (Paleozoico y Mesozoico) y **Periodos** (Terciario), desde el punto de vista del clima tiene en común que el grado de información sobre ellos es muy inferior al que tenemos del cuaternario. En cualquier caso, dividiremos este apartado en cuatro: **Precámbrico** (4.500 Ma⁶ – 542 Ma), **Paleozoico** (542 Ma - 251 Ma), **Mesozoico** (251Ma-66 Ma) y **Terciario** (66 Ma a 2,6 Ma)

3.1.1.-Precámbrico (4.500 Millones de años – 542 Millones de años)

Los tres primeros grandes periodos de la Tierra (Hádico, Arcaico y Proterozoico)⁷ se denominan conjuntamente Precámbrico. Abarca unos 4.000 Ma, el 88% de toda la historia del planeta. Sin embargo, debido a su antigüedad y a la ausencia de fósiles es el Eón más desconocido.

Desde su formación, hace aproximadamente unos 4.500 Ma, hasta hace unos 3.800 Ma, la superficie terrestre bullía de calor y de energía. Al irse enfriando el magma paulatinamente, algunos minerales fueron cristalizando formando la litosfera, una delgada envoltura sólida, que recubre el planeta desde entonces. El planeta giraba más deprisa por lo que los días y las noches eran más cortos. La superficie, entre

⁶ Ma equivale a millones de años.

⁷ Hádico (4.600 Ma a 4.000 Ma), Arcaico (4.000 Ma a 2.500 Ma), Proterozoico (2.500 Ma a 542 Ma). En el periodo Hádico, se va enfriando poco a poco la superficie terrestre, formando una corteza sólida más o menos estable; los gases que escapan forman la atmósfera primitiva. En el periodo Arcaico el planeta tiene una temperatura superficial elevada (unos 30 °C) ya que aunque el Sol emitía menos energía, el propio calor del planeta y el efecto invernadero lo compensaban; No existían zonas glaciares. En el periodo Proterozoico se producen grandes variaciones climáticas, con dos glaciaciones, una al comienzo (Huroniana) y otra al final (Criogénica).

sólida y viscosa, burbujeante e incandescente, presentaba numerosos cráteres y chimeneas volcánicas de las que salían sustancias volátiles procedentes del interior de la Tierra. Algunos de esos gases, como el hidrógeno, demasiado ligeros, se escapaban para al espacio exterior; otros, como el amoníaco, eran descompuestos por la radiación solar. Los gases más pesados, que la gravedad mantuvo cerca de la superficie terrestre, fueron formando la atmósfera primitiva de la Tierra, que era bastante diferente a la actual. En las capas bajas del aire la temperatura era muy alta por la abundancia de gases de efecto invernadero (Uriarte, 2010).

Al enfriarse poco a poco la superficie terrestre, el agua en estado líquido fue predominando sobre el vapor de agua. Las lluvias fueron rellenando las depresiones de la litosfera, dando lugar a los primeros océanos. Con una menor cantidad de vapor de agua en la atmósfera (potente gas de efecto invernadero), se producía una disminución de la temperatura del aire. Cuando la mayoría del agua de nuestro planeta se encontraba en estado líquido se dieron las condiciones para la aparición de la vida. Aunque no se sabe cuándo, ni dónde, comenzó la vida en la Tierra, Dodd *et al.*, (2017), señalan que algunos de los ambientes habitables más tempranos pudieron haber sido fosas hidrotermales, donde han encontrado microorganismos fosilizados con una antigüedad de al menos 3.770 millones y posiblemente de 4.280 millones

En cualquier caso, la principal característica de la atmósfera de la Tierra, durante muchos cientos de Ma, era que el aire apenas contenía unas trazas de oxígeno⁸. Esto empezó a cambiar con la aparición y desarrollo de organismos que realizaban la fotosíntesis. Así, entre hace unos 3.500 y 2.700 Ma, las cianobacterias aparecieron en las aguas costeras de los continentes primigenios. Dichas cianobacterias producían hidratos de carbono y oxígeno a partir de CO₂ y agua, empleando la luz solar como fuente energética. A lo largo de la historia de nuestro planeta, las cianobacterias han sido los principales organismos creadores de oxígeno. Son capaces de vivir en ambientes anóxicos, pero, a diferencia de lo que ocurre con otras bacterias, el oxígeno no es un toxico para ellas. Al contrario, proliferaron en el propio entorno oxigenado que ellas mismas fueron creando. No obstante, durante los primeros cientos de Ma de existencia de las cianobacterias, la diferencia entre el carbono orgánico producido y el consumido era muy pequeña y el oxígeno atmosférico prácticamente no aumentaba. (Uriarte, 2010).

⁸ En la actualidad el oxígeno constituye el 21 % de los gases de la atmósfera y la Tierra es el único planeta del Sistema Solar con una atmósfera oxigenada.

Las cosas cambiaron entre hace unos 2.500 y 2.300 Ma cuando la producción fotosintética comenzó generar más oxígeno que lo que se perdía en la oxidación de materia orgánica y de minerales ferrosos, facilitando que se incrementase rápidamente su concentración en la atmósfera. A su vez, las cianobacterias aeróbicas, fotosintéticas, se vieron favorecidas y se multiplicaron exponencialmente, llegando a proliferar en todos los mares. Así, el oxígeno alcanzó en relativamente poco tiempo niveles comparables a los de la atmósfera contemporánea: un 21 % de la mezcla de gases que componen el aire. Sin embargo, para algunos autores, el proceso de acumulación de oxígeno fue más lento, por lo que no se alcanzaron los niveles actuales hasta hace unos 600 Ma, como lo probaría la aparición en esa época de seres vivos celularmente más complejos, que necesitaban más oxígeno y que pudieron aprovecharse de un volumen adecuado para desarrollarse (Lenton & Watson, 2004).

Una vez que el oxígeno alcanzó un nivel suficientemente abundante en la atmósfera y con la ayuda de la radiación solar permitió la formación de ozono (O₃). Por su capacidad de absorción de la radiación solar ultravioleta de tipo B, letal si es intensa, el ozono contribuiría a que fuese más fácil la vida al descubierto en la superficie de océanos y continentes (Uriarte, 2010).

Las primeras evidencias de glaciaciones en los continentes primitivos corresponden al período huroniano, entre hace unos 2.700 Ma y 2.300 Ma (Hyde *et al.*, 2000). Esta glaciación (sería más adecuado decir glaciaciones, pues al parecer hubo al menos tres fases muy frías), afectó a gran parte del planeta y se habría debido al efecto depredador del oxígeno, generado por las cianobacterias, sobre el metano⁹, que por su alta concentración habría sido hasta entonces el principal gas de efecto invernadero. En este sentido, la concentración de metano en la atmósfera hace 2.300 Ma pudo ser mil veces superior a la actual.

Con posterioridad a las glaciaciones huronianas el clima se volvió nuevamente muy cálido y desde hace 2.300 Ma hasta hace 750 Ma (un intervalo de casi mil quinientos Ma), no se encuentran indicios de la existencia de más glaciaciones (Uriarte, 2010).

⁹ Algunos investigadores creen que la atmósfera del período Arcaico estaba compuesta esencialmente de nitrógeno y de metano. Aunque actualmente el metano tiene una duración media en la atmósfera de tan sólo diez años, debido a que se oxida, antes de la acumulación de oxígeno en el aire el metano permanecían durante mucho más tiempo en la atmósfera (miles de años) lo que permitía que su concentración fuese muy elevada. Ese metano provenía de volcanes, o de bacterias metanogénicas del reino de las arqueas, que vivían en las condiciones sin oxígeno de aquella atmósfera. (Uriarte, 2010).

Entre hace unos 750 y 580 Ma, se observan indicios de nuevas glaciaciones (Criogénicas o Neoproterozoicas), seguramente las más intensas que ha habido nunca. Estas glaciaciones fueron probablemente varias y duraron varios Ma cada una (MacDonald *et al.*, 2010), aunque la explicación de aquellos profundos cambios climáticos permanece aún bastante oscura. La teoría más extrema (“Tierra bola de nieve”) es que fueron glaciaciones globales, en las que prácticamente todos los mares estaban cubiertos por una banquisa helada que podía tener un espesor de hasta mil metros de hielo. No obstante, los animales multicelulares, que ya se encontraban en los océanos, lograron subsistir. Es posible que no se congelara toda el agua sino únicamente la capa más superficial, permitiendo la penetración de la luz solar y la continuación de la vida fotosintética bajo ella. Además, en los fondos marinos, seguiría actuando la actividad hidrotermal, incluso en los periodos más fríos, permitiendo la conservación del calor en las aguas profundas (Mckay, 2000).

3.1.2.- Paleozoico (542 Millones de años - 251 Millones de años)

Hace algo más de 540 Ma la evolución de la vida se aceleró en los océanos (“explosión cámbrica”)¹⁰. El número de especies se multiplicó rápidamente y se modificaron los tamaños y las formas corporales de los animales marinos. A diferencia de los restos de los animales anteriores, pequeños y de cuerpos blandos, por lo que desaparecían sin dejar huella, las nuevas especies desarrollaron caparazones y esqueletos calcáreos, duros, que han facilitado su conservación fosilizada. La abundancia de estos fósiles aporta muchos datos que son fundamentales para entender los cambios ocurridos desde entonces en la geología y en el clima. Por este motivo, al último gran periodo geológico (*Eón*), que comienza entonces y dura hasta la actualidad, recibe el nombre de Fanerozoico, del griego “phanero” (visible o evidente) y “zoe” (vida). El Fanerozoico se divide en tres grandes Eras¹¹: el Paleozoico (vida antigua), el Mesozoico (vida media) y el Cenozoico (vida nueva) (Uriarte, 2010).

¹⁰ La “explosión cámbrica” o “radiación evolutiva del Cámbrico” fue la aparición repentina (desde un punto de vista geológico) y rápida diversificación de organismos macroscópicos multicelulares complejos en los inicios del periodo Cámbrico. Este período marca una brusca transición en el registro fósil con la aparición de los miembros más primitivos de muchos animales multicelulares.

¹¹ Las tres Eras del Fanerozoico reflejan, simplificando notablemente, las tres divisiones clásicas de la historia de la vida del planeta: el **Paleozoico** (antes Era Primaria) representa la «era de los peces», el **Mesozoico** (antes Era Secundaria) la «era de los reptiles» y el **Cenozoico** (antes Era Terciaria) la «era de los mamíferos». El paso de una Era a otra está definido grandes extinciones globales, que suponen una renovación significativa de los seres vivos del planeta (marinos y terrestres).

Diversos autores creen que la aceleración evolutiva de la vida en nuestro planeta fue provocada por importantes cambios en la geografía de mares y continentes, originando alteraciones en las corrientes oceánicas, así como en la temperatura y salinidad de las aguas (Kirschvink *et al.*, 1977). Otros investigadores creen que la aparición en aquella época de seres vivos más grandes y celularmente más complejos, se debió a que pudieron aprovecharse de una concentración suficiente de oxígeno, similar al de la atmósfera actual (Lenton & Watson 2004). De nuevo la vida favorecería el incremento de oxígeno atmosférico (Kennedy *et al.*, 2006).

En relación al clima general durante los primeros 100 Ma del Paleozoico, se conoce muy poco ya que la vida vegetal y animal terrestre no había evolucionado lo suficientemente para dejarnos información en el registro fósil continental. No obstante, sabemos que las tierras emergidas todavía no estaban pobladas por plantas. Lo que parece probable es que, con unos mares más extensos que los actuales, el clima general debió ser más oceánico y templado, con menores oscilaciones estacionales. Los mares se adentraban en el interior de los continentes con grandes zonas de aguas poco profundas, ricas en nutrientes, que favorecieron un rápido desarrollo de la diversidad animal. (Uriarte, 2010).

Posteriormente, entre hace 450 y 430 Ma tuvo lugar una nueva glaciación (glaciación del Ordovícico o Andino-Sahariana), afectando gravemente a la diversidad animal oceánica (trilobites, equinodermos, etc.), lo que provocó la segunda extinción más importante de todos los tiempos. Durante esta glaciación se produjo una aparente contradicción ya que, según algunos análisis, la concentración de CO₂ durante aquel período era más de 12 veces superior a la actual (5.000 ppm). No obstante, un estudio, con una estratigrafía más detallada demuestra que el aumento del CO₂ se produjo como consecuencia de la glaciación y en respuesta a la expansión de los mantos de hielo, la cual provocó una disminución de la absorción de CO₂ por meteorización de los silicatos. En este estudio se sostiene que tras el incremento de la concentración de CO₂ se produjo una recesión de los glaciares –desglaciación- (Young *et al.*, 2010).

Después del periodo glacial del Ordovícico (glaciación Andino-Sahariana) se produjo un incremento de las temperaturas, que se mantuvieron elevadas hasta hace unos 300 Ma. La humedad, el calor y una atmósfera rica en CO₂ favorecieron el desarrollo evolutivo y la colonización de los continentes por parte de la vegetación. Al comienzo de este extenso período cálido, hace unos 420 Ma, aparecieron las plantas vasculares, con tallos rígidos y tejidos compuestos por una nueva sustancia orgánica, la lignina, que les daba el soporte estructural necesario para poder crecer

en vertical y que es bastante resistente a la degradación y a la oxidación. Además, este clima húmedo y cálido favoreció la aparición de bosques de árboles grandes y de ciclo corto, que al caer y ser arrastrados por el agua aportaban a marismas y pantanos grandes cantidades de carbono orgánico contenido en la lignina. Al no haber suficiente oxígeno disuelto en el agua para oxidarlo todo, ni tampoco bacterias aeróbicas suficientes para llevar a cabo la descomposición, el enterramiento de materia orgánica¹² fue un proceso continuo. (Uriarte, 2010).

Aproximadamente, hace 300 Ma, al haber sido ya retenido en los sedimentos una enorme cantidad de carbono orgánico absorbido por la vegetación y que procedía del CO₂ atmosférico, los niveles en el aire de este gas de efecto invernadero disminuyeron hasta niveles muy bajos, similares a los actuales. De forma paralela, la concentración de oxígeno en la atmosfera alcanzó un 35 %, seguramente su máximo histórico (Berner, 1999). El clima se enfrió y la Tierra entró en un nuevo período glacial (Glaciación del final del Carbonífero o Karoo).

Por otro lado, hay que destacar que hace unos 250 Ma, en la etapa de transición entre el Paleozoico y el Mesozoico, tuvo lugar la mayor extinción biológica que ha sufrido el planeta, la catástrofe P/T (denominada así por haber tenido lugar entre el Pérmico, último período del Paleozoico, y el Triásico, primer período del Mesozoico). En un corto periodo de tiempo (unos pocos miles de años) desaparecieron de nuestro planeta el 95 % de las especies marinas y el 70 % de los vertebrados terrestres. Incluso los insectos se extinguieron casi completamente. Por tanto, el colapso de la productividad biológica en mares y océanos ocurrió en paralelo con el desastre ecológico en los continentes (Ward *et al*, 2000). Existen varias teorías sobre las causas de la catástrofe, aunque las principales son dos: el choque de un gran asteroide (Von Frese *et al.*, 2009) y erupciones volcánicas masivas (Reichow, 2002). A ellas se añade la de una posible disminución del oxígeno. En este sentido, hay quien cree que la extinción no fue tan rápida y se debió a una caída muy importante de la concentración de oxígeno en la atmósfera bajó del 35 % al 15% al final del período (Berner, 1999). Esto restringió mucho la extensión de las zonas habitables ya que la reducida presión parcial de oxígeno por encima de unos pocos centenares de metros de altitud hacía la vida inviable para numerosas especies (Huey & Ward, 2005).

¹² Frecuentemente, con el paso del tiempo, la materia orgánica acababa convertida en carbón, roca que da nombre al período geológico conocido como Carbonífero.

3.1.3.- Mesozoico (251 Millones de años -66 Millones de años)

El Mesozoico comienza, aproximadamente, hace 251 Ma y finaliza hace 66 millones¹³. A diferencia del Paleozoico, no hay constancia de que se produjese ninguna glaciación importante.

Durante el Triásico, primer período del Mesozoico, destaca la existencia de un continente único y compacto (Pangea) rodeado de un océano que produjo un clima árido en vastas extensiones del interior de los continentes (con grandes zonas desérticas). Por el contrario, algunas zonas tropicales y medias de Pangea más próximas al mar debieron estar sometidas a un clima de tipo monzónico, con lluvias estivales (Loope *et al.*, 2001). Por ello, el clima del Triásico fue, en general, seco y muy estacional, con veranos muy calurosos e inviernos muy fríos. En la parte final del Triásico, hace unos 210 Ma, Pangea comenzó a fracturarse a lo largo de una línea de ruptura por donde salían grandes coladas de basaltos y gases como el SO₂ (óxido de azufre) que causaron importantes cambios químicos en la composición de la atmósfera y en el clima, repercutiendo enormemente en la vida de la Tierra planeta (Ward *et al.*, 2001), provocando la extinción masiva del Triásico-Jurásico¹⁴, una de las cinco grandes extinciones de nuestro planeta, en la que desaparecieron más del 75% de las especies, lo que probablemente facilitó la aparición de los dinosaurios, que dominarían la Tierra durante los siguientes cien Ma.

Por otro lado, durante todo el periodo Jurásico (desde hace 201 millones hasta hace 145 Ma) la progresiva fragmentación y división de Pangea provocó un clima global más húmedo. El nivel del mar comenzó a subir por lo que el agua de los océanos, al adentrarse en tierra, inundaba grandes regiones continentales, creando nuevos mares. Esta mayor extensión de las tierras inundadas provocó una disminución del albedo de nuestro planeta, aumentando la absorción de la energía solar. El efecto invernadero ocasionado por la mayor humedad del aire hizo que el clima global fuese también más cálido. El clima húmedo y caluroso permitió que la vegetación fuese más rica que durante el Triásico (Uriarte, 2010).

¹³ La Era Mesozoica se divide en tres periodos: **Triásico** (desde hace 251 millones hasta hace 201 Ma), **Jurásico** (desde hace 201 Ma hasta hace 145 Ma) y **Cretácico** (desde hace 145 millones hasta hace 66 Ma).

¹⁴ Algunos autores señalan otras posibles causas de esta catástrofe, como la rápida variación en el nivel de los mares (Tanner *et al.*, 2001) o el choque de algún asteroide (Olsen *et al.*, 2002).

El Cretácico, último periodo del Mesozoico, que comenzó hace unos 145 Ma y llegó hasta la extinción de los dinosaurios, hace unos 65 Ma, tuvo también en su mayor parte un clima cálido y húmedo. Así, hace unos 100 Ma, la temperatura media de la superficie de la Tierra era entre 6°C y 12°C mayor que la de hoy. Los dinosaurios, más afines a climas cálidos que fríos, habitaban casi todas las regiones emergidas del planeta. Se cree que el enorme tamaño de muchos de ellos sólo era posible por la existencia de gran abundancia de biomasa vegetal, favorecida por el calor, la humedad y una elevada concentración de CO₂. Gracias a estudios de fósiles se calcula que las aguas tenían una temperatura media de entre 15°C y 20°C (Jenkyns *et al.*, 2004). Plantas y animales, que actualmente son típicos de climas cálidos, vivieron en latitudes muy altas, casi polares (Maurer, 2002).

Durante la última parte del Cretácico, desde hace unos 80 Ma hasta hace unos 66 Ma, disminuyó de manera notable la concentración de CO₂ atmosférico, a la vez que el mar se retiraba de los continentes. La retracción de mares y océanos dejaba un paisaje de lagos y marismas de aguas superficiales donde se producían grandes enterramientos de materia orgánica. Por todo ello, la atmósfera terrestre perdió una gran cantidad de CO₂, cuya concentración disminuyó hasta unas 600 ppm a finales del Cretácico. A pesar de que el clima se enfrió considerablemente siguió siendo cálido (Uriarte, 2010).

Al final del Cretácico, en el episodio K/T¹⁵, hace unos 66 Ma, se produjo la extinción de numerosas especies que habían dominado la vida de mares y continentes. En los océanos desaparecieron los ammonites y una gran cantidad de plancton, mientras que en los continentes se extinguieron, más o menos súbitamente, los dinosaurios, según diferentes y controvertidas teorías. La relación entre la extinción de los dinosaurios y otras especies con un brusco cambio climático parece la hipótesis más probable. No obstante, las causas que originaron este cambio climático no están claras: el choque de un gran meteorito o un incremento de la actividad volcánica¹⁶.

La hipótesis más probable relaciona la extinción de los dinosaurios con un repentino cambio climático, que pudo ser provocado por el choque de un gran meteorito (Schulte *et al.*, 2010). Esta hipótesis fue planteada inicialmente por

¹⁵ Nombre derivado del alemán Kreide/Tertiär (Cretácico/Terciario), que actualmente se denomina K/Pg (Cretácico/Paléogeno)

¹⁶ Un trabajo de RICHARDS *et al.* (2015) propone que el impacto del meteorito de Chicxulub desencadenó una fase paroxísmica de vulcanismo en el Decán (India), aunando las dos opciones

Álvarez *et al.*, 1980, al encontrar en una capa de arcillas de finales del Cretácico grandes concentraciones de iridio, elemento muy raro en la tierra pero muy común en los meteoritos. Posteriormente, la hipótesis adquirió más fuerza cuándo se encontró en la Península de Yucatán (Chicxulub) un cráter de 180 km de diámetro, probablemente provocado por el choque de un asteroide de unos 10 km de diámetro¹⁷.

La otra hipótesis es que fueron las erupciones volcánicas la causa principal de la gran extinción de finales del Cretácico. Las extensas plataformas basálticas de la meseta del Decán, en la India, se formaron más o menos entonces, e indican que fue una época de fuerte actividad volcánica (Uriarte, 2010).

Con los datos actuales, Anguita *et al.*, (2016) consideran que la hipótesis más probable para explicar la extinción de los dinosaurios hace unos 66 Ma (extinción masiva del Cretácico/Paleógeno -K/Pg-) fue la colisión de un asteroide, ya que aunque las emisiones volcánicas de la provincia del Decán fueran importantes en los últimos cientos de miles de años del Cretácico, es muy improbable que por sí solas hubiese conducido a un evento de extinción masiva¹⁸.

3.1.4.-Terciario (66 Millones de años a 2,6 Millones de años)

El período Terciario, no reconocido hoy en día por la CIE (Comisión Internacional de Estratigrafía)¹⁹, comprendía la Era Cenozoica, excepto los últimos 2,6 Ma, que es cuando se inicia el período Cuaternario. El Terciario incluye las siguientes épocas geológicas: Paleoceno, Eoceno, Oligoceno (*las tres forman el periodo Paleógeno*), Mioceno y Plioceno (*estas dos últimas constituyen el periodo Neógeno*).

¹⁷ Se especula que el enorme impacto lanzó a la estratosfera gigantescas cantidades de polvo que causaron varios meses (incluso años) de oscuridad y frío, lo que afectó a la actividad fotosintética en mares y continentes, repercutiendo posteriormente sobre otros elementos de la cadena trófica.

¹⁸ En cualquier caso, bastantes Ma antes habían empezado a cambiar las condiciones favorables para el desarrollo de los dinosaurios. Estos cambios estaban relacionados con la aparición de las plantas con flores (angiospermas), que empezaban a sustituir a la vegetación que servía de alimento a los dinosaurios. Además, sus hábitats más favorables (sábanas y pantanos), estaban siendo sustituidos por otros y también la atmósfera había empezado a cambiar de forma notable.

¹⁹ La CIE ha sustituido el periodo Terciario por dos nuevos periodos: el Paleógeno (desde hace 66 Ma hasta hace unos 23 Ma) y el Neógeno (desde hace 23 Ma hasta hace unos 2,6 Ma). El Paleógeno destacó por la evolución de los mamíferos a partir de especies pequeñas que a finales del período ya eran muy parecidas a las actuales. El clima se caracterizó por un enfriamiento de las regiones polares. Durante el Neógeno mamíferos y aves se desarrollaron bastante y se produjo la aparición de los Homínidos; el clima se enfrió, culminando con las glaciaciones del Cuaternario.

A lo largo del Terciario se produce un declive de la temperatura media, aunque no fue uniforme en el tiempo, ya que hubo épocas en los que aumentaron las temperaturas y se redujo la extensión de los hielos. Además, existieron periodos de corta duración en los que las temperaturas se incrementaron bruscamente (hace 55 Ma), o disminuyeron drásticamente, hace 34 Ma y 23 Ma (Zachos et al., 2001). Simultáneamente, se produjo una disminución del CO₂ atmosférico, que pasó de una concentración de unas 2.000 ppm al principio de periodo, hace 66 Ma, a unas 300 ppm (Pagani, 2005).

El primer período del Terciario, el Paleoceno (entre hace 66 Ma y 56 Ma), tenía un clima semejante al de las épocas más cálidas del Cretácico. El Ártico tenía una extensión menor que la actual; sus aguas eran mucho menos profundas y saladas pero mucho más cálidas lo que permitía la vida de cocodrilos y tortugas. Las corrientes oceánicas y la circulación termohalina eran también diferentes (Thomas, 2004). Se han postulado diversas hipótesis para explicar este clima cálido de comienzos del Terciario:

- a) una circulación atmosférica con vientos del oeste más intensos alrededor del Ártico, que incrementarían el transporte de masas de aire templadas del Pacífico sobre Norteamérica y Eurasia (Sewall & Sloan, 2001);
- b) una elevada concentración de CO₂ y/o de metano. La elevada concentración de CO₂ atmosférico pudo tener varios orígenes: emisiones de gases magmáticos provocados los continuos movimiento de las placas tectónicas (Storey, 2007), grandes incendios de extensas turberas (Kurtz *et al.*, 2003) o la oxidación de grandes cantidades de metano, que permanecía atrapado en forma de clatratos congelados y que por el calentamiento de las aguas quedó libre (Svensen *et al.*, 2004);
- c) incremento de nubes en la estratosfera, cuyo efecto invernadero originaría un calentamiento en las zonas polares, que reduciría la formación de hielo (tanto continental y marino) y el albedo que traería un clima cálido y más húmedo en todo el planeta (Sloan & Pollard, 1998).

En el límite entre el Paleoceno y el Eoceno²⁰, hace unos 56 Ma, se produjo un súbito calentamiento (Máximo Térmico del Paleoceno Final) que duró unos 80.000

²⁰ El Eoceno comienza hace unos 56 Ma y termina hace unos 34Ma.

años y que tuvo una gran trascendencia en la evolución de la vida animal en nuestro planeta. Este hecho coincidió con un significativo proceso de extinción de fauna oceánica y terrestre y con la aparición de un buen número de nuevos órdenes de mamíferos que, desde entonces, dominan el reino animal. Además, la flora se adaptó, realizando con cambios en la fisonomía de sus hojas y desplazándose hacia latitudes más elevadas (Wing *et al.*, 2005). Las temperaturas continentales se incrementaron entre 5°C y 7°C sobre unos niveles térmicos anteriores que ya eran elevados. También la temperatura de las aguas profundas llegaron a ser unos 12°C superiores a las actuales (Lear *et al.*, 2000). Probablemente, este intenso calentamiento fue provocado por la expulsión del metano enclaustrado en los cristales de hielo de sedimentos del fondo oceánico. La salida del gas pudo ocurrir tras sobrepasar la temperatura de las aguas del fondo marino un determinado umbral de calor que descongeló los hidratos de metano. Es posible que un cambio en la circulación oceánica desencadenase este proceso (Tripathi *et al.*, 2005).

Después del pico de calor del final del Paleoceno, la temperatura media disminuye pero se mantiene elevada durante toda la primera parte del Eoceno hasta que hace unos 50 Ma se invierte la tendencia y las temperaturas comienzan a bajar. Durante todo lo que resta del Eoceno, en casi toda Europa y Asia, el clima pasa a ser más frío y seco. Empieza a forjarse la que va a ser más tarde, a partir del Oligoceno, un clima “nevera” en el que, durante cualquier estación del año, existen abundantes mantos de hielo recubriendo Groenlandia y la Antártida, como sucede actualmente. Uno de los datos más significativos de esta tendencia al frío es la evolución de la temperatura del fondo del mar, que de unos 12°C hace 50 Ma disminuyó a 6°C hace unos 34 Ma. Los factores que se han propuesto para explicar este enfriamiento son: el movimiento de las placas tectónicas, los cambios en las corrientes marinas y la disminución del CO₂ que fue ocurriendo a lo largo de todo el Cenozoico por causas poco claras (Deconto & Pollard, 2003).

Después del prolongado y suave periodo de frío de la segunda parte del Eoceno, a comienzos del Oligoceno²¹, entre hace unos 34 y 33 Ma, se produjo un brusco descenso térmico (la temperatura del agua del fondo del mar descendió por debajo de los 3°C). A consecuencia del frío se produjo una fuerte extinción de especies marinas (Ivany *et al.*, 2000). En cuanto a los continentes, se produjo la transformación de muchas zonas de bosque boreal en áreas de tundra y en zonas más meridionales los paisajes boscosos se convirtieron en paisajes esteparios. Los

²¹ El Oligoceno comienza hace unos 34 Ma y finaliza, aproximadamente, hace 23 Ma.

restos paleontológicos en Europa y Asia muestran importantes cambios de la fauna, con migraciones de animales y extinciones en masa (Meng & Mckenna, 1998). El enfriamiento global del Oligoceno estuvo vinculado a la primera gran acumulación de hielo en la Antártida²², en la que, seguramente, fueron fundamentales los cambios que se promovieron en la circulación oceánica.

En un estudio sobre la evolución de la concentración de CO₂ desde el Eoceno medio hasta el Oligoceno tardío (45 a 25 Ma) se constata que la concentración de este gas a principios del Oligoceno (34 Ma) era de unas 1.500 ppm mientras que al final del mismo (23 millones) había bajado a unas 500 ppm (Pagani *et al.*, 2005). En otro trabajo realizado en la transición entre el Eoceno y el Oligoceno, en un periodo de tiempo mucho más corto²³ y con una metodología muy diferente, se observa también una disminución de la concentración del CO₂ durante el transcurso de la acumulación de hielo en la Antártida (Pearson *et al.*, 2009). El Oligoceno finalizó con un calentamiento, hace unos 25 Ma, que probablemente originó un proceso de deshielo y una subida del nivel del mar (Uriarte, 2010).

La siguiente época, el Mioceno²⁴ presenta un clima cambiante. El periodo de transición con el Oligoceno presenta un corto pico inicial de frío que provocó una brusca bajada del nivel del mar, dejando las plataformas costeras en seco y expuestas a la erosión. Todavía no existían mantos de hielo permanentes en el hemisferio norte, por lo que la fuerte bajada del nivel del mar debió deberse exclusivamente a la acumulación de hielo en la Antártida relacionadas con cambios en los ciclos orbitales semejantes a los descritos por Milankovitch para el Cuaternario (Naish *et al.*, 2001).

Después del periodo inicial de frío, las temperaturas se recuperan durante toda la primera mitad del Mioceno y se mantienen más altas que las del Oligoceno. El volumen de los hielos de la Antártida vuelve a reducirse y se eleva el nivel del mar.

²² La Antártida, a pesar de haber estado centrada en el Polo Sur desde principios del Cretácico, se había mantenido sin hielo, hasta su separación de Sudamérica y de Australia, cuando quedó rodeada por una corriente marina fría (corriente circumpolar antártica) que comenzó a interrumpir la influencia térmica moderadora de aguas de latitudes medias y tropicales, ayudando a formar una extensa banquisa invernal de hielo marino y que después se acumuló en el continente.

²³ El trabajo de Pearson *et al.* (2009) abarca unos 2 Ma (aproximadamente entre hace 33 y 35 Ma)

²⁴ El Mioceno comienza hace unos 23 Ma y finaliza hace unos 5,3 Ma.

El máximo térmico se alcanza en el Mioceno Medio, entre hace 17 Ma y 14,5 Ma, con temperaturas en latitudes medias 6°C superiores a las actuales.

La segunda mitad del Mioceno, (hace unos 14 Ma), es muy diferente a la primera. Así, un estudio del plancton en el suroeste del Pacífico revela un enfriamiento brusco (de 6°C a 7°C) entre hace 14,2 y 13,8 Ma (Shevenell *et al.*, 2004). Las temperaturas disminuyeron bruscamente y se incrementa el hielo continental en la Antártida. Al final del Mioceno, entre hace unos 7 Ma y 5,3 Ma, un manto glacial termina por cubrir tanto el continente austral, como toda Groenlandia. Otro hecho climático importante, que acompaña a este enfriamiento final, es el aumento de la aridez en vastas regiones de Asia y África en la que probablemente tuvieron una influencia importante dos acontecimientos geológicos del Mioceno: el levantamiento del Tibet (sistema de los Himalayas) y la desecación del mar Mediterráneo.

La elevación del Tibet intensificó las lluvias monzónicas estivales que afectan al sur de Asia, a la vez que incrementaba la aridez en extensas áreas interiores de Asia Central y de China, al actuar de barrera frente al aire húmedo proveniente del Indico. Debido al clima húmedo y caluroso de sus vertientes, el Tibet contribuyó a la intensificación de dos importantes procesos de captación del CO₂ atmosférico: meteorización de los silicatos y enterramiento de la materia orgánica, que pudieron provocar en unos pocos Ma una considerable disminución del CO₂ atmosférico y un descenso de la temperatura global del planeta.

En cuanto al Mediterráneo, experimentó repetidas desecaciones entre hace unos 6 Ma y 5 Ma, ya que su conexión con el Atlántico llegó a ser tan restringida que, en periodos de unos miles de años, se abría y se cerraba completamente de forma sucesiva. Esta desecación del mar Mediterráneo influyó en el clima todo el planeta al originar una reducción de la salinidad media de los océanos de un 2 por mil que tuvo repercusiones en la circulación termohalina. Además, al elevarse el punto de congelación del agua marina, por el incremento de la salinidad, la superficie del Ártico se congelaba con mayor facilidad incrementando la superficie ocupada por los hielos.

La última época del período Terciario es el Plioceno, que transcurre entre hace 5,3 y 2,59 Ma. En general, el clima del Plioceno fue en su mayor parte mucho más cálido que el actual. Al comienzo del Plioceno, entre hace 5 millones y 4 Ma, se paró el enfriamiento que había venido ocurriendo en la segunda mitad del Mioceno. Posteriormente, en el Plioceno Medio (entre hace 4 millones y 3 Ma) se cambió la tendencia térmica y temperatura global media de nuestro planeta era probablemente unos 3°C más elevada a la actual (Dowsett *et al.*, 1999). La banquisa del Océano Glacial Ártico se descongelaba totalmente durante la época estival. Proliferan los bosques de coníferas que crecían incluso en la costa norte de Groenlandia, en donde se han encontrado fósiles de árboles de aquella época. No se conoce la causa de este clima tan cálido de mediados del Plioceno, pero se piensa que estaba provocado por una sólida circulación oceánica en el Pacífico y en el Atlántico, tanto en aguas superficiales como profundas.

Durante el Plioceno se produjo otro cambio climático importante, el incremento de aridez en África Oriental que dio lugar a una expansión de las sabanas y a una proliferación de los bóvidos, lo que pudo haber sido un elemento catalizador en la evolución de los homínidos (Kerr, 2001).

Tras este periodo tan cálido del Plioceno Medio se produjo una nueva etapa de frío en la transición entre el Plioceno y el Cuaternario. Así, durante cortos y sucesivos períodos fríos, comenzó a acumularse hielo en el norte de América y de Europa y los icebergs hacían acto de presencia en el norte del Atlántico.

La variabilidad del clima se agudizó, favorecida por los ciclos astronómicos de Milankovitch, en especial por el ciclo de variación de la oblicuidad del eje. Para la formación de los mantos de hielo sobre Norteamérica y Eurasia se necesitaba que las nieves caídas durante el invierno fuesen muy intensas. La corriente del Golfo, reforzada por el cierre del istmo de Panamá, pudo ayudar. La abundante acumulación de nieve resistía el deshielo estival y cuando las condiciones astronómicas eran favorables crecían y avanzaban los mantos glaciales.

3. 2.- CUATERNARIO: PLEISTOCENO (2,6 Ma a 11,500 a).

El Cuaternario²⁵ es el periodo que sigue al Terciario, caracterizado por la sucesión de periodos fríos (glaciaciones) y periodos cálidos (interglaciales), la aparición del Homo anatómicamente moderno y la relativamente buena preservación del registro geológico.

Las anteriores características hacen del Cuaternario el periodo más adecuado para registrar, analizar y comprender tanto el funcionamiento de los procesos geoambientales actuales como su evolución en un pasado reciente sin actividad antrópica. (Moreno *et al.*, 2017). Actualmente, nos encontramos en un período interglacial dentro de la última glaciación, el Holoceno, aunque algunos incluso empiezan a hablar del Antropoceno, para hacer referencia a la época en la cual los seres humanos hemos empezado a influir también en el clima (Viñas, 2013). Debido a la gran importancia del Holoceno le dedicaremos al mismo un apartado específico.

3.2.1.-Pleistoceno (2.59 Millones de años – 11.700 años)

Al final del Plioceno y comienzos del Pleistoceno, las aguas de los océanos comenzaron una fase de enfriamiento general que se había venido produciendo (con algunas excepciones) durante los últimos 50 Ma. Aproximadamente, hace 2,5 Ma el frío tenía suficiente intensidad para que en latitudes altas empezaran a ser abundantes las precipitaciones de nieve por lo que se fueron acumulando profundos mantos de hielo en el norte de Europa y de América. Desde esa época, el clima de nuestro planeta ha estado marcado por una sucesión continua de glaciaciones y períodos interglaciales.

La peculiaridad de las glaciaciones del Cuaternario es la formación a lo largo de su transcurso de dos grandes mantos de hielo en las tierras continentales del norte de América y de Europa, que se suman a los que ya existían anteriormente, de forma más o menos constante, sobre la Antártida y Groenlandia. Estos nuevos mantos de

²⁵ El período Cuaternario es una división geológica de la Era Cenozoica que se inició hace 2,59 Ma y llega hasta la actualidad; hasta 2009, se consideraba que el Cuaternario comenzaba hace 1,81 Ma, (Gibbard & Head, 2009; Bardají & Zazo, C., 2009; Head & Gibbard, 2015). El Pleistoceno, la primera y más larga época del Cuaternario, caracterizado por numerosos períodos glaciares e interglaciares que alternan en intervalos aproximados de entre 40. 000 y 100. 000 años. El Holoceno, segunda época del Cuaternario, es un período interglaciar que comenzó hace unos 11.500 años y continúa en la actualidad.

hielo septentrionales crecían y avanzaban hacia el sur y cuando llegaban a un máximo de volumen acumulado invertían la tendencia, se derretían y comenzaban a retroceder, hasta desaparecer totalmente durante breves períodos de tiempo (varios miles de años) llamados interglaciares. Por ello, el Cuaternario es un periodo de inestabilidad climática con bruscos cambios ambientales, que han afectado con diferente intensidad a todas las latitudes del planeta (Uriarte, 2010).

Para que fuera posible la acumulación de hielo en las tierras continentales del norte de América y de Europa fue necesario que el clima general se enfriase suficientemente²⁶ para que las precipitaciones invernales en las latitudes altas del hemisferio norte fuesen mayoritariamente de nieve y no de lluvia. No obstante, para que se acumulase hielo en esos mantos, además de abundantes precipitaciones de nieve en el invierno era necesario que esta no se fundiese durante el verano. Por este motivo, se piensa que el desencadenante de las glaciaciones del Cuaternario fue de carácter astronómico. Aunque no es sencillo demostrarlo, la periodicidad de las glaciaciones cuaternarias está influenciada por los ciclos de Milankovitch²⁷. Una vez iniciadas las glaciaciones por causas astronómicas, el aumento del albedo las intensificaba, gracias a un mecanismo de retroalimentación positiva (Uriarte, 2010).

La penúltima glaciación finalizó hace unos 127.000 años comenzando un período interglacial (conocido como Eemiense) que perduró hasta el año 115.000 antes de

²⁶ Fue necesario esperar a que el clima fuese más frío que el existente, 7 Ma antes, cuando se formó el manto de Groenlandia, que se vio favorecido por su insularidad. También hubo que esperar a que el clima fuese mucho más frío de lo que se había necesitado para que el hielo se acumulase en la Antártida (hace 35 Ma) ya que a diferencia de la Antártida, el Ártico está ocupado en su mayor parte por un océano profundo recubierto por una fina capa de agua marina congelada de sólo dos o tres metros de espesor medio. En el norte Eurasia y Norteamérica, la tierra firme continental, apta para la formación de mantos de hielo, se encuentra a bastantes grados al sur del Polo Norte, con lo que, al disminuir la latitud y aumentar la insolación veraniega, la acumulación del hielo en grandes cantidades se hizo difícil.

²⁷ La periodicidad de las glaciaciones cuaternarias ha sido variable. A comienzos del Pleistoceno, las oscilaciones climáticas seguían ciclos de unos 40.000 años, que parecían coincidir con el ciclo de variación de la inclinación del eje terrestre. Posteriormente, entre hace 1,5 Ma y 600.000 años la amplitud de los ciclos tendió a aumentar, y desde hace 600.000 años los ciclos glaciales se han sucedido en intervalos de entre 80.000 y 120.000 años (Rutherford & D'hondt 2000). Esta duración de los ciclos recientes resulta similar al del período de variación de la excentricidad de la órbita terrestre, que es de unos 100.000 años. Las diferencias de duración existentes pueden ser debidas a una modulación de la frecuencia provocada por un componente secundario de la excentricidad de 413.000 años (Rial, 1999).

la actualidad (en Europa se prolongó algo más, hasta hace 106.000 años, siendo el penúltimo período cálido que la Tierra ha conocido durante el Cuaternario; el último es el actual: el Holoceno. Probablemente, en los momentos álgidos de este periodo interglacial las temperaturas de nuestro planeta eran entre 1°C y 2°C superiores a las actuales, aunque algunos modelos ponen en duda que la temperatura media global fuese más elevada (Winter *et al.*, 2003). Es posible que durante el período interglacial propiamente dicho (hace 127.000 a 115.000 años) el clima fuese relativamente homogéneo. Sin embargo, en el período posterior (hace 115.000 a 106.000 años), que en muchos lugares, como en el sur de Europa, siguió siendo un período cálido, se incrementase la variabilidad climática, con el traslado de corrientes frías del norte hacia latitudes meridionales y con épocas de mayor sequía (Kukla, 2000).

Posteriormente, hace 115.000 años comenzó la última glaciación, cuando las nieves que caían durante el invierno en el hemisferio norte²⁸ comenzaban a resistir el verano, sin deshacerse del todo. En efecto, debido a los ciclos de Milankovitch (sobre todo por la excentricidad de la órbita terrestre) durante el interglacial se produjo una reducción del 20% en la insolación veraniega. En el último periodo glacial se pueden distinguir tres fases:

- **1ª Fase** (hace 115.000 a 80.000 años), hubo una merma del volumen de agua en los océanos, por una acumulación rápida de hielo continental, con un descenso del nivel del mar de unos 50 metros en unos pocos milenios.

²⁸ Según la teoría de Milankovitch, la glaciación debió comenzar en el hemisferio norte. No obstante, los yacimientos paleoclimáticos del hemisferio sur indican que allí también se produjo casi simultáneamente, hace unos 115.000 años, un recrudecimiento del frío, con avances de los glaciares del sur de los Andes, Patagonia y banquisa de hielo que rodea a la Antártida. El mecanismo de transmisión de la glaciación de un hemisferio a otro no está todavía muy claro, aunque se piensa que fue debido a la disminución a escala global de los gases invernadero: dióxido de carbono, metano y vapor de agua. Gracias al análisis del aire atrapado en las burbujas de las capas del hielo que recubren Groenlandia y la Antártida, se conoce cómo fue variando a lo largo de los últimos ciclos glaciales la concentración de algunos de los gases invernadero y de los aerosoles atmosféricos (Fischer *et al.*, 1999). Si se compara la evolución de las temperaturas y la evolución de las concentraciones de CO₂, se observa que casi siempre los cambios térmicos preceden a los cambios en el CO₂. En cualquier caso, según las burbujas de aire atrapadas en los hielos de Groenlandia y de la Antártida, la curva de evolución térmica en los últimos 150.000 años es parecida a la de la evolución de la concentración de CO₂ (con el metano ocurre algo parecido), pero con diferencias y desfases muy significativos. El CO₂ atmosférico disminuía durante las glaciaciones debido probablemente a que un incremento de la actividad del fitoplancton intensificaba el bombeo biológico de carbono hacia el fondo del mar provocando que disminuyese la concentración de CO₂ atmosférico (Uriarte, 2010).

- **2ª Fase** (hace 80.000 a 30.000 años) se produjo una segunda gran acumulación de hielo en los continentes hacia el 80.000 antes de la actualidad, con un descenso del nivel del mar de otros 20 metros. Aproximadamente, hace 73.500 años, se produjo la erupción del Toba (Sumatra), la mayor de los últimos cien mil años (probablemente durante varios años descendieron las temperaturas superficiales del hemisferio norte de 3°C a 5°C). Para Rampino & Self (1993), dicha erupción fue provocada por la desestabilización de la litosfera, como consecuencia de un previo descenso del nivel del mar.
- **3ª Fase** (hace 30.000 a 19.000 años), comenzó a nivel global la fase más fría de la glaciación, con el Último Máximo Glacial, entre el 23.000 y el 19.000 antes del presente

Durante la última glaciación la disminución de la temperatura no ocurrió de manera uniforme, sino que existieron fases de varios miles de años en los que aumentaba el frío, denominados *periodos estadiales*. En ocasiones, al finalizar los estadiales se producían, en el Atlántico Norte, grandes derrumbes hacia el mar de grupos de icebergs procedentes de los mantos continentales, conocidos como *eventos Heinrich*. El frío de los estadiales era interrumpido por períodos de brusco calentamiento, llamados tradicionalmente *periodos interestadiales*²⁹ que se sucedían, probablemente, en ciclos de unos 1.500 años. La variabilidad del clima durante la última Glaciación podría estar originada por rápidos cambios en el tamaño de los grandes extensiones de hielo del hemisferio norte, que provocaban variaciones en la circulación atmosférica y oceánica, fundamentalmente en el Atlántico Norte (Schmittner *et al.*, 2002).

Entre hace 23.000 y 19.000 años se produjo una fuerte bajada de las temperaturas, conocido como Último Máximo Glacial (UMG). El descenso térmico fue mucho mayor en las latitudes altas y en el interior de los continentes que en las costas. Se estima que la disminución de la temperatura media en la superficie terrestre del hemisferio norte fue entre 5,7°C y 8,7°C, aunque en muchas partes del planeta, como Europa, la temperatura media pudo ser inferior a la actual en más de 15°C. Durante este UMG el volumen total de los hielos acumulados en glaciares y en mantos continentales alcanzó el máximo. A medida que se acumulaba hielo en los continentes, se sustruía agua de los océanos y en consecuencia se produjo un descenso del nivel de los mismos (llegó hasta los 120 a 140 metros por debajo del

²⁹ Actualmente suele emplearse la terminología de “*eventos de calentamiento Dansgaard-Oeschger*”.

valor actual), por lo que permanecieron al descubierto grandes extensiones de plataformas continentales, que hoy en día están sumergidas. A nivel global, el frío de la glaciación se vio acompañado por un incremento de la aridez, debido a la ralentización del ciclo hidrológico. Esta aridez, junto con el viento y la escasa protección de la cubierta vegetal, favorecían la erosión eólica, especialmente en latitudes medias y altas. El consiguiente aumento de polvo en el aire pudo influir de dos formas en el enfriamiento del clima: primero, haciendo que la atmósfera fuera más opaca a la penetración de los rayos solares y, en segundo lugar, contribuyendo a la fertilización de las aguas marinas, ya que con el aporte de hierro, se incrementaba la productividad del fitoplancton y disminuía el CO₂ de la atmósfera (Uriarte, 2010).

Por último, hace aproximadamente 19.000 años comienza una desglaciación que termina hace unos 11.700 con la entrada del periodo interglacial en el que nos encontramos: el Holoceno. En el hemisferio norte la fusión de la mayor parte de los casquetes de hielo se inició entre hace 20.000 años y 19.000 años (Clark *et al.*, 2009), finalizando por completo hace unos 8.000 años, cuando se alcanzó un volumen y extensión similar al actual. No obstante, es posible que una parte del hielo de la Antártida Occidental haya seguido fusionándose hasta hace poco tiempo. Probablemente, el retroceso de las plataformas de hielo costero que se observa en algunos lugares de ese continente sería una continuación de la desglaciación iniciada hace unos veinte mil años (Conway *et al.*, 1999). Los sondeos realizados en los hielos de los dos polos de nuestro planeta indican que, en ocasiones, lo que sucedía en el hemisferio norte (Groenlandia³⁰) no tenía correspondencia con lo que ocurría en el hemisferio sur (Antártida³¹). A pesar que

³⁰ En Groenlandia, la temperatura aumentó sobre todo hace unos 14.700 años, alcanzando, en pocas décadas, un valor medio semejante al actual (Severinghaus & Brook, 1999). Con el calentamiento, la cantidad media de nieve anual se duplicó bruscamente, de unos 10 cm/año a 20 cm/año. Inmediatamente después de este brusco calentamiento, que duró solo entre 10 y 50 años, la tendencia en Groenlandia se invirtió de nuevo y durante unos milenios se produjo una regresión al frío, (denominado *Younger Dryas*), entre hace 12.900 y 11.700 años, en el que las temperaturas llegaron a ser unos 15°C más bajas que las actuales y el espesor de la nieve precipitada cada año se redujo de nuevo a unos 10 cm. Este período frío acabó también bruscamente hace 11.500 años, poniendo fin a la glaciación. En el Atlántico Norte y en Europa, el ritmo de la desglaciación fue, probablemente, parecido al de Groenlandia.

³¹ En la Antártida, el ritmo fue diferente. La temperatura comenzó a aumentar hace 18.000 años, antes de que lo hiciese con claridad en el hemisferio norte y se interrumpió hacia el 14.000 y cuando se produjo un ligero enfriamiento (Jouzel *et al.*, 2001). Este enfriamiento en el hemisferio sur, fue menor que el *Younger Dryas*, ya que hace 12.500 años la temperatura volvió a subir, como se comprobó en un antiguo glaciar de Nueva Zelanda (Kaplan, 2010).

no está totalmente esclarecida la hipótesis clásica de que la desglaciación comenzó antes en el hemisferio norte que en el hemisferio sur, la hipótesis preferida continua siendo la que defiende que los cambios ocurridos en el Atlántico Norte se adelantaron unas cuantas décadas al calentamiento global (Jouzel, 1999).

El factor que desencadenó el proceso de descongelación, según la teoría clásica, fue de naturaleza astronómica (ciclos de Milankovitch), con un incremento de la radiación solar en las latitudes altas del hemisferio que aumentó la fusión estival de los hielos. Después del comienzo del retroceso de los hielos en los bordes meridionales de los mantos, se produjo un efecto de retroalimentación fundamental: en latitudes altas de Norteamérica y de Eurasia, el bosque boreal, que recuperaba terreno a la tundra, contribuyó a la reducción del albedo del paisaje (especialmente durante la primavera y el verano), por lo que aumentó aún más la insolación durante la mitad iluminada del año (Uriarte, 2010).

Otro factor que aceleró el proceso de deshielo y que pudo ayudar a que la desglaciación fuese un fenómeno global y no ocurriera únicamente en el hemisferio norte fue el incremento de los gases de efecto invernadero (CO₂, metano, óxido nitroso y vapor de agua). Así, la concentración de CO₂ atmosférico aumentó desde unas 180 ppm a más de 260 ppm, contribuyendo al calentamiento en algo más de 1°C. El CO₂ emitido a la atmósfera a lo largo de la desglaciación no tenía su origen en el reservorio de la vegetación continental o en los suelos, ya que se produjo también un aumento del carbono retenido por estos últimos y la biomasa vegetal aumentó considerablemente. Una hipótesis señala que el incremento del CO₂ atmosférico procedía en buena parte del carbono que había estado retenido en los suelos y en la vegetación de zonas inundadas. En este sentido, se calcula que el carbono liberado debido a la inundación y descomposición de vegetación y suelos de esas plataformas emergentes, podría haber aumentado la concentración de CO₂ atmosférico entre 90 y 120 ppm (Montenegro *et al.*, 2006). Por este motivo, es posible que la mayoría del incremento del carbono atmosférico lo suministrara el océano. Son dos los posibles procesos de transferencia (contrarios a los que sucedieron en el comienzo de la glaciación):

- a) un incremento de la ventilación oceánica con ascenso a la superficie de aguas profundas ricas en CO₂.
- b) un descenso en la captura de CO₂ atmosférico, empleado por el fitoplancton marino para realizar la fotosíntesis

En cualquier caso, ambos procesos tienen efectos opuestos, ya que un incremento del ascenso de aguas profundas supone una mayor emisión de CO₂ al aire, lo que suele provocar un incremento en el aporte de nutrientes y, con ello, una mayor producción de fitoplancton, lo que implica lo contrario: mayor absorción de CO₂ por parte del océano, y viceversa. Por tanto, no es sencillo conocer cuál de estos dos procesos predominó y cómo fluctuaron en intensidad durante el transcurso de la desglaciación (Sundquist, 1993).

Por lo que se refiere a la concentración de metano (CH₄) durante la desglaciación se duplicó, pasando de 0,4 ppm a 0,7 ppm. No está claro aún a qué se debió el incremento del metano en el aire. Probablemente, la explicación se encuentra en lo que ocurrió en las latitudes altas al retirarse los hielos. En efecto, en grandes áreas del hemisferio norte, especialmente en Canadá, Siberia y norte de Europa se formaron nuevos humedales allí en donde se fueron retirando los hielos. Además, la subida del nivel del mar y la ocupación de las tierras costeras polares contribuiría a la descongelación de vastas zonas de permafrost y a la liberación del metano retenido en los cristales de hielo del subsuelo (MacDonald, 1990). Otro factor importante del incremento de la concentración del metano atmosférico pudo ser la disminución de los radicales OH presentes en el aire, ya que provocan la oxidación y destrucción de las moléculas de metano. El descenso de los radicales OH pudo ser provocada por el aumento de algunos compuestos volátiles orgánicos, como isoprenos y monoterpenos, que emiten al aire los bosques ya que destruyen también estos radicales. Por tanto, el aumento de la vegetación arbórea probablemente favoreció también el incremento del metano atmosférico (Valdés *et al.*, 2005).

El óxido nitroso (N₂O), fue otro gas de efecto invernadero que aumentó su concentración atmosférica en el transcurso de la desglaciación, pasando de 0,19 ppm a 0,27 ppm. Las principales fuentes de N₂O son los suelos tropicales y templados, así como las zonas oceánicas con afloramiento de aguas profundas. Su sumidero principal se encuentra en la estratosfera, donde la fotodisociación lo transforma en otros compuestos. Como sucedía con el metano, sus variaciones durante la desglaciación siguieron la evolución de las temperaturas (Flückiger *et al.*, 1999).

En cualquier caso, lo más importante fue el incremento del vapor de agua contenido en la atmósfera que fue posible gracias al aumento de la temperatura del aire, lo cual reforzó decisivamente el efecto invernadero y el calentamiento (Uriarte, 2010).

No obstante, antes de comenzar el Holoceno y en plena etapa de desglaciación, aproximadamente hace 12.900 años, ocurre un brusco cambio climático que, en unas pocas décadas, provoca que las temperaturas desciendan 6°C de media respecto a la etapa anterior. Es el denominado Younger Dryas o también Joven Dryas o Dryas Reciente. Este último golpe glacial nos muestra la gran sensibilidad que tiene el sistema climático terrestre respecto a lo que ocurre en los polos especialmente lo que ocurre con los hielos del Ártico. Es posible que algunas zonas se salvaran mejor que otras de la renovada dureza del clima. Así, por ejemplo, la región del suroeste europeo Cantabria-País Vasco-Aquitania, en plena efervescencia de la cultura magdaleniense, pudo convertirse en una zona refugio de Europa, tanto para animales como para humanos, al verse favorecida por un clima más benigno motivado por un predominio de los vientos del sur (Uriarte, 2010).

Al inicio del Younger Dryas, hace 12.900 años, la insolación estival en el hemisferio norte, derivada de los ciclos de Milankovitch, era mayor que la actual y continuaba aumentando (el máximo se alcanzaría hace 11.000 años). Por tanto, no había una causa astronómica para que se ralentizase el deshielo estival y avanzasen de nuevo los glaciares, sino todo lo contrario. Es posible que la explicación de este enfriamiento se encontrase el sistema de corrientes del Atlántico, que durante la transición al Younger Dryas se debilitó abruptamente, adoptando un modo parecido al que tenía durante los períodos más fríos de la glaciación. En el Atlántico, las aguas superficiales polares avanzaron otra vez hacia el sur, hasta la altura de la Península Ibérica. Sin embargo, las aguas templadas que transportan la corriente del Golfo y la deriva Noratlántica apenas lograban alcanzar la latitud de la Península Ibérica. Una vez debilitada la correa termohalina el factor albedo pudo multiplicar el proceso de enfriamiento.

La lección que podemos aprender de las glaciaciones es la íntima relación que existe entre los gases de efecto invernadero y las temperaturas, así como la conexión entre todos los elementos del sistema climático y la forma en que con mecanismos de realimentación se van sumando las acciones en un mismo sentido. Así, por ejemplo, la menor radiación solar por las variaciones orbitales de la tierra (ciclos de Milankovitch) se suman al aumento del albedo, que reduce la capacidad de la tierra cubierta por el color blanco para retener energía, que a su vez es potenciado por una corriente marina transportadora que se ralentiza y distribuye menos calor. Cada una en su ámbito, pero todos estos mecanismos relacionados, para sumar en la misma dirección: enfriar el clima.

En resumen, hace 11.700 años, las corrientes oceánicas adoptaron un modo de funcionamiento similar al que conocemos actualmente. Las aguas superficiales del Atlántico Norte se volvieron a calentar y las temperaturas, especialmente en Europa, ascendieron de nuevo varios grados en unas pocas décadas. Finalizaba de esta manera el Pleistoceno y comenzaba un nuevo período templado, el Holoceno, que iba a facilitar el desarrollo de nuestra especie: el *Homo sapiens*.

3.3.- CUATERNARIO: HOLOCENO (11.700 –clima reciente)

Tras el ascenso brusco de las temperaturas que se produjo al final del Younger Dryas, finalizó el Pleistoceno y se entró en el último período interglacial del Cuaternario: el Holoceno. Por la importancia que tiene la última etapa de este periodo (siglos XIX a XXI) la dedicaremos un apartado específico (que denominaremos clima reciente y que realmente es la última fase del holoceno) que abarca desde la revolución industrial hasta nuestros días³².

A pesar de que siguen existiendo olas de frío y calor y fenómenos atmosféricos extremos el clima entró hace unos 11.700 años (9.700 a. C.³³) en una de las etapas más estables y benévolas de toda su historia geológica coincidiendo también con el inicio de los grandes avances en la civilización humana (“revolución neolítica”). La transición entre la glaciación y el Holoceno se realizó en unos pocos siglos en los cuales la temperatura media del planeta subió unos 5 ó 6°C. La subida fue especialmente notable en Groenlandia con un aumento de 10 °C.

El origen de este cambio se encuentra en las variaciones de la radiación solar que recibe nuestro planeta en el hemisferio norte (ciclos de Milankovitch). En este sentido, durante la etapa inicial del Holoceno, la diferencia de insolación en el hemisferio norte entre la época estival (8% más de insolación) y la invernal (8% menos de insolación) era bastante mayor que la existente hoy en día, lo que se traducía en inviernos más fríos y veranos más cálidos. Las modificaciones de la distribución estacional de la radiación solar tuvieron influencia en algunas características fundamentales de la circulación atmosférica y, especialmente, en la humedad continental. Se piensa que la temperatura media de la superficie de la Tierra durante el Holoceno osciló alrededor de los 15°C (ver figura 3).

No obstante, excepcionalmente, períodos breves con un fuertes descensos de las temperaturas y aridez. El más anormal de estos episodios se registró entre el 6.400 y el 6.000 a. C., con un pico de enfriamiento hacia el 6.200 a. C. (Demenocal *et al.*, 2000). Afectó especialmente a Groenlandia y a Europa, pero hay indicios de ese

³² Coincide con la denominada etapa instrumental del clima ya que se dispone de datos tomados por estaciones meteorológicas distribuidas en distintos lugares del planeta

³³ A partir de ahora dejaremos de utilizar la escala temporal hace X años (antes del presente), empleada en geología, sustituyéndola por la que se basa en la era cristiana: a. C. (antes de Cristo) y d. C. (después de Cristo); si se menciona un año sin más, se entiende que es d. C.

enfriamiento en otras regiones lejanas, como China o África tropical, en donde provocó también episodios secos y ventosos (Rohling, 2005).

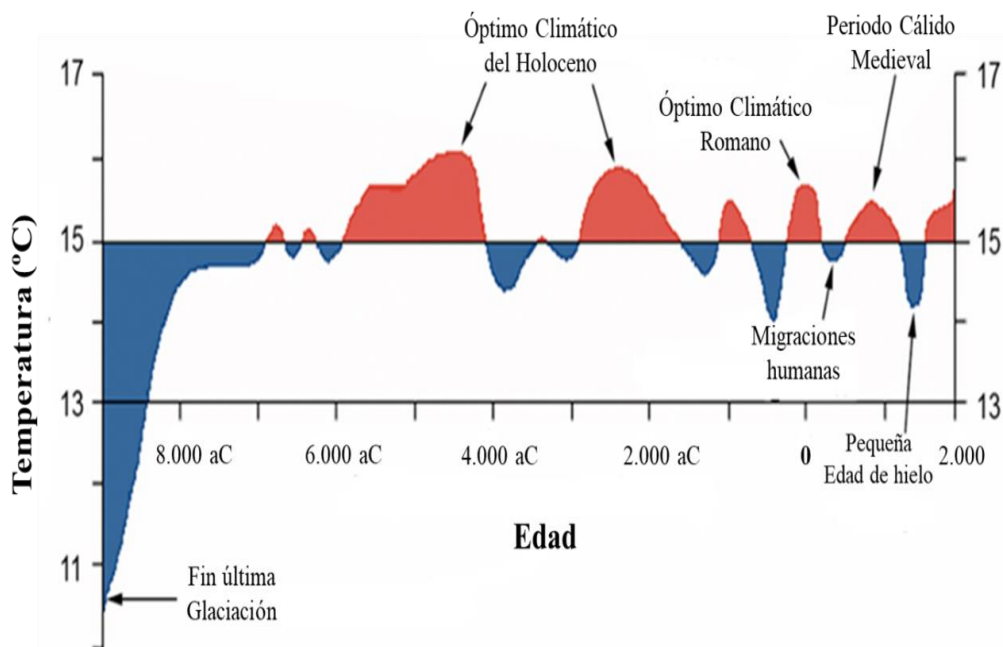


Figura 3.. Temperaturas medias en el hemisferio norte desde el final de la última glaciación (Dansgaard *et al.*, 1969). Adaptado.

El Máximo u Óptimo Climático del Holoceno (también llamado Hipsitermal) fue un periodo cálido que comenzó alrededor del 6000 a.C. y duró hasta aproximadamente el 2500 a.C. En el Ártico, la banquisa de hielo estival ocupaba entonces una superficie que era solamente el 50% de la actual y la de invierno el 75% (Miller *et al.*, 2001). El “paso del noroeste”, entre las islas canadienses, estaba abierto, permitiendo la comunicación entre los océanos Ártico y Pacífico (Fisher *et al.*, 2006). En unos pocos milenios, la selva ecuatorial africana se extendió hacia el norte y hacia el sur, ocupando una superficie quince veces más amplia que la que tenía durante la época glacial, con paisajes que hoy son de sabana. Así, El Sahara

y el Sahel³⁴ no eran las tierras de arena que hoy conocemos, sino zonas que gozaban de períodos prolongados de bastante humedad, con numerosos lagos y marismas. Existen pruebas arqueológicas que indican que en áreas que actualmente son semidesérticas, poseían una fauna típica de sabana (Uriarte, 2010).

En cualquier caso, posteriormente, en el 3.500 a. C. las lluvias comenzaron a disminuir y hacia el 2.500 a. C. el Sahara adquiría la aridez que llevó a la región a tener el paisaje que conocemos hoy, lo que ayudó a la concentración de población a orillas del Nilo³⁵ y al comienzo de la civilización egipcia. Además, se cree que la progresiva pérdida de la vegetación sabanoide, que cubría lo que ahora es un desierto, generó un importante mecanismo de retroalimentación en el proceso de incremento de la aridez (Claussen *et al.*, 1999). Por debajo de un umbral de precipitaciones, la pérdida de la vegetación suspendió el proceso de reciclaje de la humedad atlántica que penetraba en el continente y las lluvias estivales dejaron de penetrar en el interior del Sahara (Braconnot *et al.*, 1999). Paradójicamente, la concentración de CO₂ en la atmosfera no intervino en este proceso de enfriamiento, ya que su valor aumentó, en lugar de disminuir. Dicho incremento pudo deberse en parte al trasvase de carbono hacia la atmósfera que se produjo con el aumento de la aridez continental, y, probablemente también, a un trasvase desde el océano (ELSIG *et al.*, 2009).

Hacia el 2.000 a. C. el cambio climático provocó probablemente el fin de algunas civilizaciones como la de Harappa y la de Acadia. No obstante, la repercusión precisa de los cambios climáticos del Holoceno Medio en el establecimiento y desaparición de antiguas civilizaciones es materia de discusión. Para algunos, la humedad es la que favorece el desarrollo económico y social, mientras que para otros es la aridez la que fuerza a los pueblos nómadas a crear poblaciones densas y sedentarias en las orillas de los ríos (Uriarte, 2010).

³⁴ El Sahel es una de las zonas de la Tierra más sensible a los cambios de las precipitaciones que ocupa una estrecha franja de territorio situada entre el desierto del Sáhara ,al norte, y la sabana/selva, al sur.

³⁵ En Oriente Medio el proceso fue similar reduciendo las zonas fértiles a las orillas de los grandes ríos. Los asentamientos que habían proliferado durante el Optimo Climático del Holoceno se encuentran ahora con nuevas condiciones que les obligan a reagruparse en torno a los grandes ríos cuya humedad aún puede proporcionar tierras fértiles; además tienen que agudizar el ingenio (invención del regadío) para conseguir que esos terrenos escasos empiecen a producir suficientes recursos para todos. Estos movimientos migratorios y la congregación de población en torno a los recursos hídricos sentaron las bases para el desarrollo social que derivó en las primeras civilizaciones (Martin-Chivelet, 2016)

Durante el apogeo de la civilización Griega, siglo V a. C., el clima que tuvieron que soportar sus habitantes no fue tan favorable como el que tendrían los romanos unos siglos más tarde en el llamado Óptimo Climático Romano, aunque las temperaturas tampoco fueron tan bajas como las que habría en Europa entre los siglos IV y X d. C. No obstante, este clima favorable facilitó la expansión de la cultura griega por todo el Mediterráneo.

Recientemente, se ha señalado que una serie de cambios climáticos provocado por erupciones volcánicas influyó negativamente en las inundaciones de verano del río Nilo³⁶, lo que tuvo un impacto muy negativo en la producción agrícola por lo que el clima se convirtió en el germen de muchas décadas de inestabilidad social, que en el año 30 a. C. acabó con la última dinastía de Egipto (Manning, *et. al*, 2017).

Entre los siglos III a. C. y IV d. C. se produjo una nueva fase cálida del clima en todo Europa que se conoce como Periodo Cálido Romano u Óptimo Climático Romano, en el que la temperatura media en verano sería aproximadamente un grado superior a la actual. Se trata de un clima cálido y húmedo, con inviernos no demasiado fríos que permitieron la recogida de grandes cosechas.

No obstante, una fuerte actividad volcánica, entre los años 235 y 285 d. C., acabó con la tendencia cálida iniciando una época de enfriamiento que no acabaría hasta bien entrada la Edad Media. Hacia el año 400 dC las condiciones frías del clima eran perfectamente constatables, con inviernos rigurosos, especialmente en el norte de Europa lo que provocó el desplazamiento de los pueblos bárbaros hacia el sur. Con las invasiones de los pueblos bárbaros (Visigodos, Suevos, Vándalos o Hunos) cayó definitivamente el Imperio Romano. El periodo frío no tuvo la misma duración en toda Europa ya que en el norte acabaría aproximadamente en el año 700 y en el sur llegaría hasta el 1.000.

Con posterioridad, especialmente en Europa, han existido dos períodos con diferencias térmicas apreciables: el Período Cálido Medieval y la Pequeña Edad de Hielo posterior, a los que ha seguido un calentamiento reciente, aunque existen,

³⁶ La civilización egipcia no se entiende sin las crecidas anuales del Nilo que inundaban de fertilidad los campos con los limos procedentes de las crecidas estivales del caudal, por el deshielo de las montañas de Etiopía y que traían a las tierras semidesérticas limo que fertilizaba los campos, donde se podían plantar: cereales, legumbres e incluso algunas hortalizas. Eran especialmente claves el trigo y la cebada, base de la producción de pan y cerveza.

bastantes incertidumbres sobre la duración y el alcance espacial de dichos periodos³⁷ (ver figura 4).

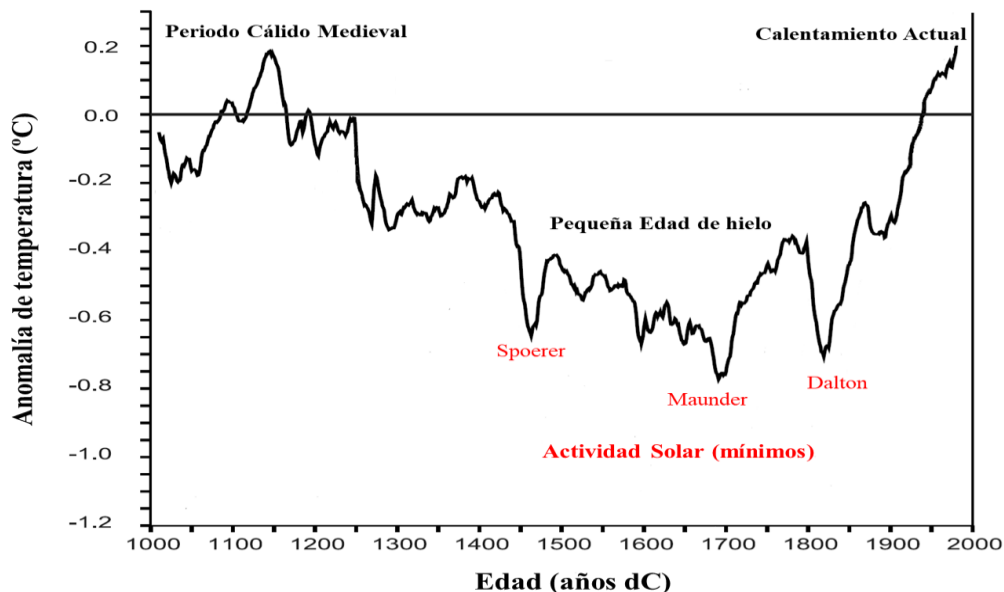


Figura 4. Evolución de la temperatura del hemisferio norte (último milenio), según simulación basada en la temperatura del subsuelo (González-Rouco *et al.*, 2003).

El Periodo Cálido Medieval u Óptimo Climático del Medievo comprende el periodo que va del año 1.000 d. C. (700 d. C. en el norte de Europa) al 1300 d. C., aproximadamente. Durante el mismo, la población europea se multiplico por tres o por cuatro. En este periodo cálido, el continente europeo presentaba temperaturas ligeramente más elevadas que las actuales destacando que no había situaciones extremas del clima y buenos periodos de lluvias. En el conjunto de Europa, se estima que las temperaturas eran de aproximadamente un grado más que las del siglo XX. Pero la clave está sobre todo en una buena distribución de las lluvias, con unos inviernos suaves y con menos nevadas. Uno de los hechos históricos más

³⁷ Las fechas de comienzo y final de los diferentes periodos desde la civilización griega son aproximadas ya que existen diferencias entre unas zonas geográficas y otras. En cualquier caso, las variaciones en el clima de Europa durante los dos últimos milenios se relacionan, fundamentalmente, con el comportamiento de las corrientes profundas y superficiales de todo el Atlántico.

destacable fue la expansión de los pueblos vikingos (suecos, daneses y noruegos³⁸) que se aprovecharon de un clima más cálido y del deshielo de los mares que les rodeaban. En España, las buenas cosechas de cereales y la mayor disponibilidad y abundancia de pastos favorecieron que nuestro país adquiriera gran importancia en el comercio de la lana gracias a la creación y apoyo estatal de la primera gran asociación gremial de Europa: la Mesta.

Posteriormente, se volvieron a dar unas condiciones más frías y extremas que abarcarían desde el siglo XIV hasta mediados del siglo XIX³⁹ y que es conocido como Pequeña Edad de Hielo (PEH). Durante la PEH, las condiciones climáticas en Europa fueron considerablemente más frías que las actuales, especialmente entre los años 1550 y 1700 d. C., aunque sin llegar al extremo de las glaciaciones del Cuaternario o de anteriores épocas glaciales. En cualquier caso, eran frecuentes las heladas intensas y tardías, así como las nevadas, aunque también existían veranos muy cálidos. En este sentido, para algunos autores el enfriamiento de la PEH sólo afectaba a los inviernos pero no a los veranos (Uriarte, 2010).

En España, la Pequeña Edad de Hielo fue importante sobre todo en los siglos XVI y XVII, con fuertes nevadas en invierno y congelaciones de los ríos. No obstante, la principal característica de este periodo fue la variabilidad, tanto de las temperaturas como de las lluvias, con frecuentes inundaciones y riadas, aunque también con severas sequías. En esa época, destacaban las invasiones de aire frío pero también de olas de calor en verano, probablemente, debido a que predominaban los vientos de componente Norte-Sur o Sur-Norte en lugar de los vientos de Este-Oeste o de Oeste-Este. El actual paisaje de la Península Ibérica se formó, en gran medida, durante la Pequeña Edad de Hielo. Así, en la cornisa cantábrica se produjo un incremento de los pinares en detrimento de hayedos y robledales. Además, en las dos mesetas de nuestro país, empezó a imponerse el amarillo de los cereales frente al verde de los pastizales, especialmente en la Meseta sur. En este sentido, en la Mancha los pastos van desapareciendo dejando paso a los viñedos. Así pues, estos cambios del clima tuvieron una gran influencia

³⁸ Los vikingos de Suecia se establecieron en tierras eslavas y desde allí llegaron hasta Constantinopla. Los vikingos de Dinamarca ocuparon el sur de Gran Bretaña y Normandía; desde los años 800 navegaron hacia el sur por la costa de Francia y de la Península Ibérica, llegando al Mediterráneo. Los vikingos de Noruega llegaron a las costas de América, asentándose en Islandia y Groenlandia, donde consiguieron criar ganado (especialmente vacuno).

³⁹ Parece ser que existieron dos picos de frío, uno al principio (siglo XIV) y otro al final del período, en la primera mitad del siglo XIX.

tanto en la economía española como en la configuración del paisaje a lo largo de los siglos XVI y XVII. Fueron años caracterizados por grandes oscilaciones tanto en las lluvias como en las temperaturas aunque con un predominio del frío.

La explicación de este periodo frío de la historia europea se ha basado en dos causas fundamentales: las erupciones volcánicas⁴⁰ y, especialmente, la evolución del número de manchas solares (actividad solar). Aunque hemos visto que en otros periodos geológicos la actividad volcánica pudo ser la responsable de cambios climáticos bruscos, durante el Holoceno las erupciones volcánicas parecen haber provocado enfriamientos globales de escasa magnitud y duración.

En cuanto a las manchas solares, existen periodos sin manchas, lo que implica una menor actividad del Sol. Los periodos con mínima actividad solar, debido a un menor número de manchas, coinciden con épocas frías en nuestro planeta. En este sentido, entre los años 1645 y 1715 las manchas solares prácticamente desaparecieron de la superficie del Sol. Este período se conoce como mínimo de Maunder, que coincide con los momentos más fríos de la PEH (ver figura 4). Durante el mínimo de Maunder la Tierra podría haber experimentado un descenso entre 0,2 y 0,6 grados centígrados de media, pero que en algunas zonas pudo llegar a los 2°C. Durante la Pequeña Edad de Hielo se produjeron otros periodos de escasa actividad solar como el mínimo de Wolf (hacia el año 1300), el mínimo de Spörer (hacia el año 1500) y el mínimo de Dalton (entre los años 1790 y 1830). Posiblemente fueron precedidos por un período de máxima actividad solar, el máximo Solar Medieval, entre el 1100 y el 1250 (Jirikowic & Damon, 1994), semejante para algunos autores a un Máximo Solar Contemporáneo⁴¹, que estaríamos atravesando actualmente. En Europa, la fecha en la que finaliza la Pequeña Edad de Hielo es el año 1855 d. C. momento a partir del cual el clima se

⁴⁰ Tan importante como la intensidad de las erupciones y la altura alcanzada por las eyecciones es su localización geográfica. En latitudes tropicales, los aerosoles sulfatados, cuando alcanzan la estratosfera, se reparten por todo el globo, llevados por los flujos generales de vientos que circulan a esa altura desde la zona tropical hacia los polos. Una erupción importante fue la del volcán Huaynaputina (Perú), ocurrida en el año 1.600 que originó un enfriamiento de unos 0,8° C en el hemisferio norte durante el verano de ese año (De Silva & Zielinski 1998). La erupción del Laki (1783), en Islandia afectó especialmente al clima del Ártico, con uno de los veranos más fríos del milenio en esa región (Stone, 2004). La erupción del Tambora (Java) en 1815 provocó que las temperaturas estivales de ese año fueran entre 2,3° C y 4,6 ° C más bajas que las normales y que en 1816 se denominase el año sin verano en Europa y América.

⁴¹ Existen autores que piensan que la actividad solar de los últimos setenta años ha sido la máxima de los últimos 8.000 años (Solanki *et al.*, 2004).

vuelve más templado y los glaciares comienzan una nueva fase de retroceso en la que continúan actualmente.

No obstante, lo más conocido de la evolución del clima en los últimos mil años del Holoceno es el trabajo de Mann *et al.*, (1999), “temperaturas del hemisferio norte durante el último milenio: inferencias, incertidumbres y limitaciones”. En la publicación se observaba que las anomalías de las temperaturas eran pequeñas en los primeros 900 años, mientras que en los últimos 100 años ocurría lo contrario, proporcionando una imagen similar a un palo de hockey (ver figura 5). A raíz de la publicación comenzó la controversia y el examen detallado de los datos para poder corroborar las conclusiones de los investigadores.

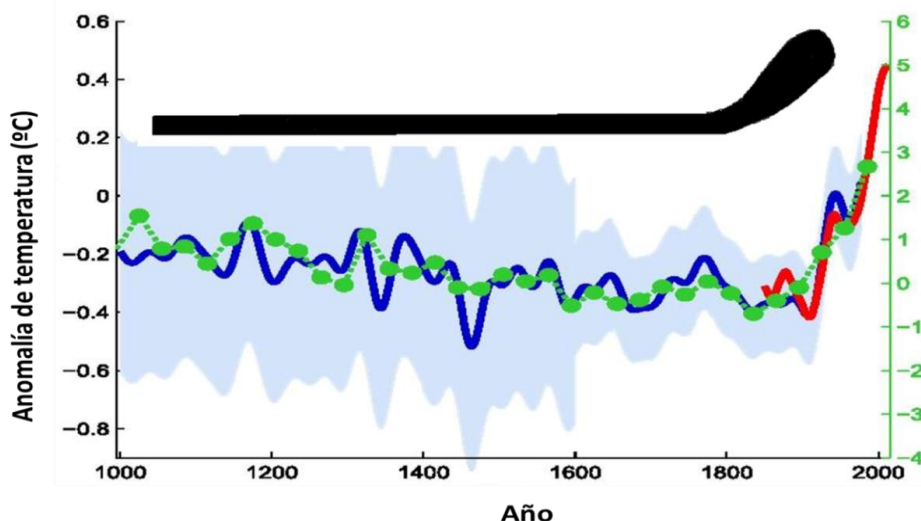


Figura 5. Anomalía de temperatura en los últimos 1000 años (palo de hockey), según Ahmed *et al.*, 2013 (modificado).

En los años siguientes, Mann, el primer autor del polémico trabajo se convirtió en el centro de los ataques de quienes dudaban (y combatían activamente) la idea del calentamiento global, publicando un libro sobre las «guerras del clima» (Mann, 2012). La imagen del palo de hockey se fue haciendo popular, convirtiéndose en un símbolo del cambio climático y, sobre todo, de la excepcionalidad de los registros de los últimos años, como veremos en el último apartado. En este sentido, en 2013, se publicó una nueva revisión exhaustiva que, utilizando más de 550 registros, generaba una gráfica (figura 5) que volvía a recordar al palo de hockey (Ahmed *et al.*, 2013)

4.- CLIMA RECIENTE (siglos XIX a XXI)

Esta etapa que denominamos clima reciente (que abarca desde la revolución industrial hasta nuestros días, aproximadamente siglos XIX a XXI) corresponde en realidad a la última fase del holoceno.

Para un grupo de científicos el deterioro del planeta como consecuencia de las actividades humanas desde la Revolución Industrial ha conducido al mismo a lo que proponen como una nueva era geológica: el Antropoceno⁴². No se trata sólo de la problemática relacionada con el cambio climático sino del empleo masivo de hormigón, aluminio, plásticos, fertilizantes pesticidas y otros productos químicos. Hasta ahora, las eras geológicas se medían normalmente en millones. Sin embargo, el Antropoceno tiene como principal característica la gran rapidez de los cambios que se provocan, especialmente desde mediados del siglo pasado.

El término Antropoceno fue acuñado inicialmente por Crutzen y Stoermer (2000) en el contexto del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP) con el fin de reflejar la intensidad de la modificación humana sobre la superficie terrestre. Actualmente el Antropoceno está siendo evaluado como una posible nueva unidad dentro de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional por el Anthropocene Working Group (AWG) (Cearreta, 2015).

⁴² En el Congreso Internacional de Geología celebrado en Sudáfrica en septiembre de 2016 un grupo de expertos presentó sus conclusiones sobre si era apropiado hablar de una nueva era geológica (Antropoceno). Los expertos señalaron a 1950 y los ensayos con bombas nucleares como la línea que marca la transición ya que dichos ensayos deja un rastro perceptible en todo el planeta por la presencia de elementos radiactivos. Aportan también otra huella perenne que son la contaminación generada por los plásticos de difícil desintegración y que seguirá presente durante miles de años y otras huellas de menor importancia. La inmensa mayoría de los expertos votaron a favor de reconocer que estamos en una nueva era geológica.

4.1.-CALENTAMIENTO GLOBAL

En 1981 dos artículos publicados⁴³ con unas semanas de diferencia fueron los primeros en relacionar el calentamiento global con los GEI de origen antropogénico. Así, Wigley & Jones (1981) señalaban que aunque es una creencia general que el aumento de los niveles de CO₂ provocarán un calentamiento global apreciable, sus efectos no eran detectables, posiblemente por la interferencia de las variaciones climáticas naturales. Poco después, Hansen *et al.* (1981) afirmaban que con el ritmo de crecimiento y emisión de GEI de la época, había que esperar un calentamiento global de 2,5 °C en el siglo XXI, contando con la sustitución de parte de las energías fósiles por renovables. En cualquier caso, dichos autores señalaban que aunque la concentración del principal GEI (*el CO₂*) continuaba aumentando, tres de las cuatro décadas previas habían experimentado una bajada de las temperaturas sido de enfriamiento (ver figura 6).

Durante el siglo XX la temperatura media de la superficie de la Tierra, medida con termómetros colocados a dos metros del suelo y combinadas con la temperatura de la superficie del mar, experimentó un incremento aproximado de 0,7 °C. Las latitudes más altas del hemisferio norte, especialmente el Ártico, parecen presentar una mayor sensibilidad y acusan en mayor medida los aumentos de temperatura. Además, el incremento de las temperaturas no fue uniforme a lo largo del siglo. Se suelen identificar dos periodos de ascenso térmico: 1910-1944 y 1978-1998. Entre ambos, 1945-1977, la temperatura media global de la nuestro planeta mostro una leve tendencia a la baja. Esta heterogénea evolución probablemente supone la influencia de factores naturales, y no sólo antrópicos, en las variaciones térmicas, particularmente durante el primer período de incremento térmico, el de 1910-1944 (Stott, 2000).

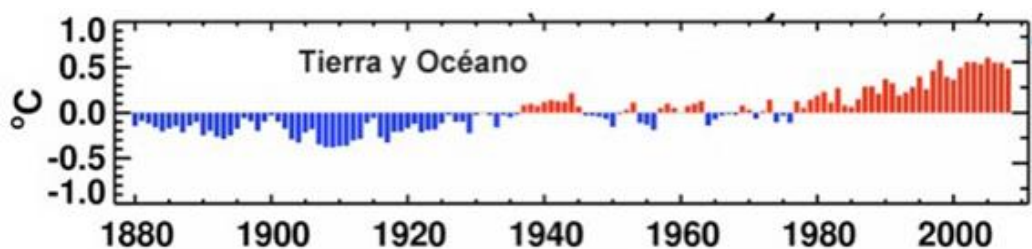


Figura 6. Evolución de la temperatura global media anual durante el siglo XX y principios del XXI, en °C. Referencia 0 en 1900

⁴³ En dos de las revistas más prestigiosas de la época: Nature y Science.

Durante el siglo XX, se ha comprobado que en la mayor parte de las regiones de nuestro planeta, se han reducido los días con helada y se considera muy probable que también hayan disminuido las olas de frío⁴⁴ (Easterling *et al.*, 2000). En este sentido, en la segunda mitad del siglo XX las temperaturas mínimas experimentaron mayores subidas (+0,20° C/década) que las mínimas (+0,14° C/década) (Vose, 2005). Desde 1990, la evolución de las temperaturas⁴⁵ presenta diferencias entre el hemisferio norte y el sur, especialmente entre la región del Ártico, que se ha calentado, y la de la Antártida, que prácticamente no ha experimentado cambios.

La década más cálida de todo el siglo XX fue la última, con una pendiente ascendente en la representación gráfica, a pesar de que en 1991 entró en erupción el volcán Pinatubo que provocó que las temperaturas descendieran 0,5°C durante un año. Pero la tendencia era claramente la de un calentamiento sostenido que, en aquel momento, algunos científicos achacaban a las actividades humanas. Actualmente, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)⁴⁶ atribuye todo el calentamiento de la segunda mitad del siglo XX a la actividad humana (IPCC, 2014).

⁴⁴ Algunos autores piensan que un calentamiento global originado por el incremento de las temperaturas mínimas nocturnas (especialmente en invierno) podría tener repercusiones positivas para la humanidad, consecuencias benignas para la humanidad, e incluso beneficiosas.

⁴⁵ Hay que tener en cuenta que la temperatura media global es una media aritmética de fenómenos simultáneos de calentamiento y de enfriamiento entre diferentes regiones. Estas diferencias entre zonas se conocen con mayor precisión desde que en la segunda mitad del pasado siglo se incrementó notablemente el número de observatorios meteorológicos (más de catorce mil), en particular en el hemisferio norte. Hasta mediados del siglo XX existían muy pocas estaciones meteorológicas, la mayoría localizadas en Europa y Estados Unidos. Únicamente las series de mil observatorios abarcan todo el siglo XX, con falta de mediciones en muchas áreas, especialmente de África, América del Sur, Asia y océanos, obligando a que la resolución espacial (celdas de 5 ° de longitud por 5 ° de latitud) en la que se basa el cálculo de las medias sea muy grande. Así, por ejemplo, la Península Ibérica queda cubierta con menos de cuatro celdas. Un elemento que puede distorsionar los cálculos de las medias globales y de la tendencia de las temperaturas es que un creciente número de observatorios meteorológicos se ubican en zonas urbanas, viéndose influidas por el efecto “isla de calor”. No obstante, algunos trabajos parecen contradecir la hipótesis de que el calentamiento global registrado por los termómetros sea debido a la urbanización. (Parker, 2004)

⁴⁶ También denominado Panel Intergubernamental del Cambio Climático, conocido por el acrónimo en inglés IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

Al analizar los cinco informes del IPCC se observa que el grupo de expertos de esta organización internacional ha ido llamando la atención, de una manera cada vez más clara e inequívoca, sobre la influencia del ser humano en el clima y las consecuencias del cambio climático.

En el primer informe de 1990, el IPCC expresa la posibilidad de que el calentamiento experimentado desde comienzos de la década de los ochenta del pasado siglo se debiera “tanto a las emisiones industriales de gases de efecto invernadero como a la variabilidad natural del clima” no llegando a cuantificar la contribución humana al calentamiento global (IPCC, 1991).

Sin embargo, el segundo informe, de 1995, señala ya claramente al hombre como responsable principal del cambio climático, figurando por primera vez la palabra influencia en la expresión “influencia humana sobre el clima” (IPCC, 1996).

En el tercer informe, de 2001, ya se pondera el grado de influencia humana, señalando que “las emisiones de gases de efecto invernadero son probablemente responsables de más de la mitad de la aumento de la temperatura terrestre desde 1951” (IPCC, 2001).

El cuarto informe, del año 2007 reduce el grado de incertidumbre al decir que “muy probablemente” los seres humanos somos responsables de la mitad del aumento de la temperatura desde 1951 (IPCC, 2007).

Finalmente, el quinto y último informe, de 2014, lo expresa sin ningún tipo de incertidumbre⁴⁷ señalando que “la influencia humana en el sistema climático es clara” y “el calentamiento del sistema climático es inequívoco” (IPCC, 2014).

Desde finales de la década de los setenta del pasado siglo la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) emplea satélites para efectuar mediciones de la temperatura de la atmosfera de la Tierra⁴⁸. La medición con

⁴⁷ Las expresiones empleadas por el IPCC para señalar el grado de incertidumbre de una hipótesis son las habituales: “prácticamente seguro” (probabilidad > 99%), “sumamente probable” (probabilidad > 95%), “muy probable”(probabilidad > 90%), probable”(probabilidad > 66%), “más probable que improbable””(probabilidad > 50%).

⁴⁸ Las medidas están basadas en la captación de las microondas emitidas por el oxígeno atmosférico, cuya intensidad depende de la temperatura del aire. La diferencia con los termómetros de superficie es que estos miden la temperatura del aire a dos metros de la misma, mientras que los satélites miden la temperatura media de distintas capas de la troposfera y de la baja estratosfera, delimitadas por diferentes superficies de presión y de altura.

satélites presenta la ventaja de abarcar la totalidad del planeta incluyendo los océanos y no sólo de las regiones en existen estaciones meteorológicas. Además, la resolución de sus celdas es unas veinte veces mayor que las de los termómetros de superficie. Su principal desventaja es que las series disponibles abarcan un periodo muy corto, de algo más de tres décadas, y que modificaciones en la órbita de los satélites pueden afectar a la fiabilidad de sus resultados (Fu, 2005). Los resultados obtenidos con las mediciones de los satélites concuerdan razonablemente con las realizadas con los termómetros de superficie, aunque la tendencia del calentamiento de la gráfica satelitaria, durante las dos últimas décadas del pasado siglo y la primera década del siglo XXI, es ligeramente inferior a la registrada por los termómetros de superficie (Uriarte, 2010).

Por otro lado, se han realizado también mediciones de la temperatura con globos sonda, en una red de 63 estaciones repartidas por todo el planeta durante las cuatro últimas décadas del siglo XX (Angell, 1999). Aunque al principio los resultados presentaban valores algo menores a los conseguidos con termómetros de superficie, una serie de correcciones ha hecho que los valores sean similares a estos últimos (Sherwood *et al.*, 2005)

Otras pruebas que muestran el incremento de la temperatura ocurrido durante el siglo XX proviene de perforaciones en las rocas del subsuelo (Beltrami, 2006). Los resultados de cientos de perforaciones de la roca continental realizados en diferentes lugares de nuestro planeta permiten concluir que, por término medio, las temperaturas durante el siglo XX han aumentado aproximadamente 0,5°C, lo que concuerda con los obtenidos en las series termométricas de superficie. Además, parece ser que el incremento térmico comenzó hace más de cuatrocientos años, cuando la temperatura media era 1°C inferior a la actual, y que dicho incremento experimento una aceleración en pasado siglo (Pollack *et al.*, 1998).

En su último informe quinquenal, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) “*El estado del clima Mundial 2011 a 2015*” señala que la huella de los seres humanos es cada vez más visible y que los episodios meteorológicos extremos en relación con temperaturas elevadas se multiplicaron por 10 en los 5 últimos años. Estas anomalías térmicas se produjeron en lugares muy distantes (Australia, Estados Unidos, Argentina, Europa occidental o Asia Oriental), en forma de temperaturas máximas sin precedentes y olas de calor (OMM, 2016).

4.2.-EFECTOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

Aunque lo que más llama la atención en el día a día son los fenómenos meteorológicos extremos (olas de calor, lluvias torrenciales, huracanes, etc.), los efectos más obvios del calentamiento son los denominados impactos observados atribuidos al cambio climático como:

- ✓ el ascenso del nivel del mar;
- ✓ la desaparición del hielo (continental y marino);
- ✓ la modificación de las precipitaciones a nivel planetario.

4.2.1.- Ascenso del nivel del mar

A lo largo del siglo XX el nivel de las aguas oceánicas se incrementó entre 1,5 y 2 mm al año (unos 18 cm en el pasado siglo) y en lo que llevamos del siglo XXI se ha incrementado el ritmo hasta los 3 mm anuales. No obstante, existe un elevado grado de incertidumbre tanto por la escasez de estaciones, como por la complejidad de los cálculos, debido a las diferencias regionales en las tendencias. El nivel medio de mares y océanos puede ascender, fundamentalmente, por dos mecanismos: la fusión de los grandes depósitos de hielo continental (casquetes de hielo y glaciares) y un incremento del volumen oceánico por dilatación térmica del agua y disminución de su densidad. La mayor parte de la subida del siglo XX (unos 14 cm) habría sido debida al deshielo continental (Miller & Douglas, 2004), mientras que el calentamiento del agua habría sido responsable del resto de la subida: unos 4 cm. Esta subida de 4 cm ha sido estimada a partir de mediciones de la temperatura del agua marina⁴⁹. No obstante, según los últimos datos disponibles, el 90% de todo el calor extra causada por el cambio climático antropogénico es absorbida por los océanos (Escriva, 2017).

En cualquier caso, el deshielo es un fenómeno que se observa en todo del mundo (Himalaya, Patagonia, Alpes, Pirineos, etc.) destaca especialmente el polo Norte, siendo lo más preocupante lo que ocurre en Groenlandia. En efecto, esta gran isla cubierta casi por completo por una capa helada acumula nieve suficiente para elevar entre 6 y 7 metros el nivel de los océanos. En este sentido, la subida de 1

⁴⁹ Levitus *et al.* (2005), utilizando millones de perfiles térmicos de los océanos, han calculado que durante el período 1955-2003 se produjo un calentamiento global del océano de 0,04°C. El contenido calorífico de los océanos se ha incrementado fundamentalmente desde la década de los setenta del pasado siglo, detectándose algunos fenómenos regionales probablemente relacionados con este calentamiento global (Field *et al.*, 2006).

metro prevista por el IPCC para el 2100 implicaría que cientos de millones de personas se verían gravemente afectadas (IPCC, 2014).

Además del deshielo y de la expansión térmica del agua por calentamiento, existen otros factores que complican los cálculos de una tendencia media global de subida del nivel del mar, como los hundimientos del subsuelo, las variaciones de las corrientes oceánicas o los cambios de densidad del agua por modificación del contenido en sal, entre otros.

4.2.2.- Desaparición del hielo (continental y marino)

En cuanto a la desaparición del hielo, hay que destacar que más del 85 % del área terrestre ocupada por hielos permanentes se encuentra en la Antártida⁵⁰, un 10 % corresponde al hielo de Groenlandia y el resto (menos el 5%) al conjunto de todos los otros glaciares y pequeños casquetes helados. No obstante, veremos que para el sistema climático de nuestro planeta es fundamental la dinámica de la fusión de los hielos en las regiones polares del hemisferio norte, especialmente en el océano Ártico.

La observación con satélites del espesor del manto de hielo de la Antártida (período 1992-2003) muestra un aumento en gran parte de la Antártida Oriental y una disminución mayoritaria en la Antártida Occidental. Globalmente se ha producido un ligero incremento de 1,4 cm/año (Davis et al., 2005). Además, la mayor parte de los glaciares de la Península de la Antártida y de la plataforma marina adyacente de Larsen presentan en los últimos años una tendencia al retroceso, aunque no está claro que la única causa sea el calentamiento (Cook *et al.*, 2005). En cualquier caso la repercusión sobre el nivel del mar es prácticamente nula ya que se trata de hielo marino. Muchos autores piensan que estas variaciones del hielo están relacionadas con modificaciones en la circulación atmosférica y oceánica (Harangozo, 2006). En cuanto al hielo marino (banquisa) que rodea todo el continente antártico, experimenta una gran variación estacional, con una extensión máxima (entre 15 y 16 millones de km²) a finales del invierno austral (septiembre) y de solo 2 ó 3 millones de km² cuándo finaliza el verano (febrero). En cualquier caso, aunque se produjese un calentamiento en la Antártida durante estas próximas décadas el deshielo provocado tendría una repercusión mínima.

⁵⁰ El grosor medio del hielo en la Antártida es de 2,4 kilómetros, alcanzando en algunas zonas cerca de los 5 kilómetros. La fusión completa de los hielos elevaría el nivel del mar unos 60 metros. La mayor parte del hielo (cerca del 90 %) se encuentra en la Antártida Oriental.

Esto es debido a que en gran parte del continente antártico las temperaturas están muy por debajo del punto de congelación por lo que un incremento de 2 o 3 °C no provocaría apenas una fusión de hielo. Al contrario, este incremento térmico podría incrementar aumentar la humedad del aire y con ello las precipitaciones de nieve, lo que produciría una mayor acumulación de hielo. No obstante, el análisis en la acumulación de nieve durante la segunda mitad del siglo XX no muestra ningún cambio significativo (Monaghan *et al.*, 2006).

En cuanto al hielo del Ártico ya hemos señalado que desempeña un papel fundamental en el clima de nuestro planeta. El hielo marino del Ártico tiene una compleja estructura, formada por varias clases de hielo, con diferentes espesores, que puede variar desde unas finas láminas de hielo anual recién formado, hasta zonas de hielo multianual⁵¹ con varias decenas de metros de espesor. El espesor medio en el Polo Norte oscila entre 3 y 4 metros a finales del invierno (con grandes variaciones) y a mediados de verano, cuando las temperaturas medias en el están alrededor de los 0°C, presenta numerosas zonas por donde asoma el agua marina.

A lo largo de la primera mitad del siglo pasado, la superficie media ocupada por los hielos marinos del Ártico no experimentó modificaciones importantes. No obstante, durante las últimas décadas del siglo XX, la extensión mínima que alcanza el hielo marino en el Polo Norte tras la fusión estival muestra una tendencia a la disminución; la máxima superficie de finales del invierno (generalmente, febrero o marzo⁵²) también tiende a disminuir (Meier *et al.*, 2005). Parece que es la superficie de hielo multianual la que más se ha disminuido, que algunos autores lo relacionan con la intensificación de los vientos del oeste durante los últimas décadas que provocaría una entrada mayor de agua cálida y salada en el Ártico, proveniente del Atlántico a través de los mares de Noruega y Barents (Polyakov *et al.*, 2005). Además, la extensión del hielo en el Polo Norte, que es de varios metros por día, está ligado a la variabilidad de los índices NAO y AO⁵³,

⁵¹ A diferencia del hielo de la Antártida, cerca de la mitad del hielo marino del Ártico es hielo multianual (hielo que sobrevive al menos un verano).

⁵² La máxima extensión de hielo en el Ártico en 2016 (marzo) fue la más baja de toda la historia documentada; en septiembre de ese mismo año, cuando la banquisa ártica presenta los mínimos anuales, la superficie alcanzada por los hielos fue la segunda más baja de todas las registradas (OMM, 2017).

⁵³ El índice NAO (North Atlantic Oscillation) o Índice de Oscilación del Atlántico Norte y del índice AO (Arctic Oscillation) o Índice de Oscilación del Ártico.

índices que reflejan la intensidad de la componente zonal de los vientos atlánticos (Rigor, 2004).

Durante el siglo XX, las costas del Ártico experimentaron un fuerte incremento térmico, ($>1^{\circ}\text{C}$), entre los años 1920 y 1940⁵⁴; posteriormente, las temperaturas disminuyeron entre 1940 y 1970 y, por último, volvieron a subir desde 1970, intensificándose en estos últimos años. El reciente incremento de las temperaturas del Ártico puede explicarse en parte por el aumento de los gases invernadero (CO_2 , metano, ozono troposférico, aerosoles antrópicos, etc.) y el efecto de retroalimentación positiva provocado por la fusión del hielo marino y la disminución del albedo. También, la reducción de la banquisa del ártico ha podido facilitar que el mar transfiera con más facilidad su calor al aire, al disminuir el aislamiento térmico de la capa de hielo. Por otra parte, el ozono transportado hacia el Ártico desde los cielos contaminados de Norteamérica, Rusia o China, ha podido causar entre el tercio y la mitad del calentamiento del Ártico registrado en la segunda mitad del siglo XX (Shindell *et al.*, 2006). El efecto invernadero provocado por los aerosoles de origen antrópico (quema de combustibles fósiles o incendios agroforestales) provenientes de latitudes medias, como Estados Unidos, Europa, Rusia y China es mayor que al incremento de los gases efecto invernadero (Lubin & Vogelmann, 2006; Garrett & Zao, 2006); además, dichos aerosoles provocan la suciedad del hielo, reduciendo su albedo y contribuyendo así al proceso de deshielo estival (Warneke *et al.*, 2010).

A pesar que el Ártico desempeña un destacado papel en el sistema climático de la Tierra y es el protagonista de gran parte de las publicaciones sobre el calentamiento global y el cambio climático, no podemos olvidarnos del manto de hielo de Groenlandia, que es la segundo en importancia de nuestro planeta. El manto de hielo de Groenlandia contiene un volumen de hielo cuya fusión completa significaría una subida global del nivel del mar de unos 7 metros, aunque la probabilidad de que esto se produzca es muy remota. Probablemente, en caso de calentamiento, el comportamiento del manto de hielo presentaría diferencias entre las zonas de la costa y del interior, donde las temperaturas son mucho más bajas. Se piensa que la mayor acumulación anual de hielo en el interior se correlaciona con una mayor circulación de los vientos del sur (Johannessen *et al.*, 2005). No

⁵⁴ Este temprano incremento térmico del Ártico a comienzos del siglo XX parece revelar que algunos fenómenos naturales (aerosoles de origen volcánico o cambios en las corrientes oceánicas o en los ciclos astronómicos de insolación) han debido tener tanta importancia, al menos en ese momento, como los provocados por las actividades humanas (Moritz *et al.*, 2002).

obstante, debido a la gran extensión y diferencias de altitud de Groenlandia, la influencia de la dirección del viento puede presentar diferencias entre norte y sur, así como entre la región central y las zonas de los márgenes.

Los glaciares y pequeños casquetes de hielo de montaña (excluidos los mantos de hielo de la Antártida y de Groenlandia) tienen un volumen cuya descongelación elevaría el nivel del mar unos 0,5 m. Estos glaciares suponen algo menos del 3% de la superficie de hielo de la Tierra. Las causas de sus avances y retrocesos son muy complejas ya que intervienen factores que muchas veces se contraponen, como temperaturas, y precipitaciones de nieve⁵⁵. En cualquier caso, desde mediados del siglo XIX, la mayoría de los glaciares analizados han retrocedido considerablemente (Oerlemans, 2005).

Para finalizar este apartado sobre la evolución de los hielos en nuestro planeta, el último informe del IPCC señala como muy probable el hecho de que la influencia del hombre haya contribuido a la disminución del volumen en el Ártico (desde 1979), al retroceso de los glaciares (desde la década de los 60) y a un incremento en la fusión del hielo en Groenlandia (desde 1993). La gravedad de la fusión del hielo en la región Ártica puede tener graves consecuencias para el sistema climático ya que el mecanismo de realimentación a consecuencia de la disminución del albedo contribuye a amplificar el calentamiento (IPCC 2014).

4.2.3.- Modificación de las precipitaciones a nivel planetario

La tercera consecuencia del cambio climático y el calentamiento está relacionada con la modificación de las precipitaciones (humedad, nubes, lluvia, sequías o huracanes) a lo largo del planeta. A pesar de que en este tema existen muchas diferencias entre las distintas regiones de la Tierra es donde se hace más patente el calificativo de Global cuando nos referimos al cambio climático o al calentamiento.

Ya sabemos que cuando se produce un incremento de temperatura se origina una mayor evaporación en mares y océanos lo que provoca posteriormente un incremento de las precipitaciones. Esta es la razón de que los últimos años sean más húmedos a nivel global pero con importantes diferencias regionales Oriente Medio Mediterráneo o sur de Australia presentan una reducción notable de las precipitaciones.

Existen pocos datos sobre la evolución de la humedad de la atmósfera en nuestro planeta a lo largo del pasado siglo XX. Además, otro problema añadido es que el

⁵⁵ Un calentamiento suele verse acompañado por una mayor precipitación de nieve y viceversa.

vapor de agua no tiene un reparto espacial uniforme, lo que complica la cuantificación para conocer su posible evolución a nivel global. Los valores más altos de humedad se encuentran en las latitudes ecuatoriales y los más bajos en las latitudes cercanas al polo. Con una temperatura más elevada se incrementa la evaporación y a la vez también aumenta la capacidad del aire para retener la humedad. Por este motivo, si se produce un aumento de la temperatura del aire, por incremento de la radiación solar o del CO₂, se produce también un aumento de la concentración de vapor de agua en la atmósfera, amplificándose el calentamiento que existía al principio, por un mecanismo de retroalimentación positiva.

Debemos tener en cuenta que el principal gas de efecto invernadero de la atmósfera terrestre es el vapor de agua. En este sentido, más del 60% del efecto invernadero en la Tierra (unos 33°C) ⁵⁶ es debido al vapor de agua, gracias a su elevada eficiencia a la hora de capturar las radiaciones infrarrojas terrestres. Las mediciones realizadas con satélite sobre los océanos muestran una elevada correlación entre la temperatura del aire en la parte baja de la troposfera y su contenido en vapor de agua; así, a mayor temperatura, mayor contenido de humedad, y viceversa (Wentz & Schabel, 2000)

En relación con los modelos climáticos, existen muchas complicaciones para determinar tanto la evolución de la concentración de humedad como las variaciones de la misma entre los diferentes niveles de la atmósfera. Aunque es complicado conocer la evolución y los efectos que produce el vapor de agua es todavía más difícil cuando queremos conocer la condensación del agua atmosférica (nubes). Las nubes influyen sobre los flujos de energía del sol y de la tierra de varias formas provocando efectos que en ocasiones son opuestos. Así, en relación con la radiación solar, el resultado del efecto reflectante (albedo) origina una pérdida de energía, mientras que por lo que se refiere a la radiación terrestre se produce el resultado opuesto (efecto invernadero), una ganancia de energía⁵⁷;

⁵⁶ El efecto invernadero (E.I.) natural de la Tierra hace posible la vida como la conocemos. En ausencia del mismo la temperatura de nuestro planeta sería de -18°C (18° bajo cero).y gracias a él dicha temperatura es de unos 15°C. Sin la contribución al E.I. del vapor de agua (unos 20°C) la temperatura media en la Tierra sería de unos -5°C (5° bajo cero).

⁵⁷ Las nubes incrementan el albedo de la tierra en un 15%, lo que supone aproximadamente una pérdida de 50W/m². Como contrapartida está la retención que las nubes realizan sobre la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre que supone una ganancia total de unos 30W/m² metro cuadrado. en resumen el forzado radiativo que resulta es de -20W/m². No obstante, existen muchas discrepancias sobre este valor y muchos modelos climáticos asignan un valor de enfriamiento neto a las nubes de -30W/m² por metro cuadrado (Cess, 2005).

ambos efectos dependen de una serie de factores: tamaño de las gotas, así como densidad, espesor y altitud de las nubes, etc. Globalmente, el efecto de las nubes sobre la superficie de nuestro planeta es el de enfriar. En cualquier caso, el efecto radiativo de las nubes presenta muchas diferencias entre unas zonas y otras de nuestro planeta. El balance entre la energía absorbida y reflejada depende fundamentalmente del tipo de nube, la latitud y la estación del año. Según la latitud, las nubes producen en su balance de radiación un pequeño calentamiento en zonas tropicales, un importante enfriamiento en latitudes medias y un pequeño calentamiento en latitudes altas, cerca de los polos. Otro aspecto destacable es que, generalmente, las nubes producen un enfriamiento de los días y un aumento de la temperatura durante las noches, por lo que tienden a disminuir las diferencias térmicas entre las máximas diurnas y las mínimas nocturnas.

En general, las nubes bajas (estratos) reflejan una gran cantidad de energía solar hacia arriba y, por el contrario, retienen poca radiación infrarroja terrestre por lo que su efecto es un enfriamiento de la superficie, que algunos calculan en unos 15W/m^2 vatios por metro cuadrado. Sin embargo, las nubes altas (cirros) dejan pasar una gran cantidad de radiación solar entrante (tienen poco efecto albedo), atrapando la mayoría de la energía terrestre que llega hasta ellas, por lo que calientan la superficie terrestre, aunque existen diferencias entre unos cirros y otros. En relación con otros tipos de nubes, como los cúmulos, existen muchas más incertidumbre sobre su comportamiento radiativo.

La superficie de nuestro planeta está cubierta, aproximadamente, por un 65% a 68% de nubes, porcentaje que varía en función de una serie de parámetros como: temperatura, humedad y núcleos de compensación presentes en el aire; las pequeñas gotas de agua de las nubes se forman siempre en presencia de estos núcleos, formados por aerosoles naturales y antrópicos, así como por partículas ionizadas relacionadas con la radiación solar y cósmica, lo que tienen una gran importancia en los cambios que se producen en la nubosidad terrestre. Así, la contaminación provocada por partículas volátiles sobre las grandes concentraciones urbanas incrementa la nubosidad de tipo medio y bajo, mientras que el aumento del tráfico aéreo lo hace con la capa de cirros altos (Stubenrauch & Schumann, 2005). La evolución de la cobertura de nubes en el futuro es uno de los mayores problemas con que encuentran los modelos climáticos. Parece ser que la nubosidad aumentó entre 1960 y finales de la década de los 80, produciendo un oscurecimiento global, especialmente en zonas urbanizadas (Alpert *et al.*, 2005). Se estima que dicho oscurecimiento produjo una disminución de la radiación solar

en la superficie de nuestro planeta de más de 6 W/m^2 , qué equivaldría a un incremento en el 2% del albedo terrestre (Charlson *et al.*, 2005). Este fenómeno del oscurecimiento debería de haber provocado una bajada de las temperaturas y no el incremento de $0,4^\circ\text{C}$ que se produjo, contradicción que puede explicarse porque probablemente haya ocurrido una disminución de la evaporación en los continentes, provocando que el suelo pierda menos calor, con lo que incrementa su temperatura y la del aire.

Existe una gran variabilidad en las precipitaciones de lluvia, y también de nieve, en nuestro planeta, lo que unido a la escasez de datos estadísticos sobre las mismas hace que su tendencia no se conozca con exactitud. A pesar de ello, algunos trabajos señalan que, en la segunda mitad del pasado siglo, la media de precipitación anual en los continentes oscilaría alrededor de los 800 litros por metro cuadrado al año. Generalmente, en el hemisferio norte cuando más llueve es en verano (el clima mediterráneo es una excepción). En efecto, el calor continental del verano produce bajas presiones que atraen hacia la tierra el aire húmedo procedente del mar. Las precipitaciones de lluvia más abundantes llegan con los monzones, que afectan al sur de Asia, al sur del Sáhara y a Norteamérica; en otras zonas alejadas del mar con clima continental las altas temperaturas originan nubes de desarrollo vertical, fenómenos tormentosos y posteriores precipitaciones.

Los modelos climáticos, generalmente calculan que debería de producirse un aumento del 3% de las precipitaciones por cada grado que aumenta la temperatura media global, debido a que el incremento de calor intensifica el ciclo hidrológico de evaporación -precipitación. No obstante, la precipitación global en nuestro planeta no indica hasta el momento ninguna tendencia clara (Uriarte, 2010). En el ciclo hidrológico de la Tierra se produce un transporte aéreo de vapor de agua de 45 billones de metros cúbicos desde los océanos hasta los continentes que una vez que precipitan llegan a los ríos y desde estos al mar (Oki & Kanae, 2006). Si se produjese un calentamiento global el ciclo hidrológico se incrementaría, disminuyendo la aridez de los continentes a escala global. En este sentido, una señal de la reducción de la aridez a nivel global es el hecho de que el caudal de los ríos parece haber aumentado en mayor medida que la cuantía total de las precipitaciones. Esto indicaría un aumento de la humedad en los suelos, que para algunos autores estaría provocado por una menor evapotranspiración de la vegetación ya que el incremento en la concentración de CO_2 en el aire provoca el cierre de los estomas de las hojas, evitando de esta manera la evaporación de agua (Gedney *et al.*, 2006)

En las últimas décadas no se ha producido un cambio significativo en la frecuencia de huracanes (ciclones tropicales) en el conjunto de los océanos de nuestro planeta, siendo especialmente complicado determinar si ha habido cambios en la frecuencia de los huracanes de mayor intensidad (categorías 3 a 5) (Landsea *et al.*, 2006). Además, la hipótesis de que se producirán más huracanes en el futuro por un calentamiento del planeta es un aspecto todavía sin aclarar. Así, algunos autores creen ver un incremento en la fuerza de los huracanes durante las tres últimas décadas, relacionado quizás con el calentamiento registrado durante el verano en las aguas tropicales (Webster, 2005). No obstante la tendencia en cuanto la intensidad, tamaño y duración de los huracanes (Índice ACE) indica que a nivel global y en los últimos años no habido un incremento de la energía acumulada.

4.3.-CAMBIOS EN LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y OCEÁNICA

Los cambios o variaciones en la circulación atmosférica y oceánica, desempeñan un importante papel en el funcionamiento del sistema climático de nuestro planeta. A lo largo de las últimas décadas, se ha producido en la estratosfera un importante incremento, tanto del contenido en CO₂ como del vapor de agua procedente de la troposfera y también de la descomposición del metano. Desde 1960 hasta finales del pasado siglo se ha constatado un aumento del vapor de agua de entre el 20 y el 50% (Joshi *et al.*, 2006), aunque, por motivos desconocidos, durante la primera década del siglo XXI se ha reducido en un 10% (Solomon *et al.*, 2010). El CO₂ y el vapor de agua, que actúan como gases de efecto invernadero en la troposfera, tienen el efecto contrario en la estratosfera, donde provocan un enfriamiento. Además, de manera indirecta pueden influir en la disminución de la concentración de ozono. En la estratosfera, el ozono contribuye a su calentamiento por lo que su disminución implica un enfriamiento de la misma. Los cambios fisicoquímicos que producen variaciones en la circulación de los vientos en la estratosfera pueden tener repercusiones en la troposfera.

En cuanto a la circulación de vientos en la troposfera, una de las oscilaciones que tiene más implicaciones en el clima de nuestro planeta es la que se refiere a los vientos del oeste de las latitudes medias. En este sentido, la diferente intensidad y ondulación de estos vientos del oeste influye sobre las temperaturas de las latitudes medias y altas del continente euroasiático. Cuando el flujo presenta más ondulaciones y los vientos son más débiles, la influencia Atlántica suaviza las temperaturas en el interior del continente. De esta manera, el anticiclón siberiano se fortalece, incrementando la dureza de los inviernos. La intensidad y ondulación

de los vientos del oeste, sobre todo durante la época invernal, está relacionada con la diferencia media de presión existente entre las Azores (altas presiones) e Islandia (bajas presiones), que recibe el nombre de Oscilación del Atlántico Norte (NAO⁵⁸). Algunos autores piensan que los valores del índice NAO tienen intervalos cíclicos de varias décadas de duración (Polyakov & Johnson, 2000). Probablemente, las variaciones en el índice NAO estén relacionadas con la circulación termohalina del Atlántico Norte (Hughen *et al.*, 2000). En las zonas cercanas al Polo del continente euroasiático, una serie de cambios hidrológicos tienen como resultado el incremento de la escorrentía de los ríos de Siberia, cuando existe un índice NAO positivo, lo que puede debilitar la circulación termohalina ya que las aguas del Atlántico Norte y del Ártico disminuyen su concentración salina (Curry & Mauritzen, 2005). Es posible que se produzcan mecanismos de retroalimentación entre el índice NAO y el clima del continente euroasiático.

A nivel del hemisferio norte, se puede emplear también el índice de Oscilación Ártica (AO⁵⁹), que engloba también a la NAO, existiendo una elevada correlación entre ambos. A lo largo del Holoceno se ha producido una variabilidad cíclica en el índice AO, con intervalos aproximados de tres milenios (Uriarte, 2010).

Otro fenómeno térmico regional importante es la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO⁶⁰), que afecta a las aguas del Pacífico Norte, en contraposición al fenómeno del Niño que afecta al Pacífico tropical. Se trata de un patrón de temperatura que ocurre, generalmente, cada 20 o 30 años, con una fase positiva (cálida) y una fase negativa (fría).

El Niño-Oscilación Sur (ENOS⁶¹) es una variación periódica de los vientos y temperaturas de superficie del océano Pacífico tropical Oriental, particularmente las zonas costeras de Ecuador, Perú y norte de Chile (Capel, 1999). La fase atmosférica se acompaña de altas presiones en el Pacífico Occidental y de bajas

⁵⁸ En inglés, North Atlantic Oscillation; cuando la diferencia de presiones es más alta de lo normal se dice que hay una NAO positiva con vientos del oeste más intensos; por otro lado, cuando esa diferencia es pequeña el índice NAO es negativo y los vientos del oeste son más flojos. El equivalente de la NAO en el Océano Pacífico se denomina El Niño.

⁵⁹ En inglés, Arctic Oscillation; depende de las diferencias existentes entre las bajas presiones del Ártico y las altas presiones subtropicales.

⁶⁰ En inglés, Pacific Decadal Oscillation. Se calcula realizando la media espacial de las anomalías de temperatura del Pacífico Norte por encima de los 20 grados de latitud. Un índice PDO positivo (fase cálida) suele coincidir con el Niño.

⁶¹ En inglés ENSO (El Niño - Southwest Oscillation) denomina al Niño porque generalmente el fenómeno se produce por la Navidad. El niño hace referencia al componente oceánico y la Oscilación del Sur al componente atmosférico. Tiene tres fases: la caliente, el niño, la fría, la niña y una fase neutra. El Índice de Oscilación Sur (IOS) mide la fuerza y fase; ocurre generalmente cada 2 a 8 años.

presiones en el Pacífico Oriental. El ENOS origina cambios globales que afectan tanto a las temperaturas como las lluvias. En este sentido, el Niño puede aumentar o disminuir la temperatura del planeta en más de 0,5 grados centígrados. Durante el fenómeno del Niño los vientos alisios que soplan del este hacia el oeste desaparecen y son sustituidos por vientos que tienen una dirección contraria. En el océano, una corriente de agua cálida que viene del oeste se acumula en aquella zona originando que el nivel medio del mar frente a la costa sudamericana se le ve varias decenas de centímetros. En el Pacífico occidental ocurre el fenómeno contrario, produciéndose una disminución de la temperatura superficial del agua en los mares de Indonesia y norte de Australia, con descensos en el nivel del mar de hasta 50 cm en algunas zonas. En cuanto a las lluvias el Niño provoca fuertes precipitaciones en las costas de Ecuador Perú y norte de Chile zonas que generalmente son muy áridas. Sin embargo, en la otra parte del Pacífico se producen sequías en Indonesia y norte de Australia regiones que generalmente son muy húmedas. Desde el año 1900, se han registrado alrededor de 30 episodios del Niño, siendo los más intensos los de los años 1982-83, 1997-98 y 2014/16.

Al igual que los fenómenos cíclicos del Niño afectan, sobre todo, a las aguas superficiales del océano, es probable que existan fluctuaciones cíclicas de siglos o milenios que afecten a las corrientes oceánicas profundas, fundamentalmente a las del Atlántico. Para Broecker *et al.*, (1999), el agua profunda⁶² atlántica que se produce en los Mares Nórdicos y en los mares el sur que rodean la Antártida, varía de forma cíclica, aumentando alternativamente el caudal de uno u otro origen (norte o sur). A lo largo del siglo pasado, la producción de agua profunda en los Mares del Sur ha disminuido considerablemente, lo que históricamente se correspondería con un incremento de la formación de agua profunda en el norte del Atlántico. Este hecho provocaría un mayor empuje de la Corriente del Golfo⁶³ y, con ello, un calentamiento del Atlántico Norte. De corroborarse este fenómeno, el calentamiento del hemisferio norte se podría explicar por este ciclo oceánico más que por el aumento de los gases de efecto invernadero.

⁶² Desde hace unas décadas se sabe que la estructura de las corrientes marinas a nivel global es tridimensional, con movimientos horizontales (en los que el viento desempeña un importante papel) y con movimientos verticales, en los que las fuerzas motoras son la salinidad y la temperatura. Así, las corrientes superficiales, conocidas secularmente, están vinculadas por movimientos convectivos de agua, a corrientes profundas, que hasta hace unos años eran poco conocidas (Uriarte, 2010).

⁶³ La Corriente del Golfo, juega un papel trascendental en la distribución latitudinal del calor. La mayor parte del calor excedentario recibido en el Trópico (radiación solar entrante menos radiación infrarroja saliente) es llevado hacia latitudes que son deficitarias. Gracias a la corriente marina, el aire frío y seco que sale desde el continente americano, impulsado por los vientos del oeste, se carga de humedad y absorbe calor durante su camino por el Atlántico Norte, por lo que llega húmedo y templado al continente europeo (Uriarte, 2010).

4.4.-GASES EFECTO INVERNADERO (GEI)

En la atmósfera hay muchos gases con efecto de invernadero, pero no todos inciden de la misma forma en el calentamiento de la misma, debido a que tienen concentraciones distintas y tienen una capacidad diferente de absorber la radiación terrestre. De todos estos gases el protocolo de Kyoto considera seis: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), el hexafluoruro de azufre (SF₆), los compuestos perfluorinados (PFC) y los hidrofluorcarburos (HFC). Aunque el vapor de agua es el gas que absorbe la radiación terrestre con mayor efectividad, cuando se trata de la cuestión del calentamiento de la atmósfera debido a la actividad humana no se incluye este gas en los balances ya que apreciablemente su concentración varía con la temperatura pero no por causa directa atribuible a las actividades humanas. Otro gas con efecto invernadero es el ozono. Hay que distinguir entre el ozono estratosférico y el ozono en la troposfera.. Aunque la concentración de cada uno de los gases con efecto invernadero es distinta, se suele convertir su efecto global sobre la energía de la atmósfera a la concentración equivalente de dióxido de carbono (CO₂-equivalente).

Por todo ello, a continuación veremos los principales GEI : CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃) y halocarburos.

4.4.1.- CO₂ (Dióxido de carbono)

La concentración de CO₂ en la atmosfera experimento un formidable aumento a lo largo del pasado siglo XX, que continúa en el presente siglo. Hacia 1750, antes del inicio de la revolución industrial, la concentración de CO₂ en la atmósfera era de unas 280 ppm -partes por millón- (0,028%), superando en la actualidad las 400 ppm⁶⁴ (0,04%), lo que supone un incremento aproximado de un 45 %⁶⁵.

Desde el año 1958 se han realizado, de modo sistemático y riguroso, mediciones de las concentraciones de CO₂ atmosférico por parte del investigador de la NOAA, Ch.D.Keeling, por lo que su representación gráfica se conoce como “**curva de**

⁶⁴ El 24 de octubre de 2016, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) afirmó que el planeta comenzaba una nueva era climática, basándose en el hecho de que la concentración de CO₂ en la atmósfera había superado por primera vez en la historia reciente las 400 partes por millón. Los niveles de CO₂ habían alcanzado anteriormente esa cifra pero solo en determinados lugares del planeta. Ahora se trataba de una medición a escala mundial durante todo un año (OMM, 2017).

⁶⁵ Aunque gran parte de este incremento es imputable a la quema de combustibles fósiles, se calcula que un 35 % del aumento en los últimos tres siglos ha sido debido a cambios en los usos del suelo producidos por el desarrollo del sector agrario (Foley *et al.*, 2005).

Keeling” (ver Figura 7). Dichas mediciones muestran un incremento mantenido en la concentración media de CO₂: desde 315 ppm (en 1958) hasta 400 ppm (mayo de 2013) y 409 ppm en abril de 2017 (403 en septiembre de 2017) (NOAA, 2017). La tasa de incremento de la concentración de CO₂ en el aire se ha acelerado desde 0,7 ppm/año en la década de 1960 a más de 2 ppm/año en el presente siglo, con un valor medio aproximado de 1,5 ppm, lo que en cantidades absolutas supone unas 3 Gts⁶⁶ de carbono por año.

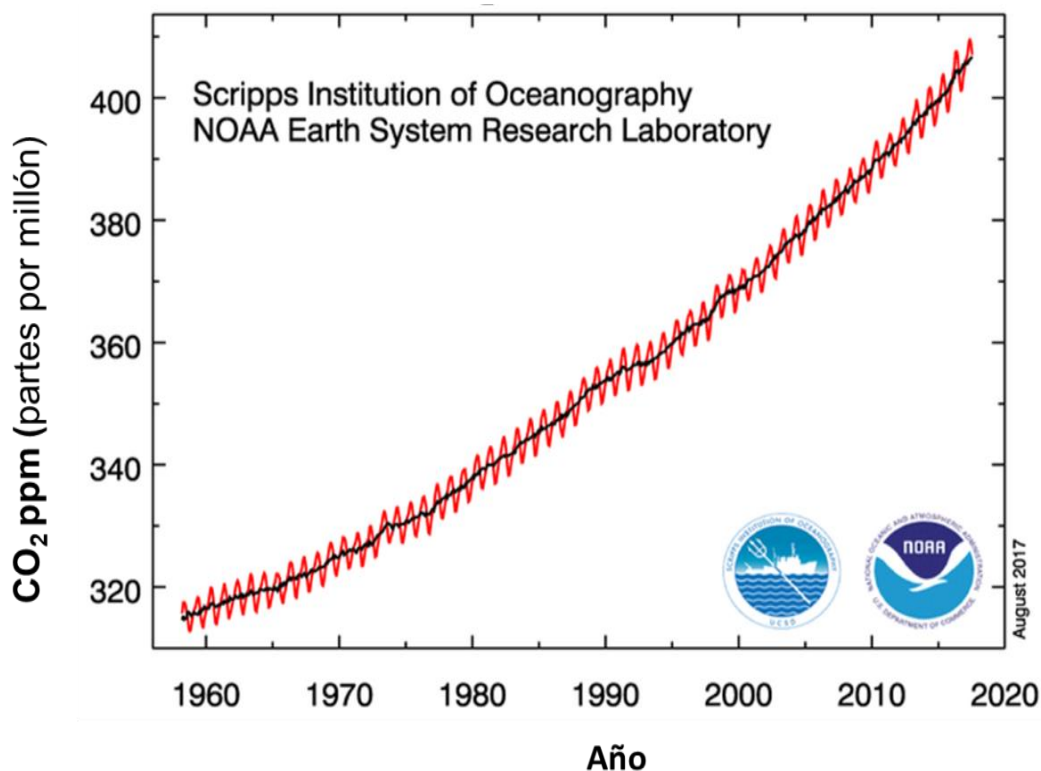


Figura 7. Curva de Keeling: evolución de la concentración de CO₂ de la atmósfera en el observatorio de La Jolla (California), desde 1958 a 1974 y en el observatorio del volcán Mauna Loa (Hawái), desde 1975 a 2017). Fuente: NOAA 2017

⁶⁶ Una Gt (Gt) son mil millones de toneladas y que equivale a Petagramo (Pg), que es la unidad de masa de Sistema Internacional, y que son 10¹⁵ gramos. 1 PgC = 3,7 Pg de CO₂ . 1 ppm en la concentración atmosférica de CO₂ = 2,12 Petagramos de carbono.

En la gráfica sobre la evolución de la concentración atmosférica de CO₂ (figura 8), se observan unas oscilaciones estacionales invierno-verano de varias partes por millón, por lo que el incremento del CO₂ es una línea quebrada de picos y valles.

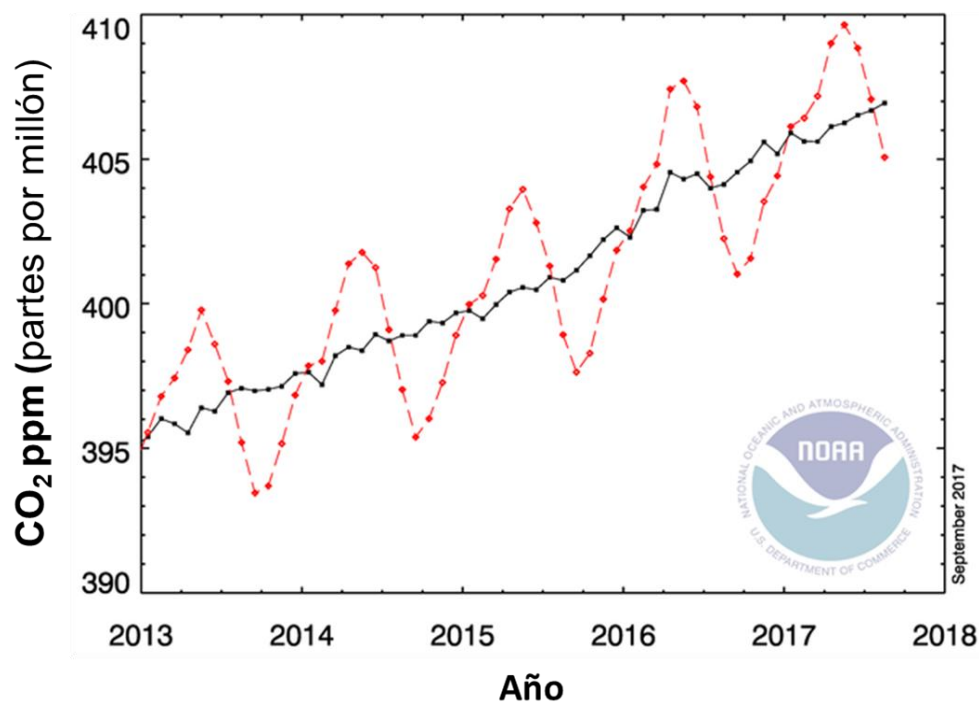


Figura 8. Variaciones mensuales del CO₂ en el observatorio Mauna Loa (Hawái) entre enero 2013 y agosto de 2017. Fuente: NOAA 2017.

Así, durante la estación de crecimiento vegetativo (fundamentalmente en latitudes medias y altas del hemisferio norte) la vegetación capta CO₂ del aire, por lo que su concentración en la atmosfera se reduce. Por contra, durante la etapa invernal, la biomasa terrestre pierde carbono, aumentando la concentración en el aire de CO₂. La figura 8 muestra una típica gráfica con “dientes de sierra” que se corresponden con los cambios estacionales en el total de biomasa terrestre. Debido a que la cantidad de biomasa presente en el hemisferio norte es mucho mayor que la del hemisferio sur, su ciclo es dominante en el conjunto de la atmósfera de la Tierra. En Mauna Loa (hemisferio norte) se suele alcanzar el pico de máxima concentración de CO₂ en el aire durante el mes de mayo y el valle de mínima en

los meses de septiembre u octubre; la diferencia entre ambos valores oscila entre las 5 y las 7 ppm⁶⁷.

La emisión y variaciones en la concentración de CO₂ han estado presentes en la atmósfera, como hemos visto, desde mucho antes de que el ser humano estuviera presente en la Tierra, pero había sido por una serie de causas naturales (ciclos de Milankovic, actividad solar, erupciones volcánicas, etc.). El incremento de CO₂ en la atmósfera presenta unos valores anuales muy variables que dependen fundamentalmente de la productividad primaria neta global. Dicha productividad está relacionada con el desarrollo de la vegetación y con otros aspectos biológicos, como: variaciones en la temperatura del suelo, espesor de la nieve invernal y, sobre todo, la mayor o menor ocurrencia de sequías importantes (Zhao & Running 2010). Los cambios ligados al fenómeno del Niño parecen tener una influencia compleja pero importante, sobre todo por los incendios en los bosques y turberas tropicales⁶⁸, vinculados a las sequías que a veces lo acompañan.

El aumento del CO₂ atmosférico por las actividades humanas, desde las 280 ppm de los tiempos preindustriales hasta las aproximadamente 400 ppm actuales, supone alrededor del 50% del forzamiento radiativo provocado por los gases de efecto invernadero. En este sentido, se calcula que el paso de la concentración preindustrial de CO₂ a la actual ha supuesto un incremento directo de la temperatura media global de unos 0,7 °C (IPCC, 2014).

Para el año 2100, los modelos empleados por el IPCC prevén que la concentración de CO₂ fluctuará entre las 500 ppm y 1.000 ppm. El aumento global de gases de efecto invernadero (GEI) provocará un forzamiento radiativo teórico de entre 4 W/m² y 9 W/m², con un incremento medio de 1,2°C, pero que al añadir una serie

⁶⁷ En las latitudes altas y medias del hemisferio norte es donde son más acusados los ciclos estacionales. La mayor diferencia anual entre el pico y el valle de la concentración de CO₂ se da en el Ártico: entre 15 y 20 ppm. Esta diferencia anual disminuye en latitudes bajas, hasta unas 3 ppm en las proximidades del Ecuador, debido a la menor influencia que tiene la estacionalidad en la actividad de las plantas tropicales. En el Polo Sur la diferencia es prácticamente nula. Por ello, aunque los procesos de transporte y mezcla del aire troposférico tienden a que la atmósfera del planeta tenga una composición química uniforme, siempre existen diferencias latitudinales en la concentración de CO₂ que reflejan los desfases temporales entre norte y sur en la estacionalidad vegetativa (Uriarte, 2010).

⁶⁸ Se calcula que en 1997 el incremento atmosférico de CO₂ se duplicó debido a que en Indonesia se quemó una superficie cercana al millón de hectáreas, casi todas turberas tropicales con un elevado contenido de carbono. Por ese motivo, la emisión global de CO₂ fue entre un 13% y un 40 % superior a la normal (Page *et al.*, 2002).

de mecanismos de retroalimentación previstos en distintos modelos climáticos el aumento de temperatura oscilaría entre 1,4°C y 5,8°C (IPCC, 2014). Este incremento térmico se debe fundamentalmente al aumento de la concentración de vapor de agua en el aire, que es el agente más destacado del calentamiento (se estima que, en una atmósfera sin nubes, el vapor de agua es responsable del 60 % del efecto invernadero total). Por ello, el efecto de retroalimentación por el aumento de vapor de agua provocará un efecto radiativo mayor que el resto de GEI (Karl & Trenberth, 2003). No obstante, el vapor de agua interviene también en la evolución y el comportamiento de la nubosidad, aunque se desconoce en gran medida como se produce (Uriarte, 2010).

El incremento de CO₂ en la atmósfera se produce, principalmente, por la quema de combustibles fósiles, que devuelve a la atmósfera en un breve periodo de tiempo carbono que llevaba Millones de años atrapado, así como por la deforestación y otras prácticas agrarias

La atmósfera de la Tierra contiene, aproximadamente, unas 800 Gt de carbono. La transformación del paisaje de nuestro planeta como consecuencia de las actividades humanas (agricultura, ganadería, actividades forestales, etc.) ha provocado, a lo largo de la historia, una transferencia de más de 400 Gt de carbono desde los ecosistemas continentales hacia la atmósfera y los océanos. Por otra lado, la quema de combustibles fósiles desde el comienzo de la revolución industrial ha generado una cantidad de unas 270 Gt de carbono (Lal, 2004). No obstante, la mayor parte de dicho carbono ya ha sido capturado, mediante procesos naturales, por la vegetación de continentes y océanos.

En cualquier caso, la superficie terrestre contiene mucho más carbono que los 800 Gt de carbono contenido en la atmósfera. Así, la cantidad de carbono almacenado en el primer metro de la superficie del suelo⁶⁹ triplica al del aire (unas 2.500 Gt, de las que más del 60% están como carbono orgánico y cerca del 40 % en forma de carbono inorgánico). El carbono contenido en la vegetación es de unas 600 Gt. La transformación de los ecosistemas naturales en sistemas agrarios (agrícolas, ganaderos o forestales) supone, generalmente, pérdidas del 60% del carbono del suelo en latitudes templadas y superiores al 75% en suelos cultivados de los trópicos.

⁶⁹ Las reservas de carbono contenido en el primer metro del suelo presentan grandes diferencias según la zona. Así, en zonas áridas el carbono de suelo es de unas 30 toneladas/hectárea (t/ha) mientras que en ecosistemas de turberas ubicadas en latitudes altas es de unas 800 t/ha, con unos valores medios que oscilan entre 50 t/ha y 150 t/ha (Lal, 2004).

En los ecosistemas forestales (bosques y suelos) se encuentra la mayor parte del carbono orgánico terrestre, por lo que la modificación de los mismos es trascendental, especialmente en regiones tropicales. En este sentido, la deforestación junto con la erosión edáfica, implica normalmente una pérdida de biomasa y el retorno a la atmósfera, como CO₂, del carbono capturado durante la actividad fotosintética. Por ello, la existencia de grandes áreas tropicales en las que después de la tala de árboles no se reestablece la cobertura vegetal, para recuperar el carbono perdido, contribuye al incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera. No es sencillo cuantificar las pérdidas que se producen en la biomasa vegetal o en los suelos.

Generalmente, la deforestación en zonas boscosas tropicales está relacionada con incendios provocados para incrementar las tierras dedicadas a cultivos agrícolas o pastos para la ganadería. Se calcula que estas prácticas ocasionan la pérdida de dos tercios de las selvas tropicales, aproximadamente unos 6 millones de hectáreas al año (Willis *et al.*, 2004). En latitudes más altas, destacan los incendios en los bosques de Siberia⁷⁰, que almacenan la mitad del carbono de los ecosistemas forestales del planeta. Se estima que los incendios arrojan a la atmósfera alrededor de 3,5 Gt⁷¹ de carbono al año (Balzter *et al.*, 2005), que si no fuese capturado en parte por la vegetación provocaría, si un incremento de 1,8 ppm en la concentración de CO₂ atmosférico. A lo largo del pasado siglo XX, la quema de biomasa en bosques y sabanas de nuestro planeta, han sido una fuente muy importante de carbono, probablemente infravalorada respecto a sus implicaciones climáticas. Así, a principios del siglo XX los incendios emitían a la atmósfera entre 1,5 y 2,7 Gt de carbono (Mouillot *et al.*, 2006). Además, no debemos olvidar que en muchos países subdesarrollados, la madera sigue siendo el principal combustible de uso doméstico, calculándose que la quema de la misma genera anualmente entre 2,5 y 5 Gt de carbono (Imhoff *et al.*, 2004).

Por estimaciones indirectas (basadas en la concentración de CO₂ atmosférico) se calcula que, en los últimos años, la cantidad de carbono presente en la atmósfera se incrementa como media entre 3 Gt y 4 Gt al año. No obstante, las emisiones

⁷⁰ A comienzos del presente siglo, en un solo verano, una serie de incendios descontrolados en Siberia quemaron 22 millones de hectáreas, lo que supuso una emisión de más de 700 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera.

⁷¹ Aproximadamente, un 50% de las emisiones es debido a la quema de hierba de las sabanas un 40% a los incendios de los bosques tropicales y un 10% a incendios de los bosques templados y boreales.

antrópicas de carbono están alrededor de las 8 Gt, lo que significa que únicamente el 50 %⁷² del carbono emitido es retenido en la atmósfera. El resto es absorbido por la biomasa oceánica y la biomasa continental, aunque existen muchas incógnitas sobre los detalles de su distribución (Battle, 2000).

Un trabajo basado en imágenes de satélite tomadas durante la primera década del siglo XXI muestra un incremento de la productividad primaria neta en el hemisferio norte y una disminución en el hemisferio sur debida a una serie de sequías importantes (Zhao, 2010). En este sentido, los modelos climáticos calculan un aumento de la producción primaria neta global de más de un 20 % cuando se duplique la concentración de CO₂.

Los principales mecanismos propuestos para explicar este aumento de la biomasa terrestre son:

- a) Fertilización de la atmósfera. El incremento del CO₂ puede influir positivamente en la actividad vegetativa de dos maneras. En primer lugar, el aumento del CO₂ favorece la actividad fotosintética y con ello se potencia el crecimiento de las plantas y la producción neta de biomasa. En segundo lugar, debido al incremento del CO₂ se produce una disminución de la evapotranspiración de las hojas y del consumo de agua por la vegetación, ya que los estomas tienden a cerrarse cuando aumenta la concentración del CO₂ en el aire. Además, las plantas pierden menos agua, incrementándose la eficiencia de la fotosíntesis. Las menores necesidades de agua favorecen un mayor desarrollo vegetativo en regiones áridas.
- b) Fertilización del suelo. Los suelos de algunas regiones pueden incrementar su fertilidad gracias a la nitrificación procedente de la deposición en la superficie terrestre de una serie de compuestos nitrogenados atmosféricos (contaminantes) procedentes de actividades humanas.
- c) Reforestación. En numerosas regiones del mundo, sobre todo en zonas templadas de Eurasia y de América, los planes de reforestación y el

⁷² En la década de los setenta del pasado siglo, el porcentaje de CO₂ de origen antrópico retenido por la atmósfera era el 70 %, como media, del total emitido; sin embargo, a partir de la década de los años noventa del citado siglo ese valor ha sido inferior al 50 %. Un aspecto muy importante para los modelos climáticos es saber cómo evolucionará en el futuro el porcentaje de CO₂ de origen antrópico retenido por la atmósfera. (Schimel *et al.*, 2001).

incremento natural de las superficies forestales, como consecuencia del abandono de actividades agropecuarias, mayor que los procesos de deforestación.

d) prolongación de la etapa de crecimiento vegetativo e incremento térmico Otro motivo del incremento de la biomasa es la prolongación del periodo de crecimiento vegetativo en las latitudes medias del hemisferio norte. En este sentido, existen señales fenológicas de un adelanto medio de la primavera y un retraso medio del otoño en varios días, provocadas por el aumento de las temperaturas (Mitchell & Hulme, 2002). Además, el aumento de las temperaturas nocturnas probablemente haya contribuido al ampliación de los períodos libres de heladas. (Menzel & Fabian, 1999).

4.4.2.- Metano (CH₄)

El metano (CH₄) es un potente gas de efecto invernadero que presenta una capacidad de retención de calor muy superior a la del CO₂⁷³; lo que ocurre es que está en mucha menor cantidad por lo que contribuye de manera menos importante al calentamiento. En efecto, su concentración atmosférica media, en los últimos años, oscila entre 1,7 y 1,8 ppm⁷⁴, muy superior a la existente en tiempos preindustriales, cuando era de sólo 0,7 ppm. Las fuentes de emisión de metano son muy variadas pero la destrucción del gas por los radicales OH del aire es rápida, de tal manera que la vida media del metano atmosférico es de tan sólo unos doce años.

Algunos autores, piensan que el aumento del metano en la atmósfera se remonta al inicio de la agricultura, especialmente con el cultivo del arroz hace 5.000 años⁷⁵; el incremento térmico causado por la agricultura, incrementando en 40 ppm la concentración de CO₂ y en 0,25 ppm la de metano, habría sido anterior al causado por la industria y pudo evitar la vuelta a una nueva glaciación hace unos 3.000 años (Ruddiman, 2003; Kerr, 2004).

⁷³ El metano tiene un potencial de calentamiento global 23 veces superior a la misma masa de CO₂; el forzamiento radiativo es de 0,7 W/m² (el del CO₂ es 1,7 W/m²).

⁷⁴ 220 veces menos que la concentración de CO₂

⁷⁵ Según la correlación entre la evolución de la insolación en los trópicos (que determina la fuerza de los monzones y con ello la abundancia de humedales) y la evolución del metano atmosférico durante los últimos 300.000 años, lo normal hubiera sido que disminuyese progresivamente la concentración de metano desde hace unos 10.000 años hasta hoy en día. Sin embargo, ocurrió lo contrario y el metano comenzó a aumentar hace unos 5.000 años, siendo atribuible a la influencia humana, fundamentalmente por los nuevos cultivos de arroz.

A pesar de que a lo largo del siglo XX, sobre todo en las década de los 80 y comienzos de los 90, el metano atmosférico experimentó un incremento considerable, posteriormente el ritmo disminuyó notablemente, aunque desde 2007 ha vuelto a aumentar (Figura 9). No se conocen bien las razones de esta evolución de la concentración de metano: para algunos estaría relacionada con cambios en la química atmosférica, que acelerarían la destrucción del metano, mientras que otros la vinculan con las emisiones.

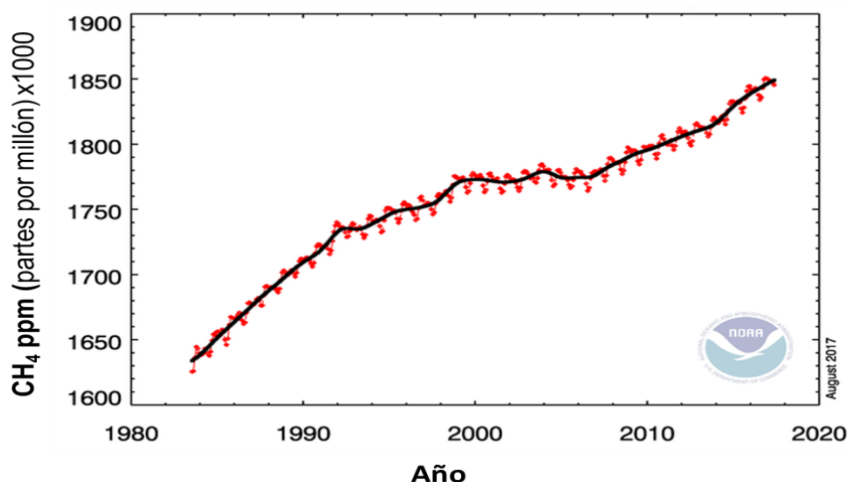


Figura nº XZ2.: Concentración global estacional de metano (enero de 1978 a agosto de 2017) Fuente: NOAA 2017.

Agricultura y ganadería son alguna de las principales actividades humanas productoras de metano. Anualmente, alrededor de 400 millones de toneladas de metano son producidas por microorganismos anaerobios al descomponer la materia orgánica. Los lugares en los que actúan estos microbios son muy variados: el aparato digestivo de algunos animales, especialmente de los rumiantes, el interior de un estercolero, un campo inundado para cultivar arroz o el fondo de una marisma. En el caso de los rumiantes, hay que tener en cuenta que entre el 5 y el 10 % de la masa del alimento de una vaca se transforma en metano. El metano generado por el ganado vacuno y el ganado ovino de Nueva Zelanda supone el 40% del total de emisiones de gases de efecto invernadero, mientras que en Irlanda el metano de procedencia ganadera supone el 15 % de las emisiones totales de GEI (Dennis, 2004).

Otro elemento importante en la emisión de metano es la quema de vegetación, especialmente la de rastrojos y malas hierbas en las sabanas tropicales que se realiza como práctica agrícola para fertilizar el suelo. En estos fuegos de la sabana el 85% del carbono de la biomasa se volatiliza como CO₂ pero entre el 0,1 y el 0,25% lo hace en forma de metano (Delmas, 1991). Además, actualmente sabemos que las hojas de los árboles y de las plantas emiten metano (entre un 10% a un 30% del total de 600 millones de toneladas). Las regiones de bosques tropicales son las que más contribuyen, entre 40 y 160 millones de toneladas (Keppler *et al.*, 2006).

4.4.3.- Óxido nitroso (N₂O)

Otro gas de efecto invernadero es el óxido nitroso (N₂O), producido fundamentalmente por microorganismos del suelo que intervienen en procesos de nitrificación y desnitrificación naturales y agrícolas, pero también, en menor medida, por la quema de combustibles fósiles. Su efecto invernadero es 320 veces mayor que el del CO₂ (Liao *et al.*, 2004). Las emisiones actuales son de unas 7 millones de toneladas anuales. El desarrollo agrario, particularmente el uso del nitrato de amonio es la causa principal de su incremento en el último siglo, de unas 0,2 ppm a algo más de 0,3 ppm. Su incremento desde 1750 al 2004 produce un forzado radiativo aproximado de 0,2 W/m² (IPCC 2007). Su vida media en la atmósfera es de unos 120 años por lo que los cambios experimentados en su concentración atmosférica son lentos.

4.4.4.- Halocarburos (CFC, HFC, PFC y SF₆)

Por otro lado, los halocarburos son también gases de origen antrópico, de los cuales los más conocidos son los clorofluorocarbonos (CFC's), principales responsables de un posible deterioro del ozono estratosférico, también actúan en la troposfera como gases de efecto invernadero. Los CFC han sido empleados ampliamente en los sistemas de refrigeración y como gases para impulsar las sustancias de los aerosoles. Gracias a los protocolos internacionales (Protocolo de Montreal), su producción se ha reducido en gran medida por lo que su concentración, en la troposfera y en la estratosfera, ha disminuido drásticamente. No obstante, ha aumentado la concentración de los gases fluorados que les han reemplazado. Estos gases fluorados comenzaron a usarse a principios de la década de los 90 del pasado siglo para sustituir a las sustancias que acaban con la capa de ozono. Los gases fluorados son empleados, entre otras aplicaciones, como refrigerantes, agentes extintores de incendios, disolventes así como para la fabricación de espumas aislantes e incluyen, entre otros, los siguientes: hidrofluorocarbonos

(HFC's), los más empleados, perfluorocarbonos (PFC's) y el hexafluoruro de azufre (SF₆). Sin embargo estos gases fluorados, al igual que los CFC, tienen un elevado potencial de calentamiento atmosférico y una larga permanencia en la atmósfera, por lo que contribuyen al “efecto invernadero”.

4.4.5.- Ozono (O₃)

El ozono está formado por tres átomos de oxígeno (O₃) y es un importante gas atmosférico que tiene distinto origen: en la estratosfera se forma a partir de la radiación solar, y actúa de forma beneficiosa como filtro atrapando la radiación ultravioleta, que es nociva para la vida⁷⁶; en la troposfera el ozono se produce principalmente por reacciones químicas a partir de otros compuestos emitidos en gran medida como resultado de la acción humana (precursores)⁷⁷, y constituye un contaminante perjudicial para la salud. El ozono troposférico supone solo el 10 % del ozono total (el 90 % restante se encuentra en la estratosfera). Además, el ozono es destruido continuamente de forma natural por la propia insolación así como por reacciones químicas en presencia de diversos compuestos (cloro, bromo, óxido nítrico, monóxido de carbono, radicales hidroxilo, etc.).

A lo largo del último siglo se ha comprobado un notable incremento del ozono en la troposfera, que en el hemisferio norte ha sido de un 35 % (IPCC, 2001) Este incremento ha sido provocado por: 1) el aumento de la quema de la vegetación con fines agrícolas en las sabanas tropicales; 2) la mayor tasa de emisiones de óxidos de nitrógeno y de compuestos volátiles orgánicos, cuya fuente principal son los motores de los automóviles. Además, dicho incremento ha ocasionado en la segunda mitad del siglo XX un efecto invernadero importante⁷⁸, con un

⁷⁶ El ozono presente en la estratosfera es imprescindible para la vida en el planeta; su importancia reside en su propiedad de atenuar fuertemente las componentes de la radiación solar de longitud por debajo de los 295 nm, que son perjudiciales para los seres vivos.

⁷⁷ Estos compuestos precursores son principalmente óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COV). La mayor parte del ozono troposférico de origen antrópico se origina por la oxidación con luz solar de COV en presencia de óxidos de nitrógeno. Dichos compuestos son emitidos por el hombre en los procesos industriales y en la quema de combustibles fósiles (grandes centros de combustión y tráfico principalmente). En la naturaleza, el suelo y las plantas también emiten óxidos de nitrógeno y COV (fuentes biogénicas).

⁷⁸ El ozono es un potente gas de efecto invernadero ya que absorbe la radiación infrarroja de la superficie terrestre. Su forzamiento radiativo es mil veces más potente que el del dióxido de carbono.

forzamiento radiativo global (troposfera) que puede estar comprendido entre los 0,3 W/m² y los 0,4 W/m².

En cualquier caso, hay que tener en cuenta que el 90 % del ozono se encuentra en la estratosfera. Por ello, es posible que en las dos últimas décadas del siglo XX el incremento del ozono troposférico se haya visto compensado en algunas regiones por una disminución del ozono de la baja estratosfera, en donde se encuentra la mayor proporción de su masa. Este declive del ozono estratosférico habría producido un forzamiento radiativo de entre -0,1 y -0,2 W/m² (IPCC 2007). Por tanto, el efecto neto de la disminución del ozono estratosférico es, el de enfriar la superficie de la Tierra.

4.5.-AEROSOLES ANTRÓPICOS

En relación con el papel de nuestra especie en el calentamiento actual del planeta, un aspecto fundamental es el efecto de los aerosoles antrópicos, pequeñas partículas que permanecen suspendidas en el aire y que son consecuencia de la quema de combustibles fósiles, así como de los incendios forestales. No obstante, todavía no comprendemos bien su repercusión en el clima global, ya que existe una superposición de efectos directos e indirectos así como un comportamiento radiativo diferente de los aerosoles en función de su tipo, tamaño y forma (Kaufman & Koren, 2006). En cualquier caso, los aerosoles de origen antropogénico, especialmente los sulfatos⁷⁹ procedentes de los combustibles fósiles, tienen un efecto refrigerante al reflejar la luz solar desde la atmósfera. Los modelos climáticos muestran que en el conjunto del hemisferio norte su forzamiento radiativo es aproximadamente de -1 W/m², mientras que en el hemisferio sur prácticamente es cero (globalmente sería de unos -0,5 W/m²). Un efecto indirecto de enfriamiento de la superficie terrestre, debido a la influencia de los aerosoles sulfatados sobre las características de la nubosidad, puede ser tan importante (unos -0,7 W/m²) como el efecto directo de enfriamiento analizado anteriormente (IPCC, 2007).

El empleo de combustibles fósiles como fuente de energía provoca un aumento del CO₂ (que tiene un efecto de calentamiento) y un incremento de los aerosoles sulfatados (cuyo efecto es de enfriamiento). Se piensa que el periodo comprendido entre 1.940 y 1.970, el desarrollo de la industria pesada y la utilización de combustibles con altos contenidos en azufre, provocó que los aerosoles sulfatados

⁷⁹ Los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) contienen impurezas de azufre que pasan a la atmósfera como óxidos de azufre. No obstante,

tuviesen más influencia en la disminución de la temperatura de la Tierra que los gases de efecto invernadero calentándola. Esto explicaría la disminución global de las temperaturas durante ese período, a pesar del fuerte incremento de las emisiones de CO₂. No obstante, aunque los aerosoles enfrían la superficie, debemos tener en cuenta también su permanencia en la atmósfera es mucho menor que la de los gases de efecto invernadero, por lo que, a largo plazo la función de estos últimos prevalecería. Por ello, si finalizaran rápidamente todos los procesos de combustión, se asistiría a corto plazo a un recrudecimiento del calentamiento del planeta, ya que los aerosoles sulfatados se depositarían en muy poco tiempo en el suelo, quedando la atmósfera limpia y transparente a la radiación solar, mientras que el CO₂ emitido estos últimos años continuaría actuando durante un período mucho más largo.

Existen todavía muchas incertidumbres en el cálculo del forzamiento radiativo provocado por los efectos de los aerosoles sulfatados. Sean cuales sean sus complicados efectos, desde hace unos años, las regiones más desarrolladas de Norteamérica y de Europa han reducido sensiblemente los niveles de emisión de óxidos de azufre, debido a la utilización de combustibles con menos impurezas de azufre. Por el contrario, en los países en vías de desarrollo con un rápido desarrollo industrial y gran consumo de carbón, como China, resulta más difícil reducir las emisiones de óxidos de azufre, de tal forma que actualmente dichas emisiones han llegado a superar a las de Estados Unidos y Europa, si bien posteriormente la tendencia ha sido a la baja⁸⁰

Otro aerosol de origen antrópico es el hollín (carbonilla), cuyo origen son los incendios forestales, así como en la deficiente combustión tanto de combustibles fósiles (carbón y petróleo), como, sobre todo, de biomasa o biocombustibles (madera, carbón vegetal, residuos agrícolas, estiércol). El hollín presente en la atmósfera está compuesto de partículas sólidas de tamaño muy pequeño (de 25 a

⁸⁰ En los últimos diez años, China está liderando a los países en vías de desarrollo en la lucha contra el cambio climático, abandonando la obsesión del crecimiento en China se están diseñando diferentes planes para reducir las centrales térmicas de carbón. En enero de 2017, la Agencia Nacional de Energía China anunció un paquete de medidas para potenciar las energías renovables (eólica, hidráulica paneles solares o centrales nucleares), con una inversión de más de 360.000 millones de dólares, aunque no podrá eliminarse del todo la preeminencia del carbón que existe en este país. En definitiva, el cambio de paradigma energético en China ha experimentado un gran salto ya que en una sola década los papeles de este país se han invertido. Así, de ser un país al que había que presionar para que asumiera su responsabilidad ante el cambio climático a adquirir un firme compromiso en la lucha contra el mismo (Rios, 2017).

700 nanómetros), cuyo componente mayoritario es el carbono elemental en forma de grafito. Dichas partículas flotan en el aire, creando un velo de calima. El hollín es, fundamentalmente, el resultado de una combustión incompleta, por lo que depende no solamente de la cantidad de combustible quemado sino, sobre todo, de la eficacia de la combustión. A lo largo del siglo XX, sobre todo en los países industrializados, ha mejorado notablemente la eficacia en el uso del carbón en las centrales térmicas así como en la combustión los motores diésel, reduciéndose la contaminación atmosférica provocada por el hollín. Además de estas emisiones de la industria y del transporte, no podemos olvidar las elevadas emisiones procedentes de la quema de madera, carbón vegetal, residuos agrícolas y estiércol en los hogares tradicionales, fundamentalmente de países en desarrollo (Venkataram, 2005).

Al contrario de lo que sucede con los aerosoles sulfatados, el color oscuro del hollín hace que refleje mal la energía del sol, absorbiendo tanto la luz que llega directamente de arriba como la que se refleja en el suelo. Por ello, el hollín produce troposfera un efecto global de calentamiento. De acuerdo con algunos modelos climáticos, el forzamiento radiativo neto del hollín sobre la superficie terrestre, a escala global, es de $0,55 \text{ W/m}^2$, valor semejante al causado por el aumento del metano (Jacobson, 2001). Por otro lado, el hollín puede oscurecer las superficies cubiertas por hielo y nieve reduciendo el albedo de estas. Probablemente, en zonas blancas y sensibles, como los hielos del Ártico, influya en su calentamiento superficial. El informe del IPCC (2007) atribuye a la nieve sucia un forzamiento de 1 W/m^2 .

5.-PRONÓSTICOS Y ESTRATEGIAS PARA EL CLIMA FUTURO

Las predicciones (trayectorias) del clima del futuro se realizan empleando modelos climáticos. Los más exactos y complejos son los denominados modelos de circulación general que son representaciones matemáticas del sistema climático que simulan numerosos aspectos como: temperatura (atmosférica y oceánica), precipitaciones vientos, nubes, corrientes oceánicas y extensión del hielo marino. Los modelos climáticos describen, con una serie de algoritmos, los diferentes procesos y fenómenos implicados en el cambio climático. Se trata de complicados programas que, aunque no están exentos de incertidumbres e imprecisiones, constituyen una herramienta fundamental para que los científicos puedan hacer proyecciones sobre el clima futuro (Rivera, 2017). Estos modelos, además de necesitar una elevada potencia de cálculo, precisan una serie de datos concretos de las condiciones iniciales a partir de las cuales se hacen las distintas proyecciones del clima de futuro. Evidentemente, las predicciones a más largo plazo tienen una mayor complejidad ya que se multiplican las posibles opciones. (Uriarte, 2010). En cualquier caso, un sistema tan complejo como el climático, con múltiples efectos, mecanismos de retroalimentación, dinámica atmosférica, corrientes marinas, además de toda la biosfera, reparte de forma desigual los efectos del calentamiento global y complica las proyecciones sobre cómo evolucionará en el futuro (Rivera, 2017).

Para poder trabajar con situaciones similares y hacer comparaciones equiparables el IPCC emplea las denominadas trayectorias de concentración representativas (RCP)⁸¹ que sustituyen a los denominados anteriormente escenarios de emisiones y

⁸¹ Se emplea la abreviatura en inglés (Representative Concentration Pathways); los RCP están basados en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química atmosférica y modelos del ciclo del carbono.

que son, en definitiva, los pronósticos que hace este organismo del clima futuro⁸². Estas trayectorias o escenarios se centran en las emisiones antropogénicas y no incluyen cambios en fenómenos naturales como el forzamiento solar o las emisiones naturales de CH₄ o N₂O.

El IPCC contempla cuatro RCP⁸³ (ver figura 10), cada una de las cuales lleva asociado un número que hace referencia al forzamiento radiativo de origen antropogénico que se produciría en el siglo XXI respecto al valor preindustrial (año 1750). Por tanto, dicha cifra no hace referencia al incremento de temperatura aunque ya sabemos que existe una elevada correlación entre el forzamiento radiativo y la temperatura. Las RCP incluyen un primer escenario con una fuerte reducción de las emisiones o de mitigación (RCP2.6), dos escenarios intermedios o de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y, por último, un escenario de elevadas emisiones gases de efecto invernadero (RCP8.5). Los escenarios de referencia, en los que no existe un control de las emisiones de origen antropogénico, se sitúan entre la RCP6.0 y la RCP8.5.

Podríamos resumir las trayectorias diciendo que las dos intermedias (RCP4,5 y RCP6,0) darían un incremento de temperatura en torno a los 2°C a finales del siglo XXI en comparación con la temperatura de la Tierra en el período 1986 a 2005

⁸² Debemos tener en cuenta que los RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas, es decir cada RCP puede ser resultado de distintas combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales. Esto difiere de los escenarios de emisiones empleados en los informes anteriores: escenarios A1, A2, B1 o B2, utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación (IPCC,2001; IPCC,2007).

⁸³ la primera de las trayectorias, la más optimista en la previsión de emisiones, la RCP2,6 hace referencia a qué se produce un forzamiento antropogénico de 2,6 W/m²; si el clima sigue esta trayectoria la temperatura a finales del siglo XXI estaría en torno a 1° C por encima de la temperatura media del periodo 1986 a 2005. En el caso de las otras RCP sucede lo mismo: la RCP4,5 supondría un incremento de la temperatura media de 1,8° C , la RCP6.0 de 2,2° C grados centígrados y, finalmente, la más pesimista de todas las trayectorias, la RCP8,5 supondría un incremento medio de 3,7° C. En todos los casos el dato de temperatura que hemos proporcionado es un valor medio; así, por ejemplo, en la RCP8,5 el rango de temperaturas podría oscilar entre 2,6° C y 4,8° C. Además, la distribución geográfica de las temperaturas no es uniforme en todo el planeta (en el Círculo Ártico la RCP8,5 podría provocar aumentos de temperatura que superasen los 10°C). Según una serie de simulaciones recientes las concentraciones de CO₂ en el año 2100 alcanzarán: 421ppm (RCP2,6), 538ppm (RCP4,5), 670ppm (RCP6,0) y 936ppm (RCP8,5). Si a esto se le agregan las concentraciones de CH₄ y N₂O, las concentraciones de CO₂ equivalente combinadas alcanzarían 475ppm, 630ppm, 800ppm y 1313ppm respectivamente (IPCC, 2013).

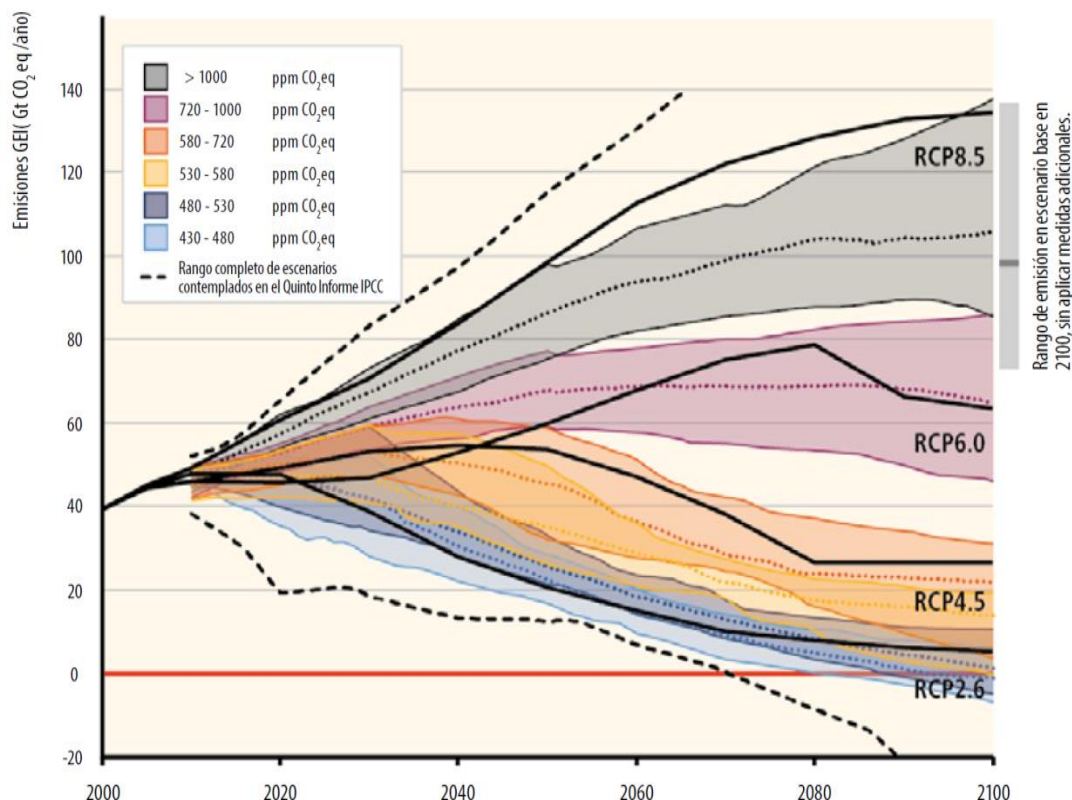


Figura 10.: Trayectorias de concentración representativas (RCP) para el siglo XXI
Fuente: IPCC, 2014.

No obstante, las proyecciones climáticas muestran un aumento de las temperaturas a lo largo del siglo XXI en todos los escenarios de emisiones evaluados. Habrá un cambio en los patrones estacionales de lluvias, variará el ciclo del agua y se intensificarán los episodios de precipitaciones extremas, especialmente en latitudes medias y regiones tropicales húmedas. Cada vez serán más frecuentes los días extremadamente cálidos y las olas de calor serán más largas y duraderas. Se producirán también algunas olas de frío extremo de manera ocasional. El océano continuará calentándose y acidificándose y el nivel medio global del mar continuará aumentando, Aunque lo más importante es que el manto de nieve en el Ártico, de finales del invierno, ya no ocupará tanta extensión como hasta ahora (IPCC, 2014).

Para Zhu *et al.*, 2016, si duplicamos la concentración de CO₂ preindustrial (280 ppm) podemos esperar un incremento medio de temperatura de 3°C. Este resultado se obtiene de los registros experimentales de los últimos ciento cincuenta años, pero cualquier sensibilidad que esté en el intervalo comprendido entre los 1,5° C y los 9° C sería coherente con los datos recogidos las últimas décadas. 3 ° C no es un dato inmutable, pero sí una orientación fiable.

La emisión persistente de gases de efecto invernadero dará lugar a un mayor calentamiento, así como a una serie de cambios a largo plazo en los diferentes elementos del sistema climático, incrementando la probabilidad de que ocurran graves impactos, generalizados e irreversibles para personas y ecosistemas. El control del calentamiento va a precisar de una disminución importante y continua en las emisiones de gases de efecto invernadero (mitigación) que, junto con la adaptación, podrían reducir los riesgos del cambio climático (IPCC, 2014).

Con un incremento de las temperaturas igual o superior a 2°C en relación a los valores de finales del pasado siglo, están previstos diversos impactos negativos en zonas tropicales y templadas sobre las cosechas (especialmente de trigo, arroz y maíz), aunque, es posible que en alguna zona concreta la producción pueda aumentar. Por ello, el cambio climático podría comprometer la seguridad alimentaria⁸⁴. Las proyecciones señalan que el cambio climático provocara la reducción de los recursos de aguas superficiales y subterráneas en la mayoría de regiones subtropicales secas, aumentando la competencia entre sectores por el agua. Numerosos aspectos del cambio climático y de diferentes impactos relacionados con él seguirán manifestándose durante siglos, aunque se detengan las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. Por otra parte, los riesgos de cambios abruptos o irreversibles aumentan a medida que lo hace la dimensión del calentamiento (IPCC, 2014).

Aunque un aumento moderado del CO₂ y de las temperaturas podría tener para nuestra especie algunos ventajas a corto plazo (inviernos más cálidos, aumento del periodo de crecimiento vegetativo, incremento global de la biomasa, etc.), la mayor parte de las organizaciones científicas, políticas y sociales piensan que serán

⁸⁴ Nos referimos a la seguridad en el suministro de alimentos a las poblaciones humanas, aspecto que trataremos en profundidad en el apartado noveno.

mayores los inconvenientes, por lo que defienden la instauración de medidas para la reducción de emisiones de origen antropogénico (Uriarte, 2010).

Es difícil que, a nivel global, disminuya el consumo energético y las emisiones de CO₂ durante los próximos años. En este sentido, en muchos países el consumo energético del sector de los transportes sigue aumentando⁸⁵, aunque existe una clara tendencia a la disminución de emisiones industriales, gracias a que los avances tecnológicos permiten que cada vez se utilice menos energía por unidad de valor producido, especialmente en los países desarrollados.

Algunas de las estrategias globales para que la concentración de CO₂ en la atmósfera no siga aumentando serían:

- a) empleo de energías alternativas y medidas fiscales para desincentivar el consumo de energías fósiles;
- b) mejora de la eficiencia energética;
- c) captura y almacenamiento del CO₂;
- d) absorción biológica del CO₂.

Una posible solución sería la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes alternativas de energía, que son particularmente importantes en la generación de energía eléctrica⁸⁶. El problema es que, en la actualidad, las únicas energías verdaderamente alternativas son la nuclear y la hidroeléctrica. Los problemas de la energía nuclear son: su elevado riesgo de accidentes, la gestión de los residuos y la

⁸⁵ No obstante, la relación entre transporte y medio ambiente desde la perspectiva de la eficiencia se ha convertido en uno de los centros neurálgicos de la sostenibilidad. Se trata de producir, consumir y mover personas y mercancías mejor, con menos recursos y menor impacto ambiental. Se buscan nuevos combustibles más eficientes, pero sobre todo alternativas como: vehículos híbridos, eléctricos con la electricidad como única fuerza motriz, automóviles que se mueven por la fuerza del Sol o trenes movidos por aire comprimido.

⁸⁶ La electricidad se genera transformando alguna clase de energía (química, cinética, térmica, lumínica, nuclear, solar, etc.), en energía eléctrica. Para la generación industrial se emplean instalaciones denominadas centrales eléctricas, que ejecutan alguna de las transformaciones citadas. Estas constituyen el primer escalón del sistema de suministro eléctrico. Dependiendo de la fuente primaria de energía utilizada, las centrales generadoras se clasifican en: **químicas** (utilizan plantas de radioactividad, que generan energía eléctrica con el contacto de esta), **termoeléctricas** (de carbón, petróleo, gas, nucleares y solares termoeléctricas), **hidroeléctricas** (aprovechando las corrientes de los ríos o del mar: mareomotrices), **eólicas** y **solares fotovoltaicas**.

relación entre el enriquecimiento del uranio y el desarrollo de armas nucleares, lo que provoca numerosos inconvenientes ecológicos y políticos, así como un fuerte rechazo social. En cuanto a la energía hidroeléctrica, requiere la alteración de las cuencas fluviales para construir las presas. Por otro lado, nos encontramos con las energías eólica y solar, fuentes alternativas generalmente bien aceptadas por la opinión pública, sólo pueden aspirar, a escala global y a largo plazo, a sustituir los combustibles fósiles en la generación de electricidad en un pequeño porcentaje.

Otra alternativa sería el empleo de políticas fiscales para intentar disminuir el consumo de combustibles fósiles, incrementando las tasas por la utilización de esas energías. Estas medidas implican un incremento en los precios de la gasolina, electricidad, el gas o el carbón. En este sentido, los impuestos al carbón podrían frenar el crecimiento económico de los grandes países emergentes, como China e India (Uriarte, 2010).

Con anterioridad a la crisis del petróleo de 1973 la optimización en el empleo de la energía era un tema secundario, pero desde que los precios se dispararon, la investigación en los principales sectores afectados (industria, transporte y edificios) originó que la eficiencia energética mejorara espectacularmente (en poco más de dos décadas el consumo de un automóvil se redujo a menos de la mitad). La mejora de la eficiencia en cualquiera de los sectores productivos, incluido el agropecuario, será fundamental para mitigar las emisiones de CO₂ y otros GEI como consecuencia del crecimiento económico que se producirá durante el siglo XXI en naciones como la India o China.

Una de las principales medidas que se han tomado es priorizar el empleo del gas natural (cuya composición mayoritaria es metano) sobre el petróleo y el carbón. El empleo de gas natural para obtener energía eléctrica da lugar a una emisión, aproximada, de 500 g de CO₂/ kWh producido, mientras que para el petróleo es de 700 g/ kWh (un 40% más que el gas) y para el carbón de 900 g/ kWh (un 80% más que el gas).

En cualquier caso, el carbón continúa predominando en la producción mundial de electricidad, gracias a su menor precio relativo así como al hecho de ser un recurso disponible en muchos países, al estar presente en la mayor parte de nuestro planeta. Además, existen importantes reservas, suficientes para abastecernos durante siglos. Por otra parte, no es previsible que su utilización disminuya rápidamente en países tan poblados como India o China.

Aunque hasta hace relativamente poco tiempo se pensaba que los recursos de gas natural eran escasos, en los últimos años se han descubierto grandes depósitos de metano en el subsuelo de amplias regiones continentales y costeras. Por otro lado, se ha producido un incremento notable de las reservas gracias a las mejoras en la extracción de gas de lutita (también conocido como gas de esquisto o gas pizarra), gracias al empleo de la fracturación hidráulica (más conocida como “fracking”). No obstante, en el balance final de la eficiencia del gas natural debemos tener en consideración los escapes que se pueden producir en las explotaciones o durante el transporte. Debido a que el metano tiene un potencial de calentamiento muy superior al CO₂, estos escapes pueden provocar que se pierdan las ventajas en la utilización del gas en lugar del carbón (Uriarte, 2010).

En lo referente al petróleo, las mejoras en las técnicas de prospección han permitido el descubrimiento de nuevas reservas. Además la posibilidad de explotación de crudos pesados, como los de Venezuela, disminuye la preocupación que existía hace unos años sobre su escasez a corto plazo.

La **Captura y Almacenamiento de Carbono** (CAC)⁸⁷ transporte almacenamiento usos y transformación del CO₂ en inglés es una tecnología aprobada en Estados Unidos desde la década de los 60 del pasado siglo que se contempla como una de las medidas para la mitigación del cambio climático (Schiermeier, 2006). Estudios recientes, estiman que su contribución global a la reducción de emisiones de CO₂ puede ser de entre el 15 y el 20% del total (Diaz, 2017). No obstante, se trata de un proceso complicado ya que las cantidades producidas son inmensas. Así, una central térmica de carbón con una potencia de 1.000 MW genera unos dos millones y medio de toneladas anuales de CO₂ (Uriarte, 2010).

Capturar el CO₂ antes de que llegue a la atmósfera es el primer paso y la fase fundamental de las tecnologías CAC. Para que esta tecnología sea efectiva en términos ambientales y económicos debería realizarse cerca de los grandes focos de emisión de CO₂⁸⁸ y en emplazamientos que permitan el almacenamiento de millones de toneladas.

⁸⁷ En inglés: Carbon Capture and Storage (CCS)

⁸⁸ La tecnología se aplica principalmente en centrales eléctricas de carbón, lignito y gas natural, además, su continuo desarrollo puede ampliar el uso de estas tecnologías a refinerías, plantas de cemento y químicas o también en procesos de biomasa.

Las principales tecnologías de captura de CO₂ (precombustion post-combustion y oxcombustion) permiten obtener gases de combustión con una concentración de CO₂ relativamente elevada lo que facilita su transporte y posterior almacenamiento geológico. Antes de ser transportado el CO₂ tiene que pasar por una etapa de purificación y otra de compresión. El transporte se realiza por conducto (Ceoducto) hasta el lugar donde se va a almacenar el CO₂. El almacenamiento geológico de CO₂ es la etapa final de las tecnologías CAC y consiste en la inyección de dióxido de carbono en una formación geológica profunda que debe de estar situada al menos a 800 metros de la superficie. Los emplazamientos geológicos más importantes por abundancia y capacidad de almacenamiento son acuíferos salinos profundos yacimientos de petróleo y gas así como capas de carbón profundas (Díaz, 2017).

Otro lugar en el que se podría almacenar el CO₂ secuestrado sería el océano, después de licuarlo por compresión, inyectándolo en las profundidades marinas. Sin embargo, existe todavía una gran incertidumbre en relación con los efectos biológicos y desequilibrios ambientales que se podrían originar con estas técnicas de secuestro masivo de CO₂ en el mar (Chisholm *et al.*, 2001).

Una vez almacenado, el CO₂ puede permanecer atrapado indefinidamente o ser utilizado como recurso. En este sentido, el CO₂ es un producto que se ha utilizado desde hace siglos para diversas aplicaciones, como: tratamiento de aguas, extinción de incendios, extracción de compuestos como la cafeína, etc. Sin embargo, dichos usos son insuficientes para las enormes cantidades de CO₂ que se generan en la actualidad, aunque la investigación de nuevos usos del CO₂ tiene unas perspectivas muy favorables. Las últimas predicciones estiman que la tecnología CAC será una realidad en el mundo antes del 2050⁸⁹. Para ello se han impulsado iniciativas como la plataforma tecnológica española del CO₂ PTECO₂ (Díaz, 2017).

También se pueden utilizar diversas Estrategias que compensen el calentamiento que estamos provocando los seres humanos mediante técnicas de **Geoingeniería** que tiendan a la refrigeración del planeta. La primera de ellas tiene relación con el

⁸⁹ La situación de nuestro país respecto a esta tecnología es muy favorable ya que en la actualidad se disponen de plantas pilotos en Cubillos de Sil y La Robla en la provincia de León y en Mieres (Asturias) plantas que han proporcionado el conocimiento y la experiencia para que estas tecnologías puedan dar el salto al mercado.

albedo terrestre ya que si la cantidad de radiación solar que absorbe la tierra es determinante en su temperatura, si incrementamos la capacidad de reflejar dicha radiación disminuiríamos la misma. Se han barajado distintas ideas: despliegue de espejos en el espacio, inyección de aerosoles en la atmósfera, cultivo de plantas de alto brillo o modificación en la reflectividad de grandes extensiones oceánicas con microburbujas especiales, etc.

Otras técnicas quedan englobadas en los llamados métodos de extracción de CO₂ siempre a escala global (no se incluyen las tecnologías que algunas industriales ya emplean para capturar in situ el CO₂). Estas técnicas están basadas en procesos biológicos o químicos que capturan el carbono y lo almacenan en la tierra o en el océano. En este sentido, se han estudiado operaciones de reforestación a gran escala para explotar la captura de CO₂ por las plantas o de fertilización del océano para incentivar su absorción por organismos marinos se ha contemplado incluso la captura directa del CO₂ de la atmósfera (Rivera, 2017).

En cualquier caso, la manera más natural de reducir las emisiones a la atmósfera del CO₂ son los cambios en el uso del suelo que favorezcan el efecto sumidero tanto del propio suelo como de la vegetación. Un bosque joven puede llegar a capturar 10 kg de carbono por metro cuadrado de superficie arbolada. En este sentido, la biomasa terrestre está aumentando de manera natural, absorbiendo una gran parte del CO₂ de origen antrópico. No obstante, se podría incrementar este efecto sumidero con una serie de medidas, como: fomento de las políticas de reforestación, abonado artificial de bosques y pastos, reducción de la erosión en cultivos o la mejora genética y explotación de especies más productivas (Uriarte, 2010).

En cualquier caso hay que ser prudente con algunas medidas ya que no se conocen bien los efectos térmicos y pluviométricos que puedan presentar las nuevas áreas forestales. Así, en latitudes altas, la reducción del albedo de las superficies nevadas, puede provocar un incremento del calentamiento, especialmente en primavera. En el periodo durante el cual la superficie permanece cubierta de nieve, la franja de los bosques boreales (50°N -60°N) tiene un albedo mucho menor que el de las tierras sin arbolado, mientras que en latitudes templadas el efecto es mucho más complejo. Por su parte, cuando se cubren de nieve las tierras cultivadas y los pastos de la franja templada (42°N-45°N), su albedo aumenta considerablemente (Barlage *et al.*, 2005); aunque durante el periodo estival las zonas forestales parece que provocan una notable disminución de las temperaturas (Uriarte, 2010).

Por lo que se refiere a las precipitaciones, en las regiones tropicales el incremento de la evapotranspiración puede ocasionar más lluvia. Sin embargo, en latitudes templadas los bosques restan fuerza a los movimientos convectivos y de ascensión del aire, contrarrestando el posible aumento de humedad que favorecería las precipitaciones (Jackson *et al.*, 2005).

6.- ASPECTOS SOCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

A medida que la sociedad se ha enfrentado progresivamente a las realidades observables del cambio climático y ha conocido los problemas que se anuncian para el futuro, el cambio climático ha pasado de ser un fenómeno predominantemente físico a ser también un fenómeno social (Hulme, 2009).

En nuestro planeta, salvo que ocurra una inesperada catástrofe, el presente siglo XXI será sin duda el del cambio climático. No habrá proceso otro que este más presente y que incida más en nuestra vida diaria. Como señala Romm (2016), “el cambio climático tendrá un mayor impacto en tu familia, amigos y en toda la humanidad de lo que ha tenido Internet.

Imagina que supieras, hace un cuarto de siglo, como revolucionarían las tecnologías de la información e Internet tantos aspectos de la vida. Imagina como de valioso habría sido este conocimiento para ti y tu familia. Resulta que tenemos este conocimiento adelantado sobre cómo se desarrollara el cambio climático el próximo cuarto de siglo y más allá”. Nuestro mundo es muy diferente al de 1980 gracias, fundamentalmente, a Internet. El mundo de 2050 será muy distinto, también en una dimensión física, si nuestra sociedad no hace nada para evitarlo.

6.1.- PERCEPCIÓN SOCIAL DEL CAMBIO CLIMATICO

Conviene recordar que el cambio climático es un hecho social ya que esta provocado en gran parte por actividades humanas y porque, además, es la sociedad en su conjunto, así como las personas que la forman quienes finalmente van a sufrir, directamente o indirectamente, sus consecuencias (Duarte, 2006).

Para establecer unos objetivos y protocolos sobre el cambio climático en el siglo XXI es imprescindible ser realista. En este sentido, Geden⁹⁰ (2015), en una controvertida publicación solicitaba que los asesores del clima mantuvieran la integridad y no trataran de encajar sus predicciones con las demandas de los políticos, que siempre desean traer buenas noticias y rechazan sistemáticamente las más alarmistas. Resulta tentador rebajar el tono negativo de los informes si de esta manera el responsable de tomar las decisiones te hace caso. Es lo que ha pasado más de una vez cuando los científicos han tenido que transmitir la realidad climática: la presión para suavizar el discurso es notable. El mensaje es siempre el mismo: “nos estamos quedando sin tiempo, sólo tenemos cinco o 10 años para cambiar las cosas, pero podemos hacerlo si enfocamos nuestros esfuerzos en eso”. Pero ese fue el mensaje en 1990, en 2000 y en 2010. El resultado es que siempre da la impresión de que estamos a tiempo de hacer algo.

El fracaso continuado constituye un aprendizaje acelerado de lo que funciona y lo que no, y nos abre las puertas a mejorar la forma en que explicamos y comunicamos el cambio climático. Cuando hablamos de las acciones del hombre frente al cambio climático hay una paradoja que nos hace dudar: cómo es posible que seamos los responsables del deterioro ambiental y que, sin embargo, nuestra aportación como individuos frente a dicho deterioro sea insignificante.

Una de las claves para entender la citada paradoja se encuentra en el marco de actuación: mientras que la culpabilidad es individual, las acciones son globales (Escrivá, 2017). Lo que debemos hacer es invocar al cambio colectivo como resultado de la suma de los cambios individuales. En nuestra especie, la identidad social es una herramienta poderosa que influye notablemente en nuestro comportamiento, ya que somos seres eminentemente sociales. Por ello, si nos vemos a nosotros mismos dentro de una identidad social determinada, somos más proclives a tomar medidas beneficiosas para el ambiente cuando el grupo presenta también características favorables al mismo. En este sentido, Stoknes (2015), en

⁹⁰ Analista en el Instituto Alemán de Asuntos Internacionales y de Seguridad; nota publicada en la revista Nature.

una publicación sobre psicología del cambio climático destaca la importancia del tejido social y de dos características muy humanas: la competitividad y el «qué dirán», que si son utilizadas adecuadamente pueden producir una retroalimentación positiva que incentivará la toma de decisiones ambientalmente responsables.

El uso de gran cantidad de cifras, gráficos o mapas, no siempre consigue una mayor concienciación sobre el cambio climático. No obstante, aprovechando nuestra condición de seres sociales, sería conveniente utilizar a una serie de líderes que contribuyan a romper la inercia y la apatía social. Además, los humanos priorizamos la experiencia por encima del análisis. Por ello, uno de los marcos que se considera que podrían involucrar más a la ciudadanía es el de cambio climático como problema de salud.

El 9 de mayo de 2016 se publicó en Twitter un gráfico (figura 11) que mostraba la evolución de las temperaturas mensuales de nuestro planeta entre 1850 y marzo de 2016 que rápidamente se hizo viral. La explicación de su meteórica difusión fue que los datos se presentaban en forma de una espiral en movimiento cuyo color cambiaba a medida que se acercaba a los niveles de 1,5 °C y 2 °C. El éxito se encontraba en la manera de representar los datos: un GIF (Graphics Interchange Format) que te hipnotiza, muy diferente a las representaciones de líneas o barras.

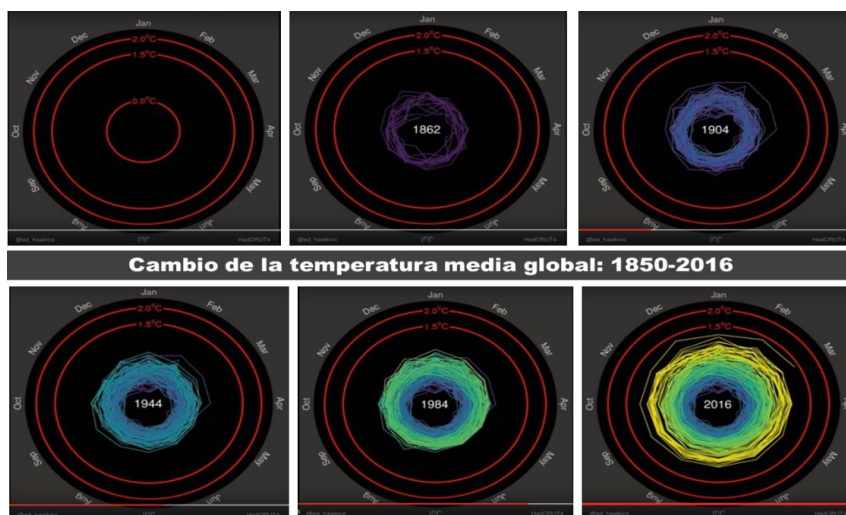


Figura 11. Representación de la temperatura media global de la Tierra (1850-2016) en forma de espiral. Capturas de pantalla del GIF de Ed Hawkins (2016); publicado en Twitter (@ ed_hawkins) y en <https://www.youtube.com/watch?v=JSaLDI4bE7M#t=4.021146>

El primer paso para hacer posible el escenario diseñado en la cumbre de París es resituar el cambio climático en todos los niveles. Hay que encararlo como un reto colectivo, más que como un reto personal, enmarcarlo en la vida diaria y ligarlo a lo que nos importa. La clave está en la movilización social, no en la lucha de cada uno, aunque el papel de las acciones individuales continúa siendo esencial, ya que cuando un grupo numeroso de personas modifica sus hábitos, se termina convirtiendo en una nueva norma social, que estimula a que se adhiera más gente a la causa. La mayor parte de las peticiones que recibe un individuo para actuar contra el cambio climático estarán seguramente relacionadas con su condición de consumidor (Escrivá, 2017). El cambio climático es un reto formidable ya que tenemos que luchar, no sólo contra las compañías petroleras y de aviación o con los gobiernos de la mayoría de los países ricos, sino, fundamentalmente, contra nuestros hábitos y nuestra forma de vivir, en definitiva, es una lucha contra nosotros mismos.

6.2.- ENSEÑANZA Y DIVULGACIÓN DEL CAMBIO CLIMATICO

Para frenar el cambio climático, es necesario un cambio de cultura energética que afecte tanto a la producción de energía como a su consumo. Es necesaria una transición hacia un mundo bajo en carbono, en el que las actividades humanas (transporte, industria o alimentación) no conlleven inevitablemente emisiones masivas de CO₂. Por ello, la responsabilidad de poner en pie las respuestas necesarias para evitar un cambio climático peligroso no puede depositarse únicamente en el sistema educativo; un cambio de orientación de la magnitud requerida exigirá que la sociedad cambie sus prioridades aceptando el reto de transitar hacia una cultura de cuidado del clima.

Nuestra especie no está diseñada, ni preparada mentalmente, para valorar y entender adecuadamente los riesgos a largo plazo. Entre un beneficio en el presente y unas posibles consecuencias negativas dentro de unos años, opta por lo primero. Por ello, el cambio climático presenta una disyuntiva que nuestra mente no es capaz de solucionar correctamente: asumir pérdidas personales a corto plazo para conseguir ganancias colectivas dudosas en un futuro lejano.

Prácticamente ninguna persona con capacidad de tomar decisiones en el mundo empresarial o político ha recibido explicaciones sobre el cambio climático en la escuela o el instituto. Todo lo que saben sobre el tema lo han aprendido de los medios de comunicación, en campañas de organizaciones ecologistas o por un

interés puramente personal. En España sólo los menores de 35 años (y no todos) han recibido alguna lección sobre el calentamiento global. Pero ni siquiera esto implica que tengan unos conocimientos sólidos sobre la materia (Escrivá, 2017).

Todos necesitamos educación frente al cambio climático, aunque con el tiempo corriendo en contra, es evidente que aquellos que tienen mayor capacidad para conformar nuestro futuro energético necesitan aprender con rapidez. Desde una perspectiva educativa, se requieren cambios urgentes en la formación superior y profesional, especialmente, en el ámbito de la gestión pública y empresarial. En este sentido, no sólo es necesario renovar el sistema de educación formal sino que es imprescindible mejorar los sistemas a través los cuales se comparte el nuevo conocimiento en materia de mitigación y adaptación al cambio climático. Para ello, hay que impulsar los sistemas de aprendizaje social. Las redes técnicas y profesionales deben reforzar su orientación formativa y educadora, mejorando los sistemas que integran aprendizaje y acción para el cuidado del clima (HERAS, 2015). Investigaciones realizadas en otros países sugieren una relación compleja entre el nivel educativo y las creencias en materia de cambio climático (Hamilton, 2010). Sin embargo, en nuestro país, Meira et al., (2013), en una serie de estudios demoscópicos sobre aspectos sociales del cambio climático no detectaron diferencias significativas entre las valoraciones de las personas encuestadas y su nivel de estudios. En cualquier caso, todo parece indicar que el sistema educativo aún no ha logrado trasladar adecuadamente a la sociedad los rasgos singulares que configuran la cuestión climática. Además, el cambio climático no debería concebirse como un mero conjunto de contenidos que debe ser incorporado a la enseñanza de las ciencias. La educación debe incorporar las aportaciones hechas desde la psicología, la sociología, el derecho, la economía, la política o la ética, que nos acercan a ese «fenómeno social» (Heras, 2015).

Explicar el cambio climático es complejo, con independencia de la edad del alumnado. Cada vez se conoce mejor la manera de comunicar el cambio climático, pero todavía nos queda mucho camino para saber cómo se enseña. La inversión en programas educativos pioneros y el desarrollo de nuevas herramientas didácticas sobre el calentamiento global y el cambio climático debería ser una prioridad. En este sentido, los juegos educativos o los materiales interactivos pueden ayudar, pero quizá la mejor alternativa sería introducirlo en aquellas herramientas y aplicaciones que emplean habitualmente nuestros jóvenes.

Existe una conciencia creciente sobre lo que significa la alfabetización climática, es decir: el conjunto de conocimientos básicos para individuos y comunidades que

son imprescindibles para entender que es el cambio climático y qué amenazas representa para nosotros, así como las aproximaciones actuales de adaptación y mitigación (Escrivá, 2017). Las claves para convencer a la gente sobre la realidad del calentamiento global son:

- a. explicar que somos los humanos quienes causamos el calentamiento y que el mecanismo responsable es la emisión masiva de gases de efecto invernadero (si no sabemos esto, nos preocupamos menos);
- b. cuando la gente es consciente del grado de consenso entre los científicos expertos en el clima sobre la realidad y el origen del calentamiento global, superior al 97%, es más propensa a aceptar la realidad y apoyar políticas de mitigación y adaptación (Lewandowsky, 2013); el porcentaje de personas que conoce este consenso es mínimo.

Más allá de la cantidad de artículos, e incluso de su adscripción a periódicos de distintas tendencias, sobrevuela también la pregunta de si, en general el periodismo está acertando en la comunicación del cambio climático a la sociedad. El pensamiento mágico se define como aquella forma de pensamiento que, basada en supuestos erróneos o no justificados, genera opiniones y creencias sin ningún tipo de fundamento empírico. Los humanos tenemos tendencia a pensar de esta manera, especialmente cuando interviene la tecnología. Después de milenios, pero sobre todo durante las últimas décadas, en las que la tecnología ha progresado de una forma espectacular, es normal que tengamos fe. Así, hemos conseguido coches cada vez más eficientes y menos contaminantes, así como paneles solares más baratos. Además, hemos solucionado el agujero de la capa de ozono o el problema de la lluvia ácida y logrado la conservación de centenares de especies, creando reservas para garantizar su futuro.

El supuesto erróneo es que, como hemos podido enfrentarse a todo esto, también podremos superar el cambio climático, en un ejemplo paradigmático del sesgo de optimismo. “Ya inventarán algo” es una frase que podría estar extraída de cualquier conversación informal sobre el cambio climático y que se escucha también en ambientes universitarios. Es cierto que hemos sido tan extraordinariamente buenos haciendo algunas cosas que cuesta mucho convencer que, efectivamente, esta vez sí que viene el lobo.

6.3.- NEGACIONISMO Y CAMBIO CLIMATICO

En la actualidad el número de los denominados negacionistas o escépticos del cambio climático no es muy elevado, aunque paradójicamente, a medida que la ciencia climática ha incrementado su grado de certeza, el negacionismo sobre el tema ha aumentado. La paradoja radica en la negación. Hay una industria del negacionismo del cambio climático que está financiada por compañías de combustibles fósiles que literalmente niega la ciencia y busca confundir al público (Washington & Cook, 2011).

Aunque algunos son propensos a la caricatura, el escepticismo científico es siempre una herramienta útil y necesaria. Tampoco todos los que no creen en el calentamiento global son como el presidente Trump, quien se ha pasado años diciendo que todo lo del cambio climático es un complot del gobierno chino y científicos poco patrióticos.

El movimiento negacionista del cambio climático es heterogéneo y, lo que es aún más importante, podemos aprender mucho del mismo. Sin embargo, deberíamos ser capaces de diferenciar entre quienes lo han hecho por convicción personal (falta de pruebas, porque no lo entendían o porque era difícil aceptar que estábamos cambiando algo tan ingente como el clima de un planeta entero, etc.) y los que querían aprovecharse (políticamente, académicamente o económicamente) del negacionismo (Escrivá, 2017).

Alonso (2011), analizando únicamente a los negacionistas pertenecientes al colectivo de los científicos, con independencia de que estén relacionados o especializados en el clima o no, distingue tres clases.

- a) En primer lugar, algunos científicos especializados en clima basan su negacionismo en una serie de aspectos que no están bien conocidos y generan dudas. Así, algunos científicos aunque están de acuerdo con la existencia de un cambio de clima inducido por los seres humano desconfían del empleo de modelos climáticos. Consideran que estos modelos no son capaces de resolver o solucionar los problemas más importantes relacionados con el sistema climático por lo que no aceptan las proyecciones de futuro que puedan realizar. Pero ante todo tienen una gran

desconfianza en el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático⁹¹).

- b) Un segundo grupo de científicos negacionistas estaría incluido en otros ámbitos de las ciencias de la Tierra. Tienen en común su defensa de que el cambio de clima actual obedece a causas naturales, señalando en muchas ocasiones que el incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera puede ser positivo. El problema del cambio climático actual, comparado con los que han ocurrido en el pasado, es su escala temporal, ya que puede ser percibido por una persona a lo largo de su vida. Si no hubiera sido por esto no habría tenido tanta repercusión desde el punto de vista social y político.
- c) Por último, existe un tercer grupo de científicos cuya área de conocimiento está alejada del campo de las ciencias de la Tierra. No entienden y tampoco quieren hacer el esfuerzo por comprender las peculiaridades de la ciencia del cambio climático desconfiando en todo lo que esté relacionado con el mismo, especialmente con los métodos científicos, así como del principal organismo que lo representa: el IPCC. Estos científicos desconfían del trabajo realizado por otros colegas siendo una de las posiciones predominantes en nuestro país.

En cualquier caso, los científicos escépticos, que cuestionan sobre todo las consecuencias más catastróficas asociadas al cambio climático, no quieren que se los confunda con los negacionistas, amparados principalmente por el ala más conservadora del Partido Republicano de EE. UU. y grupos similares de Australia y Europa.

No obstante, si nos centramos en la postura frente al cambio climático del público en general pensamos, como Escrivá (2017), que se pueden establecer cuatro grupos⁹² de negacionistas climáticos.

⁹¹ El IPCC nació por un acuerdo entre el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial en 1988. Dentro de Naciones Unidas hay muchas convenciones marco pero ninguna de ellas tiene un organismo equivalente al IPCC. El funcionamiento del IPCC presenta algunos problemas, el principal de ellos es el elevado tiempo de elaboración que lleva cada uno de los informes que emite, que dura varios años hasta el momento actual se han publicado cinco informes, el último del año 2013. Esta lentitud en la publicación de los informes hace que cuando éstos aparecen, mucha de la información está ya desfasada.

1. **“Negacionistas absolutos”**. Son los que afirman que, sin lugar a dudas, lo del cambio climático es mentira. Lo pueden hacer por convicciones religiosas o porque para ellos los datos no son fiables. Defienden que no hay que preocuparse, porque sencillamente no está pasando nada.
2. **“Negacionistas naturales”**. Este segundo grupo, admite que es posible que vivamos un cambio en el clima, pero que es debido a causas naturales y que no podemos hacer nada para evitarlo. Culpan al sol, aunque se ha comprobado reiteradamente que su actividad no ha incidido en el actual periodo de calentamiento. Además, señalan que tampoco pasará nada grave.
3. **“Negacionistas optimistas”**. El tercer grupo admite la realidad del cambio climático y la culpabilidad parcial de los seres humanos pero nos anima a no luchar contra el mismo ya que las ganancias serán mayores que las pérdidas. En este sentido, obvian todos los informes económicos, sanitarios y ambientales.
4. **“Negacionistas económicos”**. El último grupo reconoce que el cambio climático causará problemas, pero que es demasiado caro hacerle frente mediante las políticas de mitigación, por lo que es mejor adaptarse a él.

Los cuatro grupos tienen una cosa en común: representan la escapatoria ideal (no es nuestra culpa y si lo es no vale la pena actuar) para seguir como si no pasara nada.

Para algunos, con el dinero de empresas que tenían intereses directos en los combustibles fósiles, se alimentaron decenas de institutos, fundaciones e incluso grupos de investigación, con el único objetivo de generar confusión y polémica en el debate sobre el cambio climático.

Es necesario señalar también, que la preocupación por el cambio climático ha proporcionado importantes fondos de financiación para la investigación. En este sentido, algunos especialistas sin intereses directos en el cambio climático han

⁹² En el trabajo original de Escrivá no hay una denominación específica para cada grupo.

logrado obtener financiación de programas que están relacionados con el mismo por lo que de alguna manera acceden a unos fondos que de otra forma le resultaría muy difícil conseguir.

7.- ECONOMIA, DESARROLLO SOSTENIBLE Y CAMBIO CLIMATICO

La pobreza, el hambre⁹³ y el cambio climático son las grandes preocupaciones del presente y del futuro. Ante las perspectivas no muy lejanas de incremento poblacional y con ello de una mayor demanda de alimentos (la FAO calcula que al menos un 60% de los niveles de 2006) será necesario incrementar su producción lo que provocará un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la agricultura y la ganadería, que en la actualidad representan al menos la quinta parte (20%) de las emisiones totales (Duran Y Sánchez, 2017).

Entre los años 1850 y 2010 la población de nuestro planeta se multiplicó por 5, mientras que el consumo energético lo hizo por 20 y el de combustibles fósiles por 150. La energía fósil barata es el fundamento de nuestras ganancias, de nuestros elevados sueldos así como de unos bienes y servicios de bajo coste, Al comienzo del proceso de industrialización los problemas de contaminación eran locales, posteriormente, con la expansión económica, pasaron a ser regionales (lluvia ácida o eliminación de residuos peligrosos) y, por último, se han convertido en globales, como la pérdida de biodiversidad y, fundamentalmente, el cambio climático (Hagens. 2015)

⁹³ El hambre no es un problema de falta de alimentos a nivel global sino la consecuencia de un mal reparto geográfico de los mismos así como de una serie de problemas estructurales del sistema alimentario mundial.

Actualmente en la Tierra hay unos 800 millones de ciudadanos desnutridos, mientras que más de mil millones de personas están sobrealimentados, con una dieta basada en una alta ingesta de proteínas animales. Ello constituye un problema para la salud pública y también para el planeta; de hecho, este tipo de dieta contribuye con un 20% al calentamiento global, a causa de la deforestación necesaria para la expansión de terrenos destinados a pasto, así como al metano (uno de los principales GEI) que emite el ganado en sus procesos digestivos (Narbona, 2017)⁹⁴.

En general las emisiones de los gases y de los aerosoles a la atmósfera crecen en proporción a la evolución de la economía. La bonanza económica y el desarrollo económico mismo tradicionalmente comportan tasas de emisiones grandes y, en cambio, las crisis económicas se caracterizan por menos emisiones.

Con el desarrollo de la ingeniería financiera y las nuevas tecnologías la especulación prolifera y lo hace de una manera característica sobre las materias primas. A diferencia de otros activos financieros, las materias primas son productos disponibles en la naturaleza o producidos por ella, con lo que se puede intensificar su producción/ extracción ampliando la extensión de las tierras cultivadas y de explotación con efectos concretos sobre la tierra. Así, una de las reacciones más inmediatas durante la crisis de la subida de los precios de los alimentos en 2008 fue incrementar la producción y registrar varios récords consecutivos de cosechas (Cascante, 2017).

La lucha contra el calentamiento global basada en el Big Data⁹⁵ está revolucionando la manera en la que se combate, gestiona y mitiga el origen de dicho calentamiento y con ello sus consecuencias económicas y de vidas humanas (Gonzalo, 2017).

⁹⁴ Esta afirmación da lugar a confusión ya que asigna a la ganadería toda la contribución del sector Agropecuario y Forestal a la emisión de GEI y además parece que la mala alimentación se debe solo a una alta ingesta de proteínas animales.

⁹⁵ Entendemos por Big Data o datos masivos a toda la información útil que se obtiene del almacenamiento y análisis combinado de enormes bases de datos tradicionales de millones de cifras y estudios fiables no digitalizados hasta el momento y de otras fuentes novedosas como los indicadores contruidos a partir de dispositivos móviles tanto Teléfonos como otro tipo de dispositivos la participación de la sociedad en el ciberespacio por ejemplo la búsqueda a través de Google y la actividad de los usuarios en las redes sociales

Por sectores económicos, el de la energía está concretando el cambio, que en síntesis es el tránsito desde los combustibles fósiles a las energías renovables y a la eficiencia energética. El sector agrario es otro de los sectores económicos responsables del cambio climático y, al mismo tiempo, receptor de los efectos del mismo, bien se trate de efectos negativos o positivos, según las áreas del planeta. Las emisiones procedentes de la agricultura, la silvicultura y la pesca se han casi duplicado en los últimos cincuenta años, y podrían aumentar en un 30 por ciento adicional para 2050, sin no se lleva a cabo un esfuerzo mayor para reducir las (FAO, 2014a).

2015 ha sido el primer año de crecimiento económico positivo en el que se tiene constancia de un descenso de las emisiones antropogénicas de CO₂ consecuencia del aprovechamiento energético, gracias en gran parte al menor consumo de carbón de China. (Weiss, 2015).

7.1.- DESARROLLO SOSTENIBLE Y CAMBIO CLIMATICO

En 1987, la Comisión de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Mundial y el Desarrollo (denominada Comisión Brundtland⁹⁶), publicó el célebre informe “Nuestro futuro común”, más conocido como “Informe Brundtland”. Después de novecientos días de estudio y reuniones, emergió con fuerza el concepto de **desarrollo sostenible**. Arraigado en la antigua visión de una gestión duradera y no depredadora de los recursos naturales. Sin duda, el cambio climático ponía en riesgo la capacidad para satisfacer las necesidades de aquellos que habitarían la Tierra al cabo de unos pocos años (Escriva, 2017).

La definición más conocida de desarrollo sostenible es: “*el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades.*” (World Commission on Environment and Development, WCED, 1987). Se trata de una expresión ambigua, pero no contradictoria, ya que intenta compatibilizar el desarrollo económico con la reducción de la presión de nuestra especie sobre los sistemas naturales. El término sostenible, parece haberse constituido, gracias a la engañosa simplicidad y la inherente ambigüedad, en un puente de consenso entre desarrollistas y ambientalistas (Escriva, 2017). El desarrollo sostenible (sustentable o perdurable)

⁹⁶ El nombre proviene del apellido de la primera ministra de Noruega Gro Harlem Brundtland, que presidía la citada Comisión.

posee tres dimensiones: económica, ambiental y social. Es decir, reconoce la interdependencia entre el medio ambiente, el bienestar social y la actividad económica, y la necesidad de establecer y mantener un equilibrio dinámico entre estos tres elementos.

En relación con el cambio climático, para cumplir con la definición de sostenibilidad, se debería imponer al desarrollo actual la restricción de que no se usen los recursos de manera que se perjudique las oportunidades del futuro y los análisis de las políticas climáticas deberían introducir este requisito. Esto implicaría asumir como legítima una distribución de derechos diferente a la del análisis económico convencional. La consideración de la obligación de respetar los derechos de las generaciones futuras implicaría un análisis de las políticas de mitigación que incorpore restricciones en los impactos del cambio climático. Así, las obligaciones del presente deberían llevar a la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a niveles que impidan interferencias antropogénicas que comprometan el sistema climático de nuestro planeta, perjudicando gravemente la capacidad ecológica y económica que legamos a nuestros descendientes.

La búsqueda de un desarrollo sostenible implica el cambio de un concepto fundamental que es considerar que el crecimiento económico para satisfacer las necesidades humanas es un medio y no un fin en sí mismo. Hoy en día, existen muchas contradicciones ya que los líderes políticos que por un lado reclama la necesidad de establecer acuerdos para combatir el cambio climático también se alegran del aumento incremento de la extracción de petróleo y la caída de sus precios. No debemos olvidar que la principal manera de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero es dejar sin extraer una buena parte de las reservas de combustibles fósiles que existen en nuestro planeta. La economía no puede olvidarse de que sus actividades se desarrollan en un sistema finito que es la Tierra.

En 2015, la Asamblea General de la ONU adoptó la agenda 2030 que incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Es la primera vez que se integra la “clásica” agenda internacional del desarrollo (qué pretende erradicar la pobreza y el hambre, garantizar el acceso a la sanidad y a la educación, etc.) con la agenda internacional de la sostenibilidad ecológica, resultado de cerca de cerca de 500 acuerdos multilaterales sobre un amplio abanico de cuestiones (cambio climático, biodiversidad, contaminación del aire y del agua, etc. Hasta ahora las dos agendas

habían avanzado en paralelo sin tener en cuenta la interdependencia entre las cuestiones sociales, ambientales, económicas e institucionales (Narbona, 2017).

El cambio climático requiere una apropiada administración de riesgos para lo que es indispensable considerar que los procesos de adaptación y de mitigación son interdependientes. Instrumentar, de manera eficiente, estos procesos de adaptación y mitigación implica transformaciones sustanciales al actual estilo de desarrollo y supone transitar a un desarrollo sostenible. En este sentido el desafío del cambio climático es el desafío del desarrollo sostenible (Galindo et al., 2015).

7.2.- ECONOMÍAS “VERDES” FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Una gran mayoría de economistas y gobiernos se resisten a abordar las implicaciones del crecimiento económico para la biosfera y prefiere aferrarse a la esperanza de un desacoplamiento absoluto, conseguido gracias a una combinación de cambios tecnológicos y una economía basada sobre todo en el sector servicios. No obstante, la evidencia sugiere que es improbable un desacoplamiento absoluto del crecimiento económico y del trasiego de materiales y energía. Por este motivo, la transición ecológica de la economía es un proceso que ya se ha iniciado en todos los continentes. Ello se debe tanto a razones económicas (la innovación tecnológica ha reducido drásticamente el coste de las energías renovables, que van sustituyendo paulatinamente a los combustibles fósiles) como a la creciente concienciación ciudadana, que ante los efectos cada vez más visibles del cambio climático, exige medidas concretas por parte de los poderes públicos. No puede haber economía sin ecología ya que la contaminación, la escasez de los recursos o la destrucción de hábitats, terminan pasando factura. No obstante, el conocimiento sobre la dimensión económica de los equilibrios ecológicos ha tardado mucho tiempo en consolidarse (Narbona, 2017).

En cualquier caso, hay que hacer una distinción clara entre las dos principales disciplinas de la economía que se ocupan del medio ambiente, y que no son sinónimos: la economía ambiental y la economía ecológica. La economía ambiental es una versión pintada de verde de la economía neoclásica que impera actualmente: trata de hacer una asignación óptima de recursos y disminuir la contaminación mediante herramientas tradicionales. Para la economía neoclásica, los recursos naturales y los residuos, al no tener valor económico, quedan fuera del

análisis, es decir, son externalidades⁹⁷. La Economía ambiental acepta los principios de la economía neoclásica, pero reconociendo que el mercado no puede resolver la cuestión ambiental (externalidades) para lo que propone una serie de soluciones: valoración monetaria de recursos ambientales, con técnicas de simulación del mercado (método coste del viaje, precios hedónicos, etc.) o internalizando las externalidades, al imputar todos los costes a sus responsables económicos, por ejemplo con tasas o impuestos "verdes". El peligro de los postulados de la economía ambiental es que no renuncia al crecimiento económico.

La economía ecológica, mucho más difusa como campo de estudio, incluye desde el principio las variables ambientales, entendiendo que toda la economía es una actividad humana que se desarrolla dentro de la biosfera, y que, por tanto, es ésta la que debe dirigir el crecimiento o, incluso, el decrecimiento. La economía ecológica no acepta los postulados de la economía ambiental o de la economía clásica ya que ambas conciben la economía como un sistema cerrado que no satisface las necesidades de la población, deteriorando la biosfera y destruyendo los recursos naturales. Además, critica la universalidad del valor monetario como medida aplicable a la totalidad del mundo físico y social, así como el empleo del mecanismo del mercado en la gestión ambiental ya que favorece comportamientos egoístas. La economía ecológica no rechaza el desarrollo sostenible pero propone otros instrumentos económicos para aplicar junto al mismo, como una nueva contabilidad general (que incorpore costes ecológicos, sociales y ambientales de los procesos económicos) o un nuevo indicador de bienestar que sustituya al PIB, que incluya gastos de mejora ambiental y de la depreciación del capital ambiental a largo plazo.

⁹⁷ Concepto de externalidad: a veces la actividad económica no sólo repercute en compradores y vendedores, sino que también afecta a terceros, y en ocasiones muy negativamente. Estos efectos no son tenidos en cuenta por compradores y vendedores a la hora de tomar sus decisiones. Estos efectos secundarios no contemplados por compradores ni vendedores se denominan externalidades, que pueden ser positivas (beneficios para un tercero) o negativas (perjuicios para un tercero). Cuando la iniciativa privada falla para resolver las externalidades puede estar justificada la intervención del Estado y/o administraciones públicas. El Estado tratará de corregir esta deficiencia: regulando las actividades (prohibiendo o promoviendo determinadas actuaciones, según generen externalidades negativas o positivas) o estableciendo mecanismos correctores (subvenciones o penalizaciones). También se puede definir, brevemente como los costes de un producto o servicio que no están incluidos en el precio final.

Los recursos materiales, son finitos, por definición: mientras que la economía ambiental tratará de optimizar la producción y garantizar el continuo crecimiento de la producción (eso sí, incluyendo medidas para contaminar menos), la economía ecológica no asumirá en ningún caso que siempre se pueda crecer.

El cambio climático es, desde el punto de vista económico consecuencia de una externalidad negativa consustancial al actual estilo de desarrollo global (Stern, 2006b); es decir, las actividades económicas emiten a la atmosfera, sin ningún coste económico una serie de GEI que ocasionan el cambio climático (Galindo *et al.*, 2015).

El libre mercado no es eficiente en términos ecológicos, porque si nadie le dice que ha incorporar determinadas externalidades negativas, el mercado, sencillamente, no lo hará. Si el Estado no lidera, y lo hace con el arma más poderosa que tiene (las leyes) difícilmente le seguiría nadie.

La economía ambiental es una herramienta útil que puede ayudarnos a disminuir los impactos de nuestras actividades, pero el papel que debería tener, si verdaderamente nos creemos que hemos de avanzar hacia la sostenibilidad, es el de facilitar la transición. Nos puede ayudar de muchas formas distintas a superar esta crisis ambiental y, al mismo tiempo, a vislumbrar un futuro en el que la economía ecológica no sea tratada como una utopía inalcanzable, sino como el siguiente paso lógico que hay que realizar. La economía ambiental nos dice que subir el precio de un bien o servicio es una de las formas más eficientes de limitar las ventas o su consumo. La economía ambiental posee herramientas para reconducir el crecimiento hacia una sostenibilidad con significado y profundidad, una nueva etapa que permitirá plantear con más garantías de éxito el paso definitivo hacia la economía ecológica (Escriva, 2017).

Está creciendo gradualmente el consenso para establecer un impuesto cada vez más alto sobre los GEI (tasa para el carbono); en este sentido, incluso el Banco Mundial, que considera poco fundados los temores que su aplicación tendría sobre la pérdida de competitividad y el freno al crecimiento (World Bank/ Carbon Pricing Leadership Coalition, 2016). Algunos países desarrollados, como Suecia, han logrado desacoplar el crecimiento de la emisión de GEI, que representa uno de los objetivos de la economía ambiental: sostener el desarrollo económico empleando cada vez menos recursos materiales (Escriva, 2017).

Pero poner precio al carbono o implementar otros impuestos verdes no son la única solución para luchar desde un plano económico contra el cambio climático. Ni

siquiera son la mejor alternativa porque nos garantizan un uso más eficiente, pero uso al fin y al cabo. Existe una alternativa: dejar de invertir en compañías que explotan combustibles fósiles. Si queremos que dejen de extraer la mayor parte de su capital físico, y que a la vez tengan un menor peso en la economía mundial, la manera más rápida de hacerlo que dejándolas sin recursos económicos.

Además de la economía ambiental y la economía ecológica, han surgido otras economías relacionadas con el medio ambiente: la “economía verde” y la “economía circular”

El término “economía verde”, acuñado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente en 2008; se define como: “el desarrollo humano del bienestar y la equidad social, mientras se reducen significativamente los riesgos medioambientales y los desastres ecológicos”. En una expresión más simple, es una economía de bajo consumo de carbono, con eficiencia de recursos y socialmente equitativa e igualitaria (Vilnitzky, 2017).

Un sector muy importante relacionado con la economía verde es la **alimentación**, especialmente en el aspecto de una conciencia para un cambio en la alimentación basado en un mayor consumo de verduras y una reducción en la ingesta de carnes. En este sentido, el sector de la alimentación y la agricultura desempeña un papel crítico en los esfuerzos encaminados al reverdecimiento de la economía. Existe cada vez más conciencia sobre la importancia del consumo local, ecológico y respetuoso con las personas que lo producen. Las experiencias están relacionadas con el comercio justo o con cooperativas rurales de pequeños países productores (Vilnitzky, 2017).

En cuanto al término “economía circular”, prevé un sistema de producción y consumo que reduce al mínimo las pérdidas que genera. En un mundo ideal, se reutilizaría, reciclaría o recuperaría prácticamente todo para producir otros productos. El rediseño de los productos y los procesos de producción podría ayudar a minimizar el despilfarro y a convertir el porcentaje no utilizado en un recurso.

7.3.- EL INFORME STERN

El Informe Stern sobre la economía del cambio climático supone un hito histórico al ser el primer informe encargado por un gobierno a un economista en lugar de a un climatólogo. Stern (2006a), evaluó una extensa serie de pruebas de los impactos del cambio climático y de los costes económicos, empleando diversas técnicas para analizar costes y riesgos. Desde todas estas perspectivas, la evidencia recopilada en el Informe llega a una sencilla pero contundente conclusión: los beneficios de emprender acciones enérgicas y tempranas superan con creces los costes económicos de la falta de acción. Es decir, los costes de la estabilización del clima son considerables pero manejables; un aplazamiento sería peligroso y mucho más costoso.

Utilizando los resultados de modelos económicos anteriores, el Informe estima que si no actuamos, el impacto económico negativo del cambio climático podría ser como mínimo el 5% de pérdida del PIB anual (ahora y en el futuro⁹⁸); si se considera una mayor diversidad de riesgos e impactos, las estimaciones de los daños podrían alcanzar un 20% o más del PIB. En un estudio reciente (2015), se estima en 65 billones de euros el coste de la no acción contra el cambio climático para el año 2060, dependiendo del escenario de aumento de la temperatura y de la tasa de descuento utilizada (Sanchez, 2016). Por contra, los costes de acciones adecuadas (reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero para evitar los peores impactos del cambio climático) pueden limitarse a algo más de un 1% del PIB global anual.

Stern (2006) señala el hecho de que ahora se esperan mayores impactos monetarios del cambio climático de lo que sugerían los estudios previos, en buena parte debido a que excluían algunos de los impactos más inciertos pero potencialmente más dañinos. Esto, más otra serie de diferencias de criterio, como la elección del tipo de descuento utilizado, lleva a Stern a dar una visión radicalmente distinta sobre la magnitud de los costes del cambio climático a la de la mayoría de modelos económicos aplicados.

En general, los modelos económicos convencionales aplicados al cambio climático sugieren que no es rentable llevar a cabo acciones enérgicas para mitigar el cambio climático, o que estas acciones deberían ser muy limitadas (por ejemplo, Manne & Richels, 2000; Peck & Teisberg, 1999; Nordhaus & Yang 1996; Hamaide &

⁹⁸ En el cálculo se transforman los impactos que tienen lugar a lo largo del tiempo en un flujo anual equivalente

Boland, 2000). Según estos modelos los impactos económicos del cambio climático no justificarían los costes que supondría una política decidida de control de emisiones. El análisis económico convencional descuenta (o actualiza) los flujos que ocurren en el futuro. Es decir, les da menor peso a los flujos futuros que a los impactos inmediatos. La aplicación habitual del descuento devalúa y prácticamente elimina del análisis los impactos que ocurren en el futuro distante, de forma que, para los modelos económicos, el mantenimiento de las condiciones necesarias para la vida en el futuro lejano tiene un valor presente insignificante. Parte de la controversia sobre los modelos aplicados al cambio climático se ha dado en torno a la elección de la tasa de descuento. Una muestra de esta controversia es la crítica de Nordhaus a la elección por parte de Stern (2006) de una tasa de descuento excesivamente baja⁹⁹, lo que explicaría los resultados “radicales” de Stern: “si la sustituyéramos por tasas de descuento más convencionales utilizadas en otros análisis de cambio climático [...], los resultados dramáticos del Informe de Stern desaparecerían” (Nordhaus, 2006).

Stern llama la atención de otro riesgo global: en caso de un acuerdo ambicioso para revertir el cambio climático, dos terceras partes de las reservas fósiles no se extraerían, de modo que, las carteras de inversiones colocadas a largo plazo en reservas de empresas de energías fósiles, estarían ante un enorme riesgo económico. Por tanto, actualmente, el riesgo del cambio climático no está en sus efectos negativos para la economía, sino que el riesgo reside en ignorar el cambio climático al invertir en una burbuja de carbono (Sánchez, 2016).

Las inversiones que se realicen en los próximos años tendrán importantes efectos en el clima durante la segunda mitad de este siglo y en el siguiente. Lo que hagamos ahora y a lo largo de las próximas décadas podría plantear riesgos de grandes alteraciones en la actividad económica y social (Stern, 2006a).

La adaptación al cambio climático (emprender medidas para crear resistencia al mismo y minimizar los costes) es imprescindible. Ya no es posible impedir el cambio climático que tendrá lugar a lo largo de las próximas dos o tres décadas, pero todavía es posible proteger de alguna manera nuestra sociedad y economía contra sus impactos.

En cualquier caso, el mundo no está obligado a elegir entre evitar el cambio climático o promover el crecimiento y desarrollo. De hecho, la lucha contra el

⁹⁹ Una tasa de descuento excesivamente baja implica que se da mucha importancia al consumo futuro, lo que es muy poco frecuente.

cambio climático es una estrategia que favorece el crecimiento a más largo plazo, y se puede hacer de manera que no limite las aspiraciones de crecimiento de países ricos o pobres.

Los cambios experimentados por las tecnologías energéticas, así como en la estructura de las economías han creado oportunidades para desvincular el crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, las medidas sobre cambio climático crearán importantes oportunidades empresariales, a medida que se crean nuevos mercados de tecnologías bajas en carbono y de otros bienes y servicios bajos en carbono. Incluso con una fuerte expansión en el uso de energías renovables y otras fuentes de energía bajas en carbono, los combustibles fósiles podrían representar más de la mitad del suministro global de energía en 2050. El carbón seguirá desempeñando un papel importante en el “mix energético” mundial, incluyendo las economías de rápido crecimiento. La captura y almacenamiento de carbono a gran escala será necesario para permitir el uso continuado de combustibles fósiles sin dañar la atmósfera. También es imprescindible lograr reducciones no energéticas, por ejemplo, en el ámbito de la deforestación, así como de procesos agropecuarios e industriales (Stern, 2006a).

Para Stern, el cambio climático constituye el mayor fracaso del mercado jamás visto en el mundo, e interactúa con otras imperfecciones del mismo. Tienen que formularse tres elementos de política para una respuesta global efectiva. El primero es la fijación del precio del carbono, aplicada a través de impuestos, comercio de emisiones o regulación. El segundo se refiere a una política que apoye la innovación y el despliegue de tecnologías bajas en carbono. Y el tercero se refiere a medidas para eliminar las barreras a la eficiencia energética, y para informar, educar y persuadir a las personas acerca de lo que pueden hacer para responder al cambio climático (Stern, 2006a).

Como concluye el informe Stern (2006), debe existir una visión compartida de los objetivos y debe haber acuerdo sobre los marcos de actuación. Algunas de las medidas fundamentales que, según el informe, deberían incluir esos marcos, son: el comercio de emisiones, la cooperación tecnológica entre países, las medidas para reducir la deforestación, así como medidas de adaptación para paliar los efectos del cambio climático. Las medidas de adaptación son especialmente urgentes en los países pobres, los más vulnerables al cambio climático, si se quiere reducir la gravedad de los impactos negativos.

Posiblemente aún estemos a tiempo de evitar los peores riesgos del cambio climático, que según los últimos estudios podrían ser catastróficos. Si bien los

esfuerzos económicos para conseguirlo no son pequeños, éstos podrían suponer un coste razonable para “asegurarnos” contra sus peores efectos y evitar así los riesgos de impactos catastróficos sobre las generaciones futuras.

El cambio climático es un problema global y sólo se puede dar una solución efectiva al mismo si la respuesta es internacional. Los nuevos acuerdos contra el cambio climático se deberían construir sobre los marcos ya existentes, como la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático y los Protocolos de Kioto y París, que veremos en el siguiente apartado.

8.- ACUERDOS INTERNACIONALES SOBRE CAMBIO CLIMATICO: DE RIO A BONN

En 1992 se creó, en Río de Janeiro, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que se reúne anualmente para evaluar los progresos y adoptar una serie de medidas para la estabilización de la concentración de los GEI. Es también un espacio en que se ve la diferente velocidad que llevan Gobiernos y científicos respecto al medio ambiente, ya que las evidencias de estos últimos van muy por delante de las acciones de los primeros.

El **Protocolo de Kioto** es un Acuerdo internacional alcanzado con el propósito de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de origen antrópico que provocan el cambio climático. Su entrada en vigor se produjo en el año 2005, y consta de dos periodos de actuación: 2008-2012 y 2013-2020. Por primera vez, con el Protocolo se definieron unos objetivos de reducción obligatorios, cuantificados y específicos. El texto de este Protocolo se enmarca dentro de la CMNUCC. De acuerdo con el principio de “responsabilidades comunes pero diferenciadas” establecido por la CMNUCC, en Kioto únicamente son los países responsables de la mayoría de las emisiones de GEI, así como aquéllos que disponen de mayores recursos económicos, los que tienen objetivos de reducción y los que deben liderar los esfuerzos de mitigación¹⁰⁰. La promulgación del Protocolo se vio favorecida por

¹⁰⁰ Por esta razón, durante el primer periodo de compromiso (2008-2012), sólo los países pertenecientes en 1992 a la OCDE y aquellos que estaban en transición hacia una economía de mercado (Rusia, países Bálticos y varios estados de Europa central y oriental) habían de reducir sus emisiones. El objetivo en este primer periodo era reducir el total de las emisiones de GEI en un 5,2% respecto a los valores de 1990 ó 1995 (según el tipo de gas). Los gases incluidos en los límites de emisión fueron seis: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆). Los objetivos de

la publicación, en el año 1995, del segundo Informe de Evaluación del IPCC, que concluía que el clima ya había empezado a cambiar como consecuencia de las emisiones de GEI generadas, fundamentalmente, por el empleo de combustibles fósiles. El segundo periodo de compromiso del Protocolo de Kioto (2013-2020) supuso un puente hacia el acuerdo global que se esperaba alcanzar en la Cumbre del Clima de 2015 en París y que se aplicaría a partir de 2020. El protocolo de Kioto es hijo de su época, en la cual aún existían dudas sobre el alcance del cambio climático, una incertidumbre que aprovechaban los negacionistas (fundamentalmente empresas relacionadas con los combustibles fósiles,) para intentar condicionar las políticas públicas (Escrivá, 2017).

Tras Kioto vino una cierta inactividad, que comienza a romperse en el año 2006 con la publicación del Cuarto Informe de IPCC y la aparición del Informe Stern (Stern, 2006a) del prestigioso economista británico del mismo nombre así como del documental “Una verdad incómoda”, del ex vicepresidente Americano Al Gore que , probablemente el que más impacto mediático tuvo. El cambio climático volvía a la actualidad, la preocupación ciudadana aumentaba y los gobiernos, incluso aquellos que habían obviado Kioto, comenzaron a darse por aludidos. Con este impulso se llegó a Copenhague en 2009, donde se celebró la cumbre climática de la cual debería emerger el acuerdo que tendría que sustituir a Kioto (que, en teoría, se acabaría en 2012). Desgraciadamente, el resultado fue un fracaso absoluto: sin objetivos claros, sin plazos, sin voluntad de cambiar nada. No llegaba ni siquiera a ser una segunda parte de Kioto. 2010 fue un año nefasto para las expectativas de quienes esperaban ver un cambio en el debate climático ya que la crisis económica

reducción nacionales oscilaron entre el 0% y el 8% aunque a determinados países industrializados, como Australia o Islandia, se les permitía incrementar sus emisiones. El primer periodo del acuerdo fue ratificado por 191 países, más la Unión Europea, que actúa como Parte del Protocolo independientemente de sus estados miembros y divide los esfuerzos de reducción entre éstos. Estados Unidos no llegó a ratificar el acuerdo pese a haberlo firmado en 1998. Lo que la entrada en vigor del Protocolo quedó en manos de Rusia (ya que se precisaba un mínimo de 55 partes responsables de, al menos, el 55% de las emisiones globales), que lo ratificó a finales de 2004, entrando en vigor en febrero de 2005. Al final del primer periodo de compromiso de Kioto, las emisiones totales de GEI de los países con reducciones obligatorias fueron, oficialmente, un 22,6% inferiores a las del periodo de referencia 1990-2005, aunque no está claro que estas reducciones se hayan debido al Protocolo. El acuerdo para dar continuidad al Protocolo de Kioto sólo se logró en la Cumbre de Doha en 2012 (Enmienda de Doha) alargándolo hasta el 31 de diciembre de 2020, incluyendo nuevos compromisos de reducción de emisiones de GEI de un 20%, como promedio a lo largo de 2013-2020, respecto al año de referencia (1990) reducción de emisiones. El objetivo de España es reducir sus emisiones en sectores difusos (transporte, agricultura o residuos) en un 10% en 2020 respecto a 2005.

mundial hizo pasar a un segundo plano cualquier cuestión ambiental, especialmente en Europa. Y entonces llega París, que lo va a cambiar todo.

En diciembre del año 2015, 195 países alcanzaron en París un acuerdo para contener las emisiones de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento y que el aumento de la temperatura media mundial se mantenga muy por debajo de 2 °C¹⁰¹ con respecto a los niveles preindustriales, cantidad a partir de la cual los científicos advierten que el cambio climático tendría consecuencias catastróficas. El Acuerdo de París entró en vigor en menos de un año, el 4 de noviembre de 2016, siendo uno de los tratados que más rápido se han realizado (Nuño, 2017). A pesar de ello, ya ha recibido un durísimo golpe con el rechazo de EEUU. En efecto, con la llegada de Donald Trump a la presidencia, la política medioambiental de Estados Unidos ha experimentado un cambio radical retirándose del acuerdo de París contra el cambio climático lo cual no solo es importante para Estados Unidos sino que tiene implicaciones a nivel mundial (Vallejo, 2017). No podemos olvidar que una de las claves para el éxito inicial de la conferencia de París sobre el cambio climático fue el acuerdo histórico entre China¹⁰² y Estados Unidos, los dos países más contaminantes del planeta y responsables del 40% de las emisiones totales (Ríos, 2017)

El rechazo de Trump está basado en el apoyo de los llamados negacionistas (“Contrarian”), una serie de personas e instituciones que rechazan el cambio climático. Aunque críticos y negacionistas del cambio climático hacen hincapié en las incertidumbres de la ciencia del clima las mayores dudas existentes se deben a la propia acción humana: el modelo energético que tendremos, cuántos gases efectos invernadero se emitirán, cuál será el tamaño de la población mundial, qué cambios económicos y tecnológicos habrá en el futuro, etc. (Rivera, 2017).

En la cumbre de París se dispararon las expectativas después de los fracasos de las últimas cumbres climáticas. Se llegó a un acuerdo con una base amplia y objetivos claros, que por fin admitía la gravedad de la situación y establecía un horizonte hacia al que caminar. El rasgo esencial del acuerdo de París es que presenta una

¹⁰¹ Continuando los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales.

¹⁰² En 2006, según cifras de Naciones Unidas, China superó a Estados Unidos en emisiones de CO₂, convirtiéndose en el país más contaminante del planeta (21,5% de las emisiones de CO₂ del mundo). Esto convierte a China en un país clave a la hora de negociar y firmar acuerdos de relevancia en relación con el cambio climático (RÍOS, 2017).

hoja de ruta que, si se cumple, nos evitaría, con casi total probabilidad, los escenarios futuros más negativos del cambio climático (Escrivá, 2017). Resumiendo, en París se marcaron tres objetivos fundamentales:

1. mantener el aumento de la temperatura media mundial «muy por debajo» de los 2°C respecto a los niveles preindustriales;
2. los países se comprometen a realizar “todos los esfuerzos necesarios” para que el aumento no sobrepase el umbral de 1,5°C;
3. compromiso de ser neutrales en carbono (conseguir un equilibrio entre lo que se emite y lo que se captura) en la segunda mitad del siglo XXI.

Los dos primeros objetivos están íntimamente relacionados. Un grupo de investigadores (Reed, 2016), piensan que por fin, se ha acordado una cifra(s) que nos puede evitar los peores impactos del cambio climático. En este sentido, la razón para establecer el umbral de los 2°C, o incluso en el 1,5°C, es debido a que se piensa que es la mejor opción para evitar un cambio climático desbocado, que pondría en marcha mecanismos de retroalimentación que no podríamos controlar. Algunos cálculos hablan de un 50% de probabilidades de evitar este cambio incontrolable si no llegamos a los dos grados y, lógicamente, quedarnos en 1,5°C proporciona un mayor margen de seguridad. En cualquier caso, es urgente saber y entender las consecuencias de ese medio grado de diferencia, porque parece que las diferencias que implicaría no son, en absoluto, despreciables. (Schleussner, 2016.).

No obstante, según estudios efectuados después de la cumbre de París (Schellnhuber, *et al.*, 2016.), los compromisos adquiridos por los países firmantes no bastan para limitar el calentamiento a 1,5°C, ni tampoco a 2°C. Aunque los autores reconocen el progreso que suponen los objetivos asumidos en París, las herramientas que se piensan destinar y los compromisos adoptados nos llevarían a un mundo con un calentamiento cercano a los 3° C lo que implica muchas menos posibilidades de evitar la puesta en marcha de algunos procesos incontrolables, como el deshielo de Groenlandia.

El tercer objetivo del Protocolo de París establece otro hito fundamental al señalar como una prioridad la descarbonización de la economía; es decir, emitir sólo los GEI que el planeta pueda absorber y almacenar. Muchos señalan este compromiso como el más efectivo para guiar políticas públicas (Rogelj *et al.*, 2016.)

Para muchos, la crisis del petróleo de 1973 supuso el primer aviso de que los recursos de nuestro planeta no son infinitos. Desde entonces, no se ha dejado de especular sobre cuándo ocurriría el pico de extracción. Un debate que se suponía

esencial a la hora de tratar el cambio climático es tan sólo una nota al pie. Porque, sencillamente, no importa. Cuando se hablaba del pico de petróleo se hablaba, fundamentalmente, de reservas geológicas, de dólares por barril, de mercado potencial y de otras variables económicas. La palabra clave era escasez. Pero nada de esto es relevante si tenemos en cuenta que, para evitar los impactos de los GEI y cumplir los compromisos de París, debemos dejar más del 80% de los combustibles fósiles bajo tierra. Como señala Escrivá, (2017), aunque los estudios presentan algunas diferencias respecto a las Gts de CO₂ que aún podemos emitir, todos están de acuerdo en que son muchísimo menores a las que emitirían las reservas de combustibles fósiles que tenemos pensado quemar; en este sentido, las principales cifras serían:

- las actividades humanas emiten unas 40 Gts de CO₂ anuales;
- las reservas mundiales de combustibles fósiles que conocemos ahora se estiman entre unas 2.700 y 5.400 Gts de CO₂;
- para tener un 50% de probabilidades de quedarnos para debajo de los 2 °C de calentamiento, tenemos lo que se llama un *presupuesto de carbono*¹⁰³ entre 870 y 1.240 Gts de CO₂. Según Mcglade & Eklins (2015), 1.100 Gts entre 2011 y 2050, de las que ya hemos consumido una buena parte;
- para tener más de un 66% de probabilidades, el *presupuesto de carbono* se debería reducir a unos niveles comprendidos entre 470 y 1.020 Gts de CO₂ (Rogeli, *et al.*, 2016);
- para tener más de un 80% de probabilidades de quedarnos por debajo de los 2 °C, el *presupuesto de carbono* debería reducirse como mínimo hasta las 565 Gts de CO₂;
- para intentar limitar el calentamiento a 1,5 °C, deberíamos de evitar sobrepasar las 200 Gts de CO₂. Al ritmo actual, en 2020 podríamos acabar con nuestras posibilidades de limitar el calentamiento a 1, 5 °C.

Mcglade & Eklins (2015), recomiendan dejar bajo tierra y no utilizar un tercio de las reservas de petróleo, la mitad de las de gas natural y ocho de cada diez toneladas de carbón, para tener un 50% de probabilidades de llegar a los 2 °C acordados en París.

¹⁰³ Límite para futuras emisiones de GEI.

Si el Protocolo de Kioto derivó en un instrumento que básicamente obligaba a los Estados europeos a reducir sus emisiones, el Acuerdo de París tiene la virtud de haber conseguido que todos los Estados, independientemente de su nivel de desarrollo, reduzcan sus emisiones de GEI. Hay que recordar que ya en el año 2007, la Unión Europea aprobó el paquete 2020, de medidas sobre clima y energía (de aplicación interna), por el que se compromete a reducir un 20% la emisión de gases de efecto invernadero del sector difuso (aquel que no está incluido en el Protocolo de Kioto), qué representa el 55% de las emisiones de la Unión Europea, incluyendo sectores como, transporte, agricultura o ganadería. Además, también se comprometía a aumentar en un 20% el consumo de energías renovables, así como a incrementar la eficiencia energética en otro 20%, todo para el año 2020 (Ruiz, 2017).

La Unión Europea siempre ha mostrado un firme compromiso con el cambio climático a lo largo de los 25 últimos años, destacando también su capacidad para movilizar a otros países. Igualmente, el papel jugado por la UE ha sido fundamental para el éxito del Acuerdo de París de 2015. La idea final de la Unión Europea es convertirse no solo en un líder en las negociaciones climáticas sino también encabezar el sector de las energías renovables en el mundo, cambiando el actual modelo energético, dominado por las energías fósiles, a otro donde predominen las energías renovables, aumentando con ello la seguridad energética de los países europeos. En este sentido, se promueve un cambio del modelo lineal de Economía por un modelo circular que tiene como objetivo reducir la extracción de materias primas a través de la reutilización y transformación de los residuos en nuevas materias primas. Una de las propuestas que afecta al sector agropecuario respecto a la economía circular es el objetivo de disminución del despilfarro de alimentos (Ruiz, 2017).

Hay que destacar que el gobierno de nuestro país está promoviendo el desarrollo de una Ley de cambio climático y transición energética que debería de establecer un calendario para el abandono de todas las energías sucias y su sustitución por energía renovables (Nuño, 2017).

Entre el 6 y el 17 de noviembre de 2017 se celebra en la ciudad alemana de Bonn la conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático 2017 (COP23) con el objetivo de que las naciones impulsen el Acuerdo de París de 2015 para hacer frente al calentamiento global. En el momento de finalizar este trabajo todavía no se han elaborado las conclusiones de esta última cumbre del clima.

9.- SISTEMA AGROALIMENTARIO Y CAMBIO CLIMÁTICO.

El ser humano tiene que hacer frente a un doble reto sin precedentes: asegurar el abastecimiento de alimentos a la población y estabilizar el clima mundial antes de que sea demasiado tarde. Para poder cumplir ambos retos, el sistema agroalimentario¹⁰⁴ tienen un papel fundamental, pero complicado. Fundamental, porque la agricultura sostenible va a desempeñar un destacado papel en varios de los objetivos de la Agenda de Desarrollo Sostenible, así como la mitigación del cambio climático. Complicado, porque el crecimiento de la producción agraria va acompañado de una disminución en la disponibilidad de recursos (tierras y aguas) en diversos lugares del mundo lo que obliga el desarrollo de un sector agrario más eficiente y resistente.

Para ello, será necesario desarrollar un sector agrario diversificado que facilite la resiliencia de los agroecosistemas, lo que la FAO ha denominado agricultura climática inteligente o agroecología sostenible (Duran & Sánchez, 2017). Con la adopción de las directrices de la Agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible y el Acuerdo de París sobre cambio climático, la comunidad internacional se ha comprometido con el objetivo de conseguir un futuro sostenible. En cualquier caso,

¹⁰⁴ Cuando hablamos de sistema agroalimentario, o simplemente sistema alimentario, incluimos, por un lado, al sector agrario (agrícola, ganadero y forestal) y a todas aquellas actividades que proporcionan inputs al mismo (fertilizantes, semillas, combustibles, etc.) y, por otro, a la industria alimentaria, así como al sector de la distribución de alimentos, que se encargan de preparar y acercar los alimentos a los consumidores (transporte, recepción, almacenamiento, procesamiento, conservación, distribución y venta de alimentos de consumo humano y animal).

cumplir los objetivos de erradicar el hambre y la pobreza en el año 2030 y al mismo tiempo enfrentarse al cambio climático requerirá una profunda transformación de los sistemas agroalimentarios en todo el mundo. Debido a que las repercusiones negativas del cambio climático se agravarán con el tiempo, el camino hacia un sector agrario y alimentario sostenible debe comenzar lo antes posible. En este sentido, los sistemas agrosilvopastorales, que integran cultivos, ganadería y arbolado son un ejemplo de sostenibilidad (FAO, 2016a).

9.1.- SEGURIDAD EN EL ABASTECIMIENTO DE ALIMENTOS

Hemos preferido emplear la expresión “seguridad en el abastecimiento de alimentos” en lugar de “seguridad alimentaria” para dejar claro que nos referimos a “seguridad” en el sentido de disponibilidad alimentaria para las poblaciones humanas¹⁰⁵. En este sentido, los textos en español de Naciones Unidas, especialmente los de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), a los que hacemos mención en este trabajo, suelen emplear la expresión “seguridad alimentaria” (“food security”) para referirse a la disponibilidad de alimentos, el acceso de las personas a ellos y el aprovechamiento biológico de los mismos.

La FAO prevé que en 2050 la demanda mundial de alimentos se incremente como mínimo un 60% en relación con los niveles de 2006 impulsada por el crecimiento de la población y de sus ingresos así como por una rápida urbanización. Los esfuerzos que realiza el sector agrario para lograr un equilibrio en las emisiones de carbono tienen como consecuencia la adopción de medidas con efectos antagónicos para el medio ambiente. Así, por ejemplo, el empleo de suelo y agua para la producción de alimentos y/o biocombustibles genera impactos ambientales negativos, mientras que las actividades de conservación y repoblación forestal tienen efectos positivos al reducir las emisiones globales de efecto invernadero (FAO, 2016a).

¹⁰⁵ En castellano, tanto el término inglés “*safety*” como “*security*” se traducen como seguridad. Así, la expresión inglesa “*food safety*” hace referencia a la inocuidad de los alimentos, es decir, a la garantía de su salubridad para el consumidor (higiene de los alimentos), mientras que la expresión “*food security*” queda reservada para designar la disponibilidad suficiente de alimentos, es decir “*security*” se refiere aquí a la seguridad del abastecimiento. La primera expresión suele encontrarse en textos sobre consumo o tecnología de los alimentos y la segunda, principalmente, en textos sobre ayuda alimentaria o producción de alimentos.

El cambio climático constituye una considerable y creciente amenaza para la seguridad en el abastecimiento de alimentos a nivel mundial. Los efectos provocados por el cambio climático podrían condicionar gravemente la capacidad del sector agrario para suministrar alimentos a los seres humanos más vulnerables, impidiendo o retrasando los objetivos de erradicar el hambre, la malnutrición y la pobreza. Para ello, es necesario actuar de manera urgente, preparando a las actividades agropecuarias y forestales para enfrentarse a unas condiciones ambientales que pueden cambiar rápidamente y, simultáneamente intentando reducir la contribución del propio sector agrario a las emisiones de gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento de nuestro planeta.

El cambio climático afecta a la disponibilidad de alimentos a través de sus efectos cada vez más adversos en el rendimiento de los cultivos, la producción y la sanidad animal (FAO, 2016a). Además, en la medida en que el suministro de alimentos se vea reducido por el cambio climático, los precios de los alimentos se elevarán. La población pobre, tanto rural como urbana, sería la que más afectada (Porter *et al.*, 2014). Una publicación del Banco Mundial estima que, en ausencia de crecimiento económico, un fuerte impacto del cambio climático aumentaría la cifra prevista de población extremadamente pobre para 2030 en 122 millones de personas; por el contrario, en un escenario de prosperidad, el incremento solo sería de 16 millones (Hallegatte *et al.*, 2016).

9.2.- EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR EL SECTOR AGRARIO

El sector agrario es uno de los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento de nuestro planeta y el consiguiente cambio climático. Por ello, es necesario realizar una adecuada gestión de cultivos, suelos y ganado que reduzca sus impactos negativos y permita incrementar la captura de carbono por suelos y vegetales. Las emisiones deberán reducirse drásticamente para que el aumento de la temperatura mundial no supere los 2 °C, en comparación con los niveles preindustriales.

El sector agrario no solo se ve afectado por el cambio climático, sino que también contribuye directa e indirectamente, de manera importante, a la emisión de los tres principales gases de efecto invernadero: CO₂, metano y óxido nitroso. Las emisiones anuales antropogénicas de gases de efecto invernadero, originadas, según la clasificación de los informes del IPCC, por “agricultura, ganadería,

silvicultura y otros usos de la tierra” (ASOUT)¹⁰⁶, se ha calculado que representan el 21 % del total mundial de emisiones (Figura 12). Aunque esta cifra es inferior a la del 27 % registrada en la década de 1990, la reducción aparente se debe a que las emisiones han aumentado a un ritmo más rápido en otros sectores (FAO, 2016a).

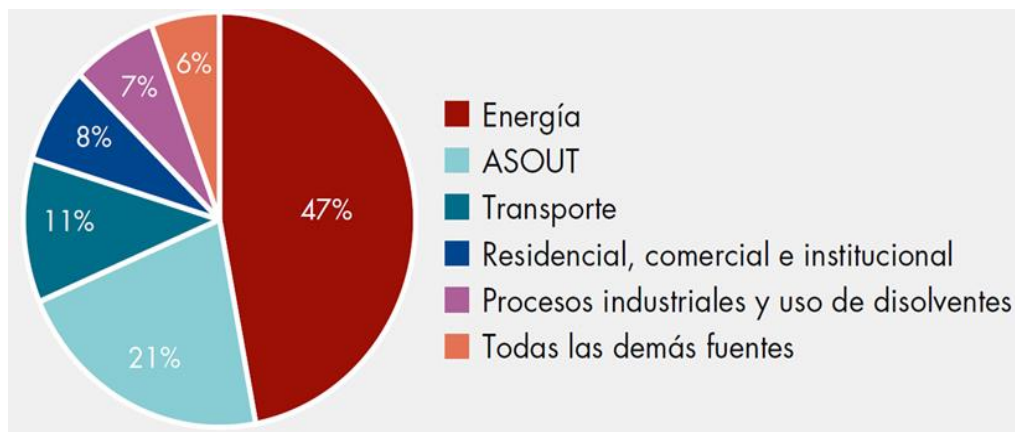


Figura 12.- Cuotas de emisiones de gases de efecto invernadero por sectores económicos, en el año 2010 (FAO, 2016a).

La práctica totalidad de las emisiones de CO₂ del sector ASOUT son atribuibles principalmente a la pérdida de materia orgánica por encima y por debajo del suelo, a través de los cambios en el uso de la tierra, tales como la conversión de los bosques en pastizales o tierras de cultivo, y la degradación de la tierra, como la ocasionada por el pastoreo. La producción agropecuaria emite importantes cantidades de metano y óxido nitroso, dos potentes gases de efecto invernadero. El metano lo generan, principalmente, los rumiantes durante el proceso digestivo y también proviene de residuos orgánicos, como estiércoles y purines. Las emisiones de óxido nitroso son un producto indirecto de los fertilizantes nitrogenados orgánicos y minerales tras ser aplicados a las tierras de cultivo. Por tanto, resulta fundamental la mejora de la gestión del nitrógeno y del carbono en el sector agrario para que así pueda contribuir a la mitigación del cambio climático (FAO, 2016a).

¹⁰⁶ En la abreviatura ASOUT, A sería Agropecuario, S sería Silvicultura y OUT sería Otros Usos de la Tierra. En definitiva, es el sector agrario (agrícola, ganadero y forestal) y otros usos de la tierra. Con frecuencia la A (de Agrícola, en inglés) se traduce como Agricultura, incluso por la propia FAO, pero sería mejor emplear la expresión Agropecuario o si se prefiere agrícola y ganadero.

Además, la contribución del sistema agroalimentario al total de las emisiones de gases de efecto invernadero es más elevada debido a que la producción de agroquímicos, así como el empleo de combustibles fósiles a lo largo de la cadena alimentaria (actividades agrarias, transporte, producción, distribución y venta de alimentos al consumidor), generan nuevas emisiones.

Según estimaciones de la FAO (2016a), en el año 2014, las emisiones procedentes de la agricultura, ganadería, actividad forestal y otros usos de la tierra (ASOUT) fueron de 10,6 Gt de CO₂ equivalente. El CO₂ y el metano suponen el 49 % y el 30 %, respectivamente, de las emisiones generadas por el sector ASOUT. Esto representa el 14 % de las emisiones antropogénicas totales de CO₂ y el 42 % de todas las emisiones de metano. La proporción de óxido nitroso en las emisiones totales procedentes de este sector es pequeña, pero representa hasta el 75 % de las emisiones antropogénicas mundiales de este gas.

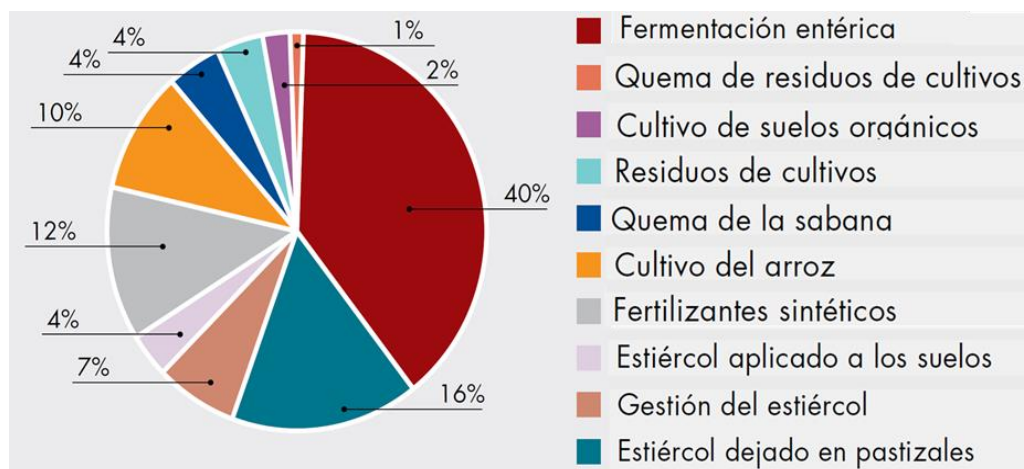


Figura 13. Emisiones agrarias a nivel mundial en CO₂ equivalente (año 2014) según el origen (en porcentaje) (FAO, 2016a).

En cuanto al origen del total mundial de emisiones de gases de efecto invernadero específicas de las actividades agropecuarias, destaca, en primer lugar, la fermentación entérica de los rumiantes (que asciende al 40 % en equivalente de CO₂), que es la principal fuente de las emisiones de metano (Figura 13), le sigue, por la magnitud de las emisiones, el estiércol que queda en los pastizales (16 %), el uso de fertilizantes sintéticos (12 %) y el cultivo de arroz (10 %). No obstante, la procedencia de mayor parte de las emisiones mundiales de gases de efecto

invernadero son los combustibles fósiles, fundamentalmente vinculados con la producción de energía, mientras que solo algo más del 20 % está relacionado con el sector agrario (ASOUT). En este sentido, sería posible reducir considerablemente las emisiones del sector energético, pudiendo llegar a eliminarlas, mediante una mejora de la eficiencia en el uso de la energía y una transición a fuentes energéticas renovables. Con este supuesto, las emisiones generadas por agricultura, ganadería y otros subsectores ASOUT supondrían un porcentaje cada vez mayor de las emisiones totales por tres razones:

- 1) el incremento de la producción de alimentos que provoca mayores emisiones;
- 2) la disminución de las emisiones del resto de sectores;
- 3) las dificultades para reducir las emisiones agropecuarias y forestales debido a la enorme diversidad de subsectores existentes y los complejos procesos físicos y biológicos que están implicados.

9.3.- MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN DEL SISTEMA AGROALIMENTARIO FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Como parece inevitable que el cambio climático va a provocar efectos importantes, es fundamental adoptar medidas prácticas para protegerse de los daños y perturbaciones probables. Para enfrentarse con los efectos del cambio climático se pueden tomar dos medidas: la mitigación y la adaptación, aunque ambas están interrelacionadas.

La mitigación hace referencia a las políticas, tecnologías y medidas que permitan, por un lado, limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y, por otro lado, mejorar los sumideros de dichos GEI para aumentar la capacidad de absorción de los mismos. En cuanto a la adaptación, se refiere a las iniciativas y medidas que reducen la vulnerabilidad de los sistemas naturales y antropogénicos frente a los efectos reales o esperados del cambio climático. La adaptación al cambio climático debe considerar no solamente cómo reducir la vulnerabilidad frente a los impactos negativos, sino también cómo beneficiarse de los efectos positivos.

Es importante recordar que en los sectores agrícola, ganadero y silvícola es imposible separar los objetivos de la seguridad en el abastecimiento de alimentos, adaptación y mitigación debido a que existen sinergias y compensaciones entre ellos. La experiencia creciente ha demostrado que la integración de tecnologías y

prácticas, adaptadas a las condiciones agroecológicas concretas de los productores, son necesarios para realizar la mitigación y la adaptación de una manera eficaz en función de los costes.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha prestado apoyo a sus miembros para compatibilizar el abastecimiento de alimentos conjuntamente con la adaptación al cambio climático y su mitigación. La FAO participa en el Programa mundial para una ganadería sostenible y también ha promovido una serie de medidas para reducir las emisiones de GEI procedentes de la actividad ganadera (en particular las emisiones de metano de origen entérico). La adaptación del sector agrario al cambio climático y la mitigación del mismo requieren la adopción de una serie de acciones coordinadas. Entre ellas, destaca el incremento de la eficiencia en el uso de los recursos y la disminución en el empleo de combustibles fósiles que ahorrarán costes a los productores agrarios, aumentando notablemente su productividad y reduciendo la dependencia de insumos externos. (FAO, 2016a).

En numerosas áreas de nuestro planeta, la producción agraria se ve afectada negativamente por un aumento y una mayor variabilidad de temperaturas y precipitaciones, incremento de fenómenos meteorológicos extremos, etc. Con la intensificación de los efectos del cambio climático sobre el sector agrario, será cada vez más difícil el cultivo de cosechas, la explotación de animales o la gestión forestal en las mismas zonas y de igual manera que en épocas anteriores. Así, las olas de calor, que previsiblemente se producirán con más frecuencia con el cambio climático, suponen una amenaza directa para el ganado. Con el tiempo, el estrés térmico incrementará la vulnerabilidad de los animales a las enfermedades, lo que terminara afectando negativamente a sus producciones. El cambio climático modificará también la prevalencia de numerosas enfermedades del ganado.

Las actividades agropecuarias y forestales poseen un gran potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, pero la necesidad futura de asegurar el suministro de alimentos a una creciente población mundial¹⁰⁷, impide aprovechar buena parte del citado potencial por lo que, en gran medida, dependeremos de la reducción de emisiones lograda en otros sectores económicos. No obstante, el sector agrario tiene un potencial único para actuar como sumidero de carbono, que

¹⁰⁷ Está previsto que las emisiones procedentes de la agricultura y la ganadería se incrementen junto con la demanda de alimentos por el crecimiento demográfico y por el aumento de los ingresos, con los cambios consiguientes en el régimen alimenticio en el sentido de un mayor consumo.

capturan el CO₂ y secuestran el carbono en la biomasa y los suelos, especialmente por medio de la silvicultura y la restauración de tierras. Además, se necesitarán también cambios por parte de los consumidores, ya que un menor despilfarro de productos alimenticios o una reducción en la demanda de determinados alimentos puede disminuir notablemente las emisiones de GEI y otros impactos ambientales, contribuyendo a conseguir un sistema agroalimentario sostenible a la vez que se fomenta la mitigación del cambio climático.

De forma simultánea, el sector agrario y las poblaciones que dependen de él deberán adaptarse a los cambios climáticos, actuales o futuros, de tal manera que puedan minimizar sus efectos negativos o incluso aprovechar las oportunidades que pudieran surgir. No obstante, la adaptación al cambio climático no es suficiente por sí sola, ya que es esencial recurrir a la mitigación para poder garantizar a largo plazo el abastecimiento de alimentos a toda la población mundial. En este sentido, existe una diferencia fundamental entre adaptación y mitigación, así como de los incentivos necesarios para la promoción de ambas. La adaptación es algo que todo el mundo necesitara realizar por propio interés. Sin embargo, la mitigación es algo voluntario que tenemos que hacer conjuntamente para el beneficio de todo el mundo. Se trata de un bien público global a la vez que una responsabilidad social a la que los sectores agrarios también pueden y deben contribuir. Hoy en día, se reconoce de manera generalizada la importancia que tiene la respuesta del sistema agroalimentario al cambio climático.

Las respuestas al cambio climático que se vayan a aplicar en los diferentes países deberán contemplarse en un contexto más amplio que comprenda el desarrollo agrario sostenible, en las dimensiones económica, social, y ambiental. En este sentido, la FAO. (2010) ha elaborado el planteamiento de un sector agrario climáticamente inteligente, que tiene tres objetivos:

- a) aumento sostenible de la productividad agraria para favorecer incrementos equitativos en ingresos, seguridad en el suministro de alimentos y desarrollo;
- b) aumento de la capacidad de adaptación y resiliencia a las crisis en diferentes niveles, desde la granja hasta el plano nacional;
- c) reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero e incremento de la captura de carbono en la medida de lo posible.

Para iniciar el camino de un sector agrario climáticamente inteligente y sostenible es necesario emplear las tecnologías y prácticas a las que los países han dado

prioridad en sus políticas y planificación agropecuaria y forestal. Para evaluar el potencial de estas tecnologías y prácticas con respecto a la seguridad alimentaria y la adaptación climática en condiciones de cambio climático específicas de un determinado lugar hay que realizar los ajustes que sean necesarios. Algunos ejemplos de estos ajustes incluyen: la modificación de las épocas de siembra y la adopción de variedades resistentes al calor y a la sequía; la modificación de la variedad de cultivos y ganado; la mejora de las prácticas de gestión del suelo y del agua, incluyendo la agricultura de conservación. (Asfaw *et al.*, 2014).

En relación con lo anterior, la agroecología aplica conceptos y principios ecológicos a los sistemas agrarios (HLPE, 2016). Por medio de las interacciones entre plantas, animales, seres humanos y medio ambiente, favorece el desarrollo agrario sostenible, garantizando el suministro de alimentos a la población. La agroecología busca algo más que la eficiencia en el empleo de los factores productivos ya que pretende aprovechar los procesos ecológicos básicos, como la depredación natural de plagas o el reciclaje de biomasa para optimizar el ciclo de los elementos nutritivos. Además, aumenta las interacciones y sinergias biológicas entre componentes de la biodiversidad agraria, fomentando los principales procesos y servicios ecológicos y la optimización en el uso de los recursos. En cualquier caso, los principios de la agroecología, son de particular importancia para enfrentarse al cambio climático.

9.3.1.- Repercusiones del cambio climático sobre la ganadería

La producción ganadera, particularmente las explotaciones extensivas en pastoreo, se ve perjudicada por el cambio climático de muchas maneras, tanto directas como indirectas. Las repercusiones más importantes influyen sobre aspectos productivos y sanitarios, pero también sobre cuestiones relacionadas con la biodiversidad de los animales, la calidad y cantidad en el suministro de piensos o la carga ganadera de los pastizales. En este sentido, la creciente variabilidad de las lluvias en muchas zonas origina problemas en la disponibilidad de agua potable y un aumento en la incidencia de las plagas y enfermedades del ganado, así como cambios en su distribución geográfica y en los mecanismos de transmisión. También afecta a las especies vegetales que componen los pastos, sus rendimientos y la calidad del forraje.

En cuanto al incremento de las temperaturas provoca estrés térmico en los animales que trae como consecuencia una serie de repercusiones negativas: reducción del consumo de piensos y de la productividad, disminución de las tasas de reproducción e incremento de la mortalidad. El estrés térmico reduce también la resistencia de los animales a patógenos, parásitos y vectores (Niang *et al.*, 2014). Múltiples factores estresantes afectan considerablemente a aspectos productivos, reproductivos e inmunitarios de los animales. En cualquier caso, los efectos del aumento de las temperaturas pueden controlarse en las explotaciones intensivas de vacuno, porcino regulando las condiciones ambientales (Thornton *et al.*, 2009), siempre que dispongan de la posibilidad de estabular a los animales y cuenten con fuentes energéticas apropiadas.

Diversos trabajos recogen las repercusiones del cambio climático sobre la sanidad animal, especialmente en lo que se refiere a enfermedades transmitidas por vectores, en cuyo caso las crecientes temperaturas favorecen la supervivencia invernal de vectores y patógenos. Así, en Europa es probable que el calentamiento global incremente el riesgo de contraer enfermedades transmitidas por garrapatas, en los meses de otoño e invierno (Gray *et al.*, 2009). Por otro lado, los brotes de fiebre del Valle del Rift en el África oriental se relacionan con el aumento de lluvias e inundaciones como consecuencia del fenómeno de El Niño (Rosenthal, 2009; Porter *et al.*, 2014).

Por otro lado, la FAO ha apoyado la incorporación de la diversidad genética en numerosos proyectos de adaptación al cambio climático. En este sentido, la diversidad genética, conservada de forma adecuada y auxiliada con programas de mejora, permite ofrecer razas ganaderas con buenas producciones a la vez que adaptadas a un ambiente desfavorable, facilitando la construcción de sistemas agropecuarios sostenibles y resilientes frente a las variaciones del clima. No obstante, hay que continuar realizando esfuerzos para conservar y apoyar el uso sostenible de las variedades vegetales y las razas de ganado, así como para recolectar y conservar las variedades silvestres de cultivos alimentarios importantes. El mantenimiento de la diversidad genética en las granjas permite lograr una evolución paralela a los cambios ambientales, mientras que los bancos de genes regionales y mundiales ofrecen colecciones de reserva de material genético a las que se puede acudir para apoyar las medidas de adaptación al cambio climático (FAO, 2016a).

9.3.2.- Ganadería de precisión y cambio climático

El cambio climático va a requerir la adopción de importantes innovaciones en los sistemas productivos de las explotaciones agropecuarias. La innovación¹⁰⁸ surge cuando se establecen, tanto a nivel individual como colectivo, nuevas ideas, tecnologías o procesos que, cuando tienen éxito, se transmiten al resto de productores. En este sentido, queremos dedicar un apartado a la denominada ganadería de precisión¹⁰⁹. Entendemos que se trata de un concepto transversal que se puede instaurar en cualquier sistema ganadero, aunque en la actualidad está vinculado fundamentalmente a las explotaciones intensivas.

En cualquier caso, como señalan Wollenberg *et al.*, 2016, la intensificación agraria sostenible, gracias a una gestión más adecuada de los ciclos del carbono y el nitrógeno, promueve una mayor resiliencia y adaptación frente al cambio climático al mismo tiempo que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

A pesar de que a nivel mundial las estrategias de intensificación sostenible varían según sistemas productivos y regiones, pensamos que la mayoría de las explotaciones intensivas de los países desarrollados podrían encajar en dicho modelo, ya que uno de sus objetivos fundamentales es incrementar la eficiencia en el uso de los recursos disponibles.

Podemos definir la ganadería de precisión como una metodología de manejo y gestión que utiliza sensores y tecnologías de la información para monitorear y optimizar la contribución de cada animal a la producción, la salud, el impacto ambiental, el gasto energético y el bienestar en tiempo real, de forma automática y continua, 24 horas diarias durante los 7 días de la semana (Berckmans & Guarino, 2017). Esta monitorización y control implica la medición de indicadores biométricos (fisiológicos y morfológicos), de comportamiento, de consumos o de producción con el objeto de mejorar las estrategias de manejo y de gestión de la explotación.

¹⁰⁸ Con frecuencia, la innovación se basa en conocimientos y sistemas tradicionales locales, que se adaptan en combinación con nuevas fuentes de conocimientos procedentes de sistemas formales de investigación (FAO, 2014a).

¹⁰⁹ En inglés, Precision Livestock Farming (PLF). La ganadería de precisión es una ciencia multidisciplinar que requiere la colaboración entre: científicos, veterinarios, etólogos, fisiólogos, ingenieros, y expertos en Tecnologías de la Información y la Comunicación (Berckmans, 2017)

La Ganadería de precisión está especialmente desarrollada en vacuno de leche (Norton & Berckmans, 2017), avicultura (Xin & Liu, 2017) y porcino (Vranken & Berckmans, 2017).

Con la ganadería de precisión, las observaciones del ganadero pueden ser sustituidas por cámaras, micrófonos y sensores de diversos parámetros (temperatura, humedad, concentración de gases, etc.) con la gran ventaja de la apreciación exacta, constante y total. El tratamiento informático de estas imágenes, sonidos y mediciones puede determinar la distribución y actividad de los animales, así como su nivel de bienestar y estado sanitario. La particularidad de estas tecnologías es que son desarrolladas e implementadas para proporcionar datos e información en tiempo real, por lo que la toma de decisiones derivada de esta información puede ser muy rápida, pudiendo evitar la aparición o el agravamiento de problemas.

Desde un punto de vista económico y tecnológico, el principal propósito de la ganadería de precisión sería incrementar la rentabilidad, la eficiencia y la sostenibilidad de las granjas a través de la optimización de la adquisición de datos in situ (en la granja) y de su procesado, análisis e interpretación, con el fin de optimizar la producción, la nutrición y el ambiente de los animales zootécnicos.

Frente al cambio climático, el escenario actual y futuro obliga a tener explotaciones ganaderas competitivas y sostenibles, para lo cual, entre otras cosas, es preciso contar con la máxima capacidad de control de:

1. La energía, tanto por ser un componente que tiene cada vez más peso en los costes de producción, como por sus implicaciones ambientales, por lo que es necesario realizar auditorías energéticas periódicas y un control del consumo, intentando emplear energías renovables¹¹⁰.
2. La producción, con mediciones cada vez más exactas del consumo de alimento y agua, así como del peso, el crecimiento diario o la producción (leche, huevos, etc.) para poder obtener diferentes índices zootécnicos.

¹¹⁰ Una granja holandesa produce el primer huevo sin emisión de CO₂ del mundo. Se trata de una explotación de gallinas ponedoras de raza Leghorn, empleado piensos elaborados con subproductos de la industria alimentaria no aptos para consumo humano y usando exclusivamente energías renovables (paneles solares). Con todo ello se consigue la reducción de las emisiones de CO₂ de sus huevos en un 90%. El 10% restante que pueden eliminar lo compensan con inversiones en proyectos de energía solar y reforestación. <http://www.kipster.farm/> (consultado 7-11-2017)

3. Del bienestar animal, tanto en lo que se refiere al ambiente de la granja (temperatura, humedad, iluminación, gases -NH₃, CO₂ y otros-, velocidad del aire, etc.), como en el sanitario (bioseguridad, vacunaciones, desparasitaciones, etc.) y el de comportamiento (etograma, densidad, movimientos, etc.).

Con todo ello, conseguimos: una mejora de la eficiencia productiva, una disminución de los costes de producción, una mayor calidad de los productos obtenidos, minimizar los impactos ambientales negativos (incluyendo las emisiones de GEI), así como mejorar la salud y el bienestar de los animales.

Actualmente, la tecnología permite controlar en tiempo real los citados parámetros lo que facilita reaccionar con rapidez ante diversos problemas (disminución brusca del consumo de agua o aumento rápido de la temperatura) y hacerlo a distancia, sin necesidad de estar presente en la granja. Por ello, con frecuencia, los lugares donde se genera la información y donde se analiza la misma son distintos. Los continuos avances de las tecnologías de comunicación a través de las redes inalámbricas empleadas por los teléfonos móviles y de internet, cada vez más potentes, baratas y con mayor cobertura¹¹¹, ofrecen grandes posibilidades a las tecnologías de precisión aplicables en ganadería.

La información generada está disponible en internet, donde queda almacenada o puede presentarse de forma sencilla y visual, haciéndola llegar a quien corresponde prácticamente en el mismo momento en el que las cosas están sucediendo. De cara a facilitar el uso de sistemas de precisión en las granjas será importante desarrollar sistemas completamente integrados y proporcionar todos los componentes del sistema al usuario final. La necesidad de intervención humana en la adquisición y transferencia de datos al sistema debe reducirse al mínimo. El papel principal de la ganadería de precisión será simplificar el proceso de adquisición, procesado y análisis de los datos a fin de que puedan ser presentados al ganadero como una solución y no como un problema añadido, facilitando la toma de decisiones.

En las explotaciones ganaderas, es necesario adoptar sistemas productivos “inteligentes”, similares a los empleados por otros sectores desde hace tiempo, para conocer en tiempo real lo que está ocurriendo en la granja, tanto en lo que se refiere a parámetros productivos como ambientales y, lo que es más importante,

¹¹¹ El paso del 4G al 5G, previsto para 2020, promete un importante avance en la velocidad de transferencia de datos, que se va a apreciar sobre todo la velocidad de descarga (el 5G será de la orden de 200 veces más rápido que las conexiones 4G).

empleando toda la información para mejorar la eficiencia y mantener la competitividad y sostenibilidad de las granjas.

9.3.3.- Reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la producción agropecuaria

Las actividades agropecuarias pueden contribuir a la mitigación del cambio climático si logran desvincular el aumento de sus producciones respecto al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, reduciendo su intensidad, es decir, disminuyendo la cantidad de GEI generados por unidad producida (por ejemplo, GEI por kg de carne). Además, estas mejoras pueden complementarse con una serie de medidas destinadas a reducir las pérdidas y el desperdicio de alimentos, fomentando un cambio en las pautas de consumo alimenticio de la población (FAO, 2016a).

Por ello, existe la posibilidad de disminuir notablemente la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero provocados por el sector ganadero. Sin embargo, es complicado calcular con precisión el potencial de mitigación, ya que la intensidad de las emisiones es muy variable, incluso dentro de sistemas de producción similares, debido a las diferencias en las condiciones ambientales y agroecológicas, las prácticas agropecuarias, así como a la gestión a lo largo de la cadenas de suministro de alimentos. Gerber *et al.* (2013a) señalan que las emisiones generadas por la producción ganadera podrían reducirse entre un 18 % y un 30 % si, en cada sistema, se adoptaran las prácticas seguidas por el 25 % de productores que generan una menor intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero. Mottet *et al.* (2017) estiman que la aplicación de prácticas sostenibles reduciría entre un 14 % y un 41 % las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la ganadería.

En cualquier caso, mejorar la eficiencia de los ciclos del carbono y el nitrógeno en las actividades agropecuarias, forestales y de otros usos de la tierra, puede reforzar la resiliencia a la variabilidad del clima, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la captación de carbono, mejorando al mismo tiempo la seguridad alimentaria al aumentar la producción de alimentos. Dado que las medidas de mitigación y adaptación contribuyen tanto a la seguridad en el suministro de alimentos como a la sostenibilidad ambiental, pueden aplicarse conjuntamente y al mismo tiempo ofreciendo más posibilidades de establecer fuertes sinergias entre ellas.

Para poder alcanzar los anteriores objetivos lo más importante es intensificar la explotación con criterios de sostenibilidad (“intensificación sostenible”) , de tal manera que se incremente la producción de alimentos por unidad de input, mediante el empleo de procedimientos que reducen la presión que se ejerce sobre el medio ambiente, así como sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de poder satisfacer sus propias necesidades (Garnett *et al.*, 2013; Smith, 2013).

La intensificación sostenible de las actividades agrarias incrementa su eficiencia biológica, especialmente en países en desarrollo, reduciendo las diferencias de productividad con los sistemas más intensivos. Con ello, puede hacer innecesaria la deforestación y la expansión de las actividades hacia ecosistemas ricos en carbono, con lo que se mejora la seguridad alimentaria a la vez que se contribuye a la mitigación del cambio climático. Así, en el sector ganadero, la mejora de la productividad de los pastizales puede limitar la expansión de los mismos hacia bosques tropicales, favoreciendo la conservación y el desarrollo sostenible de territorios ricos en carbono (Oliveira-Silva *et al.*, 2016).

En los siguientes apartados analizaremos una serie de objetivos adicionales que deberían ser considerados en la implementación de políticas destinadas a promover los beneficios conjuntos de la adaptación y la mitigación en el sector agrario: en primer lugar, la mejora de la eficiencia en la producción agropecuaria y forestal y, posteriormente, la reducción de las emisiones de los principales gases de efecto invernadero en ganadería (metano y óxido nitroso).

9.3.3.1.- Mejora de la eficiencia en la producción agropecuaria

Los sistemas de producción más eficientes requieren menos recursos naturales y, por tanto, son menos vulnerables ante la escasez y ante fenómenos climáticos que pueden reducir aún más la disponibilidad de tierras, aguas y nutrientes (FAO, 2016a).

La intensificación de los sistemas agropecuarios que comenzó en la década de los sesenta del siglo XX, ha limitado la expansión de las tierras destinadas a actividades agrarias y mejorado notablemente la eficiencia de las cadenas de suministro de alimentos (Herrero *et al.*, 2013). Gracias al incremento de los rendimientos, se estima que entre 1961 y 2005 la intensificación del sector agrario evitó la emisión de gases de efecto invernadero por un total de unas 161 GtC¹¹².

¹¹² Lo que equivale a más de 15 años de la producción anual del sector ASOUT (sector agrario más otros usos de la tierra).

Las inversiones en la productividad, por tanto, se comparan favorablemente con otras estrategias de mitigación que suelen proponerse porque limitan la expansión de las tierras agrícolas y las grandes pérdidas de carbono asociadas a la deforestación (Burney *et al.*, 2010).

Por otro lado, con la mejora de la eficiencia en los sectores agrícola, ganadero y forestal durante los últimos decenios, se ha reducido considerablemente la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero de muchos productos agroalimentarios. Así, entre los años 1960 y 2000, la intensidad media a nivel mundial disminuyó, aproximadamente, un 38 % para la leche, un 45 % para la carne de cerdo, un 76 % para la carne de pollo y un 57 % para los huevos (Smith *et al.*, 2014). La mayor parte de la reducción de la intensidad de las emisiones procedentes de los rumiantes se ha debido a las menores emisiones de metano por kilogramo de leche y carne producida (Opio *et al.*, 2013).

La mejora de la eficiencia en la transformación¹¹³ de alimentos, así como en la cría y selección de animales (razas, estirpes o híbridos) han sido fundamentales tanto en el caso de los rumiantes como en el de los animales monogástricos. Dichas mejoras han permitido reducir el número de animales necesarios para lograr un determinado nivel productivo al aumentar considerablemente la eficiencia. No obstante, existen grandes diferencias en la eficiencia del uso de los recursos y, con ello, en la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero en función del sistema ganadero empleado (Herrero *et al.*, 2013).

El mantenimiento de las estrategias de mejora de la eficiencia de las explotaciones agropecuarias a largo plazo permitiría conservar e incluso recuperar suelos, agua, biodiversidad y algunos servicios fundamentales de los ecosistemas como la polinización (Garibaldi, 2016). La diversificación de los sistemas agropecuarios y la integración de cultivos, ganado y arbolado aumentaría la eficiencia en las

¹¹³ En zootecnia, el índice de transformación alimenticia (IT), expresa la eficiencia de asimilación del alimento, es una medida para cuantificar cómo de eficiente es un animal en transformar la masa alimenticia que consume en aumento de peso. Este índice se calcula dividiendo la materia consumida por el animal (generalmente Kg de pienso) entre el aumento de masa corporal (gramos de incremento de peso vivo) que experimenta el animal durante un periodo dado de tiempo. El índice es adimensional. Los valores en Broilers (año 2010) IT= 1,8 kg a los 42 días (p. v. 2 ,5 kg); en Cerdo (año 2010) IC= 2,55.

<http://www.hypor.com/~media/Files/Hypor/Global%20Convention/14.-Gerard-Albers.-Eficiencia-en-la-Producci%C3%B3n-Animal.pdf>

explotaciones agrarias, reduciendo la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero (Soussana *et al*, 2015).

En el caso de los sistemas ganaderos extensivos, aunque la productividad es baja cuando se expresa como producción por animal o por unidad de mano de obra, es elevada en términos de producción a partir de recursos escasos (como, agua y cereales). En dichos sistemas, la producción animal puede incrementar el balance en el abastecimiento de proteínas ya que usa recursos forrajeros que no pueden ser usados en ninguna otra forma de producción de alimentos. Además, emplean generalmente recursos con limitadas posibilidades para un aprovechamiento rentable ubicadas en zonas remotas o difícilmente accesibles. En cualquier caso, la dependencia de la actividad ganadera supone un riesgo, ya que se realiza sobre ecosistemas frágiles y complejos con pocas posibilidades de diversificación.

Sin embargo, cuando el ganado se cría en sistemas intensivos, convierte carbohidratos y proteínas que podrían ser consumidas directamente por los seres humanos en cantidades menores de carbohidratos y proteínas. En estos casos el ganado reduce el balance alimentario. En un mundo donde crece la preocupación por la producción sostenible de alimentos, lo ideal sería que la contribución del ganado al balance alimentario fuera al menos neutra. La conversión de los recursos naturales en alimentos para el consumo humano debería ser lo más eficiente posible. Esta no es la situación a escala mundial e incluso es posible que este equilibrio no llegue a alcanzarse: se calcula que anualmente se consumen 77 millones de toneladas de proteínas vegetales para producir 58 millones de toneladas de proteínas animales (Steinfeld *et al.*, 2006). No obstante, una mayor utilización de subproductos agroindustriales en la dieta de los animales podría reducir la cantidad de alimentos aptos para el consumo humano que se destinan a la alimentación del ganado en las explotaciones intensivas. En este sentido, la producción animal intensiva en las economías emergentes utiliza con un buen nivel de eficiencia los subproductos agroindustriales, aunque existen importantes restricciones sobre el uso de subproductos de la industria pecuaria.

En cualquier caso, en el futuro, serán los sistemas intensivos los responsables de cubrir gran parte de la demanda de productos pecuarios, ya que son los más eficientes en el empleo de los recursos productivos, alcanzando elevado rendimientos por animal superficie y tiempo, aunque también pueden ocasionar importantes impactos sobre el medio ambiente. Por ello, es necesario reducir la contaminación de aguas, suelo y atmosfera, especialmente la producción de GEI, así como optimizar el consumo de agua y piensos necesarios para producir una

unidad de proteína animal. Estos sistemas alimentarios son competitivos económicamente, especialmente cuando forman parte de grandes integraciones.

Ahora bien, si las organizaciones animalistas y ecologistas aumentan su influencia, imponiendo nuevos condicionantes a la producción animal, especialmente a los sistemas más intensivos, se producirá un incremento de los costes de producción a corto plazo, aunque podría mejorar a largo plazo la sostenibilidad de estos sistemas de explotación. Sin embargo, no existen alternativas viables a los sistemas intensivos para el suministro de alimentos a centenares de millones de personas de los grandes núcleos urbanos.

9.3.3.2.- Reducción de las emisiones de metano en la producción pecuaria

La fermentación entérica es una de las principales fuentes de metano de la actividad ganadera, especialmente la producción de rumiantes. No obstante, la gestión de las deyecciones ganaderas sólidas (estiércoles) y líquidas (purines) genera también emisiones tanto de metano como de óxido nitroso. El origen de estos gases se encuentra en la descomposición de la materia orgánica que se produce a lo largo de todas las fases de la gestión de las deyecciones ganaderas. Así, las emisiones de óxido nitroso son mucho mayores en sistemas de almacenamiento de deyecciones sólidas en forma de estiércol seco y bajo condiciones de aireación, sin embargo las mayores producciones de metano se producen bajo condiciones de anaerobiosis y con purines líquidos o semilíquidos (Monteny *et al.*, 2001).

Numerosos trabajos han analizado el potencial de reducción de las emisiones de metano en las explotaciones ganaderas, tanto el producido por los animales durante el proceso digestivo (fermentación entérica), como el que se genera en el almacenamiento de estiércoles y purines. En el caso de la fermentación entérica, casi todos los estudios disponibles hacen referencia a las modificaciones en el régimen alimenticio de los animales y a la adición de suplementos en los piensos (Gerber *et al.*, 2013a). La mayor parte de las reducciones de metano que sirven para mitigar el cambio climático se consiguen con las mejoras en la digestibilidad total de la ración alimenticia y en el equilibrio de sus nutrientes (Gerber *et al.*, 2011; Garg *et al.* 2013).

Por otro lado, algunos metabolitos secundarios de las plantas, como los taninos, se encuentran también en los alimentos de los rumiantes en pastoreo, especialmente en zonas mediterráneas y tropicales (INRA, CIRAD y FAO, 2016), presentando posibilidades para reducir sus emisiones de metano. Además, existen numerosos

estudios con diversas estrategias de mitigación que incluyen el uso de inhibidores químicos, ionoforos, antibióticos, sumideros de hidrógeno, aceites esenciales, enzimas probióticos, defaunación¹¹⁴ y vacunación antimetanogénica (Hristov *et al.*, 2013). No obstante, algunas de las opciones descritas no están permitidas en determinados países y otras tienen restricciones o no están disponibles en el mercado. Debido a que las mejoras productivas conseguidas por la reducción de las emisiones de metano son escasas o nulas, es conveniente contar con incentivos que faciliten el empleo de aditivos costosos que reduzcan dichas emisiones.

En cuanto a la disminución de las emisiones de metano de estiércoles/purines almacenados en las explotaciones obliga a realizar prácticas de manejo que eviten almacenarlos en condiciones anaerobias y/o cálidas. En este sentido, los sistemas de almacenamiento que manejan el estiércol sólido presentan menores emisiones de metano que los sistemas que gestionan purines (estiércol líquido), especialmente cuando los animales están estabulados de forma permanente. En estos casos, para reducir así las emisiones de metano, se recomienda la evacuación frecuente de los purines del interior de las instalaciones (Sommer *et al.*, 2009).

Por otro lado, es posible reciclar los residuos del ganado mediante digestores anaeróbicos en gran escala que transforman los residuos en biogás o grandes plantas de compostaje que convierten los residuos sólidos en compost que puede utilizarse como fertilizante agrícola. En cuanto a la digestión anaerobia de estiércoles y purines (biogás), permite reducir las emisiones ya que el metano que se genera en el proceso puede ser utilizado en la explotación como fuente de calor (calefacción) y también como combustible. No obstante, las pérdidas de metano que se producen en los digestores y durante el almacenamiento, plantean dudas sobre el efecto mitigador de esta tecnología. En cualquier caso, las diferentes opciones para reducir las emisiones de metano deben de considerar la totalidad del sistema productivo, con el fin de evitar fugas de un compartimento a otro, así como un incremento de las emisiones de óxido nitroso (FAO, 2016a).

En algunos países europeos, pero sobre todo en China se ha concedido particular atención a la producción de biogás. Así, en Shanghai, desde hace más de una década, existen incentivos para que la actividad agropecuaria desempeñe funciones adicionales a la producción de alimentos. Una de las más importantes es la

¹¹⁴ La defaunación es una de las muchas formas de manipulación de la fermentación del rumen para mejorar la eficiencia y productividad de los rumiantes, consistente en la eliminación de los protozoos ciliados que disminuye las emisiones de metano.

producción de biogás (Kangmin & Ho, 2006; Gan & Juan, 2008). En el marco del Plan Nacional de China para el biogás, se gestionaron cerca de cinco mil proyectos de biogás de gran capacidad en explotaciones ganaderas en 2010, para poder alcanzar los 50 millones de hogares rurales que emplean el biogás, lo que supone más de un tercio del total (Junfeng, 2007).

9.3.3.3.- Reducción de las emisiones de óxido nitroso en la producción agropecuaria

Cerca del 50% de la producción mundial de alimentos depende del empleo de fertilizantes nitrogenados, mientras que el 50% restante depende del nitrógeno que se encuentra en el suelo, en estiércoles y purines, tejidos de plantas fijadoras de nitrógeno, residuos y desechos de cosechas y compost (Erisman *et al.*, 2008). El nitrógeno que procede de las actividades agrarias se puede perder fácilmente en el medio ambiente debido a procesos de volatilización y lixiviación, originando daños ambientales equivalentes a los beneficios económicos que genera el empleo de fertilizantes nitrogenados en la producción de alimentos (Sutton *et al.*, 2011).

Las emisiones de óxido nitroso procedentes del empleo de fertilizantes tienen efectos negativos directos ya que es el tercer GEI más importante y la causa principal de la disminución de la capa de ozono de la estratosfera. Simultáneamente, y debido al papel clave que el nitrógeno desempeña en la fotosíntesis y en la producción de biomasa, influye positivamente sobre el sumidero de CO₂ de la biosfera y la captación de carbono (FAO, 2016a)

El propósito de la gestión sostenible del nitrógeno en el sector agrario es la consecución de una serie de objetivos, como la elevada productividad de cultivos y animales o la reducción al mínimo de las pérdidas de nitrógeno. Debido a la fácil lixiviación del nitrógeno sugestión presenta numerosas dificultades. Estas pueden verse agravadas por las condiciones del cambio climático y de adaptación al mismo ya que existen numerosas interacciones entre el ciclo del nitrógeno y los ciclos del carbono y del agua. En este sentido, la utilización y pérdidas de nitrógeno de la actividad agraria están fuertemente influidas por la disponibilidad de agua y carbono.

El potencial de reducción de las emisiones de óxido de óxido nitroso en el sistema alimentario mundial para las próximas décadas puede basarse en el empleo de una serie de prácticas entre las que se incluyen las mejoras en la producción animal y vegetal, la gestión del estiércol así como una mejor utilización de los alimentos y la disminución en nuestra dieta de la cantidad de proteínas de origen animal.

Existen estimaciones sobre el potencial de reducción que están basadas tanto en el aumento de la eficacia en el uso de nitrógeno como la reducción en la intensidad de las emisiones del óxido nitroso (Oenema *et al.*, 2014).

Según estimaciones de la FAO, sin estrategias para la reducción de emisiones de óxido nitrógeno se produciría incrementos superiores al 60% y al 80%, en los años 2030 y 2050, respectivamente; con estrategias de reducción, se podría conseguir una disminución cercana al 20% en 2050. No obstante, aunque las estrategias parecen ser técnicamente viables, existen muchos obstáculos que pueden plantearse durante su aplicación. En este sentido, sería necesario realizar grandes inversiones en educación, capacitación, demostración y desarrollo de tecnologías específicas para lograr las reducciones previstas (FAO, 2016a).

9.3.4- Captura de carbono, sector agrario y suelos

Debido a que agricultura, ganadería y silvicultura ocupan la mayor parte de la superficie terrestre del planeta, desempeñan un papel fundamental en la conservación y la restauración del carbono del suelo y en la mejora de los sumideros de carbono. El manejo de sistemas agroforestales y agroilvopastorales, la regeneración de los bosques, las plantaciones, la agricultura de conservación, la agricultura orgánica y los pastizales pueden contribuir a la consecución de dichos objetivos. Sin embargo, actualmente, la deforestación es una fuente importante de emisiones, y una serie de prácticas agrarias insostenibles siguen agotando las existencias de carbono orgánico del suelo.

Convertir las posibilidades teóricas del sector agrario en un sumidero real depende de las condiciones biofísicas y de las técnicas disponibles, así como de instituciones y políticas adecuadas. Las emisiones procedentes de la actividad agraria y de los sumideros, forman parte de los ciclos globales del carbono y del nitrógeno. Para poder optimizar el potencial de mitigación de los sectores agropecuarios y forestales hay que comprender estos ciclos y la forma en que las actividades agrarias interactúan con los mismos. Además, algunas de las alternativas para incrementar la mitigación acarrearán también una serie de beneficios vinculados con la adaptación.

Se estima que cada año los bosques absorben 2,6 millones de toneladas de CO₂ (CIFOR, 2010), que suponen aproximadamente un tercio del dióxido de carbono liberado a la atmósfera por el consumo de combustibles fósiles. No obstante, este gigantesco sistema de almacenamiento de carbono, cuando se ve afectado por la

deforestación, termina transformándose en una fuente importante de emisiones de GEI. En este sentido, el Quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, señala que la deforestación y la degradación forestal suponen cerca del 11 % del total de emisiones de gases de efecto invernadero, más que todo el sector del transporte a nivel mundial. Además, a medida que se destruye superficie forestal, disminuye la capacidad de esta para capturar carbono (IPCC, 2014).

En la primera década del presente siglo, la FAO calcula que las emisiones totales originadas por la deforestación fueron de 3,8 Gt de CO₂ equivalente al año, mientras que el resultado neto de la degradación de los bosques y la ordenación forestal supuso la absorción de 1,8 Gt de CO₂ equivalente. También hay que considerar los incendios de la biomasa (incluidos los incendios de turberas y turberas drenadas), que generaron emisiones de 1,2 Gt de CO₂ equivalente al año, respectivamente (FAO, 2016a).

En el sector forestal, las medidas de mitigación del cambio climático están encaminadas tanto a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como a incrementar la captura de dichos gases de la atmósfera. Estas medidas pueden dividirse en cuatro categorías:

- a) Evitar o reducir la deforestación. La conservación de la superficie forestal proporciona grandes beneficios socioeconómicos y ambientales (FAO, 2012). Además, contribuye a preservar la biodiversidad así como las funciones de los ecosistemas y, cuando abarca grandes extensiones de tierra, puede influir sobre los patrones climáticos locales.
- b) Incrementar la superficie forestal. La superficie forestal puede incrementarse mediante plantación, siembra o regeneración natural asistida y, también por medio de la sucesión natural de la vegetación. La forestación aumenta las reservas de carbono almacenadas en la biomasa por encima y por debajo del suelo, así como en la materia orgánica inerte. Existe una cierta preocupación de que la forestación y la reforestación disminuyan la seguridad en el abastecimiento de alimentos, si se llevan a cabo principalmente en tierras agrícolas productivas, y, también, que las plantaciones de monocultivos reduzcan la biodiversidad y provoquen un mayor riesgo de contraer enfermedades (FAO, 2011b).

c) Aumentar o conservar la densidad de carbono, gracias a la disminución de actividades que generan elevadas emisiones tales como los cultivos de corta y quema (Putz & Romero, 2015).

d) Incrementar en otras zonas las existencias de carbono de los productos madereros recogidos. Cuando la madera se transforma en productos de larga duración (como, construcciones y muebles), pueden actuar como reservorio de carbono durante décadas o incluso siglos.

Los principales problemas de las actividades de mitigación relacionadas con los bosques es la necesidad de realizar elevadas inversiones antes de poder conseguir beneficios que suelen tardar en llegar muchos años, en ocasiones décadas. Por ello, El elevado potencial de mitigación de la actividad forestal no puede concretarse sin una adecuada financiación y sin un marco legislativo que proporcione incentivos eficaces.

Diversas prácticas agrarias empleadas en la actualidad contribuyen a las pérdidas del carbono orgánico edáfico y a la reducción de su absorción en el suelo. Por medio de la reducción de los incendios, el sobrepastoreo, de la erosión del suelo o del reciclaje de residuos agrícolas y estiércoles, puede limitarse las pérdidas del carbono orgánico del suelo o puede incrementarse su absorción en el suelo. Otra posibilidad es modificar el equilibrio entre la actividad fotosintética y la respiración de los ecosistemas, aumentando la fotosíntesis de los cultivos, empleando cultivos de cobertura, cultivos intercalados y sistemas agroforestales, y reduciendo al mínimo las alteraciones del suelo mediante el empleo de la agricultura de conservación. Además, también pueden lograrse importantes beneficios buscando un equilibrio respecto al carbono de los cultivos mediante el uso de variedades mejoradas de cultivos, leguminosas que fijan el nitrógeno y fertilizantes orgánicos e inorgánicos, que aumentan la cantidad disponible de residuos de las cosechas para su almacenamiento en el suelo. La mejora de la gestión del agua es igualmente un potente motor de la productividad primaria y un complemento de todas esas prácticas.

La optimización de prácticas para capturar el carbono orgánico del suelo también contribuye a la seguridad en el suministro de alimentos, favoreciendo la adaptación al cambio climático. No obstante, los efectos sobre los rendimientos dependen de las condiciones locales y de la combinación de las prácticas adoptadas por los agricultores (Pittelkow *et al.*, 2015).

En cuanto a los sistemas agroforestales y agrosilvopastorales (integración de árboles y arbustos en sistemas de cultivos y/o ganadería) reducen la erosión del suelo, favorecen la infiltración de agua y reducen los efectos de los fenómenos meteorológicos extremos, además de contribuir a diversificar las fuentes de ingresos y proporcionar alimento para el ganado.

Por otro lado, se estima que hasta el 80 % del carbono orgánico total de la biosfera terrestre, excluidos los combustibles fósiles, se almacena en los suelos, mientras que aproximadamente el 20 % se almacena en la vegetación¹¹⁵. En cualquier caso, cada vez se da más importancia al papel de los suelos como regulador terrestre de los ciclos del carbono y el nitrógeno, especialmente tras el nuevo régimen climático, establecido en virtud del Acuerdo de París de diciembre de 2015, por el que se pide la adopción de medidas para conservar y mejorar los sumideros y reservorios de GEI. Hay que recordar que los suelos son el segundo mayor reservorio de carbono de la Tierra, después de los océanos; una pequeña variación en las existencias de carbono orgánico del suelo puede provocar cambios importantes en los niveles de CO₂ de la atmósfera (Chappell *et al.*, 2016).

Hasta un metro de profundidad, los suelos de todo el mundo, excepto el permafrost, contienen unas existencias totales de carbono orgánico de alrededor de 500±230 Gt C, que equivale al doble de la cantidad de carbono en forma de CO₂ presente en la atmósfera (Scharlemann *et al.*, 2014). Los suelos ofrecen grandes posibilidades para retener carbono, especialmente cuando se trata de suelos degradados y se toman medidas de restauración (Lal, 2010).

No obstante, es necesario implementar sistemas adecuados de información y seguimiento sobre las existencias actuales de carbono del suelo y sobre el potencial real de captación de carbono del suelo. En cualquier caso, para aprovechar el potencial de fijación de carbono del suelo, es necesario fomentar la gestión sostenible de los suelos como un sistema con un gran número de funciones que

¹¹⁵ El crecimiento de las plantas produce unas 54 GtC por año, mientras que nuestra especie se queda con unas 15 a 20 GtC de la producción primaria neta (cantidad de carbono de la biomasa que se cosecha, se utiliza para pastos, se quema o se pierde como resultado del cambio en el uso de la tierra inducido por el ser humano) (Running, 2012; Krausmann *et al.*, 2013). Por otro lado, océanos y zonas litorales también desempeñan un papel destacado en el ciclo del carbono. Según estimaciones, más del 90 % del carbono mundial se almacena en los sistemas acuáticos. Además, alrededor del 25 % de las emisiones de GEI se acumula en medios acuáticos, principalmente manglares, praderas submarinas, bosques de llanuras inundables y sedimentos costeros (Khatiwala *et al.*, 2013). Por tanto, los sistemas acuáticos podrían contribuir considerablemente a mitigar el cambio climático.

ofrece múltiples servicios ecosistémicos (FAO & ITPS, 2015). La tasa de captación de carbono del suelo en tierras destinadas a usos agrarios varía de 0,1 a 1 GtC por hectárea y año (Paustian *et al.*, 2016).

9.3.5- Alimentación humana sostenible: desperdicio de alimentos, huella de carbono y dieta “saludable”

Una alimentación humana sostenible está relacionada con menores pérdidas de alimentos a lo largo de toda la cadena del sistema alimentario. Así, para disminuir la intensidad de las emisiones a lo largo de toda la cadena alimentaria se necesitarían importantes cambios en la sensibilización por parte de los consumidores, así como incentivos en los precios que beneficien a aquellos productos alimenticios que tengan una menor huella ecológica. Por otro lado, un nuevo planteamiento de las recomendaciones dietéticas, con objeto de disminuir la cantidad de alimentos de origen animal supondría una notable contribución en esa dirección, con probables beneficios adicionales para la salud humana (FAO, 2016a).

En cualquier caso, la adopción generalizada de una actividad agroalimentaria climáticamente inteligente y sostenible puede no ser suficiente para conseguir los objetivos planteados a nivel mundial sobre el clima. Aproximadamente, una tercera parte del total de alimentos generados en el mundo se pierde o desperdicia después de su producción, debido a problemas que van desde el uso inadecuado de inputs hasta la falta de instalaciones apropiadas para el almacenamiento, elaboración y distribución. Reducir las pérdidas y el despilfarro de alimentos no solo contribuye a la mejora de la eficiencia del sistema agroalimentario, sino que también disminuye la presión sobre los recursos naturales y las emisiones de GEI. Además, el empleo de la energía y sus emisiones durante la elaboración, conservación, almacenamiento y transporte de alimentos son cada vez más elevados.

Existen numerosas posibilidades para disminuir las pérdidas y los despilfarros a lo largo de todos los sistemas alimentarios que abastecen las ciudades de productos de origen animal. En cada eslabón de la cadena, la tecnología que puede contribuir a solucionar estos problemas ya está disponible o se está investigando. Tanto en las economías desarrolladas como en las emergentes, el sector privado está realizando considerables inversiones en tecnologías que reducen los residuos y ahorran costes. La función del sector público es proporcionar un entorno que incentive la reducción de las pérdidas al mínimo durante la distribución y comercialización (FAO, 2011c).

La modernización de las cadenas de suministro de alimentos se ha asociado con mayores emisiones de gases de efecto invernadero procedentes tanto de los inputs de las actividades previas a la cadena productiva de alimentos (fertilizantes, maquinaria, plaguicidas, productos veterinarios, transporte) como de aquellas realizadas con posterioridad a las explotaciones agrarias (transporte, elaboración, distribución y venta al consumidor). De acuerdo a los cálculos y datos anteriores, Bellarby *et al.* (2008) estiman que la producción de fertilizantes, herbicidas y plaguicidas y las emisiones procedentes de los combustibles fósiles utilizados en el campo representaban en 2005 el 2 %, aproximadamente, de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero..

En cualquier caso, se necesita disponer de métodos de análisis del ciclo de la vida para calcular las emisiones resultantes del consumo de productos alimenticios. Generalmente, estos métodos tienen en cuenta las emisiones de los inputs utilizados en las fases anteriores a las explotaciones agropecuarias, así como las del procesamiento posterior que incluyen metano, óxido nitroso y CO₂ así como el uso de combustibles fósiles en el sistema alimentario (Steinfeld et al., 2006; FAO, 2013b). Incluyendo las etapas posteriores a la fase productiva alrededor de 3,4 Gt de emisiones de CO₂ equivalente se generan por el empleo directo indirecto de energía en la cadena agroalimentaria (FAO, 2011d). Esto lo podemos comparar con las algo más de 10 Gt de CO₂ equivalente que, aproximadamente, genera la actividad agropecuaria, forestal y el cambio del uso de la tierra (ASOUT). Actualmente, los sistemas alimentarios consumen un 30% de la energía disponible en el mundo, de los cuales más del 70% se consume fuera de las explotaciones agrarias

Aunque dependen en gran medida de los combustibles fósiles, los sistemas alimentarios modernos han contribuido sustancialmente a mejorar el abastecimiento de alimentos. Sin embargo, para que dichos sistemas contribuyan a la mitigación del cambio climático tendrán que reducir en el futuro su dependencia de las energías fósiles. El Programa de la FAO de alimentos energéticamente inteligentes en función de la población y el clima emplea una perspectiva que establece vínculos entre agua, energía y alimentos para ayudar a los países en desarrollo a garantizar un acceso adecuado a los servicios energéticos modernos durante todas las etapas de las cadenas agroalimentarias, mejorar la eficiencia energética e incrementar la proporción de energía renovable empleada (FAO, 2014a).

Se pueden lograr dietas sanas y sostenibles si se cumplen todas las condiciones necesarias para la seguridad en el abastecimiento de alimentos sin agotar excesivamente los recursos naturales o contaminar el medio ambiente. “Sostenible” significa que las generaciones presentes y futuras cuentan con suficientes alimentos de adecuada calidad nutricional como para promover su bienestar (Pinstrup-Andersen, 2009; Harding, 2010).

No existe un único método que permita determinar si un sistema alimentario es sostenible y tiene capacidad de cuantificar que todos los habitantes del mundo están bien nutridos. Una de las forma de medición más directa, uniforme y difundida es la cuantificación del consumo de calorías. No obstante, una dieta sana y sostenible es mucho más que la ingesta de una cantidad suficiente de calorías. Es también el consumo de alimentos de buena calidad. Una dieta es pobre si carece de minerales y vitaminas, si la cantidad de frutas, verduras o productos de origen animal no es suficiente o si contiene demasiados elementos cuyo consumo excesivo resulta perjudicial, como las grasas saturadas y el azúcar (IFPRI, 2004).

A pesar que los productos ganaderos no son absolutamente esenciales para la alimentación humana, son deseables y deseados. La carne, la leche y los huevos, en cantidades adecuadas, son valiosas fuentes de proteínas de alta calidad y micronutrientes biodisponibles esenciales, completos y de fácil digestibilidad, lo que los hace especialmente importantes para niños, así como para mujeres embarazadas y lactantes FAO. 2011. No obstante, como veremos más adelante, el consumo excesivo puede originar problemas de salud.

Si bien hay un acuerdo general sobre los potenciales beneficios de los alimentos de origen animal, no se cuenta con unas directrices mundiales que definan un nivel ideal de consumo de estos productos para un individuo. En este sentido, la ingesta diaria de energía necesaria para un adulto oscila entre las 1680 y las 1990 kilocalorías (kcal) en total, dependiendo del país, y que el nivel de seguridad en el aporte de proteínas para un adulto es de 58 g diarios FAO. 2011. Para McMichael *et al.* (2007), el consumo medio mundial de carne por persona debería ser de aproximadamente 90 gramos al día, en lugar de los 100 gramos actuales, y de ellos no más de 50 gramos deberían provenir de carnes rojas de rumiantes. Si se alcanzara esta meta, se reduciría el techo máximo de la demanda de carne.

En cualquier caso, y a pesar de las anteriores recomendaciones, los programas gubernamentales que fomentan una alimentación saludable y nutritiva han incidido

limitadamente en el cambio de las preferencias alimentarias. Lo más probable es que cualquier cambio en los regímenes alimenticios esté impulsado, principalmente, por la educación y la disponibilidad de alimentos saludables.

A diferencia de la subnutrición, que está generalmente asociada a la pobreza, los problemas de malnutrición pueden afectar a grupos con diferente nivel de ingresos, si bien adoptan distintas formas entre los ricos y los pobres. Así, las personas más pobres suelen presentar carencias de proteínas, energía y micronutrientes, mientras que para quienes tienen recursos económicos para adquirir suficientes calorías, el problema suele encontrarse en un consumo excesivo de estas y en dietas poco equilibradas, lo que provoca diversos problemas de salud.

En relación con lo anterior, para los habitantes de las ciudades con un nivel de ingresos suficiente, los productos de origen animal¹¹⁶ pueden ser un componente importante de una dieta equilibrada. La urbanización ha estado asociada con el aumento de la demanda de productos pecuarios durante toda la revolución ganadera. Las personas de las ciudades comen menos alimentos amiláceos y más carne, fruta y hortalizas que las personas de las zonas rurales (Hooper *et al.*, 2008).

No obstante, muchos consumidores urbanos dan más importancia a la comodidad y satisfacción inmediata que al valor nutricional. Por ello, pueden caer en la tentación de consumir un exceso de productos de origen animal ya que estos son fácilmente accesibles y suelen prepararse en raciones de gran tamaño con una abundante cantidad de grasas y sal. En este sentido, los altos niveles de consumo de carne y grasas saturadas en los países de ingresos altos se han relacionado con tasas elevadas de enfermedades cardiovasculares, diabetes y algunos tipos de cáncer (WALKER *et al.*, 2005).

Por todo ello, en la actualidad se promueve la disminución del consumo de alimentos de origen animal, especialmente la carne procedente de ganado vacuno. En este sentido, a lo largo de estos últimos años se han producido diversas campañas y movimientos que proponen desde una disminución en el consumo de

¹¹⁶ En la mayor parte de los casos, esto se debe a que las pequeñas y grandes ciudades ofrecen más oportunidades de obtención de ingresos que las zonas rurales y a que la población urbana es, en promedio, más rica. Sin embargo, los habitantes urbanos pobres consumen muchos menos alimentos de origen animal que los habitantes pobres del medio rural.

carnes¹¹⁷ y otros productos de origen animal, hasta movimientos ecologistas y animalistas que promueven dietas vegetarianas o veganas¹¹⁸.

Llama la atención que haya sido precisamente la FAO, organismo encargado de asegurar el suministro de alimentos a toda la población mundial y que durante muchísimos años ha promovido el aumento en la producción de alimentos de origen animal, uno de los primeros¹¹⁹ en responsabilizar a la ganadería, especialmente al ganado vacuno (emisiones de metano), de una buena parte del cambio climático. No obstante, existen numerosas contradicciones en las publicaciones de este organismo internacional ya que, aunque, por un lado, se asigna a los rumiantes un papel muy negativo respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero, tampoco se apuesta claramente por los animales monogástricos (aves y porcino), especialmente en el caso de los sistemas intensificados, con lo que no queda claro cómo se puede asegurar el abastecimiento de alimentos animales a toda la población mundial

Por todo ello, pensamos que es necesario conseguir un cierto equilibrio entre productividad (implicaría emplear sistemas productivos más intensificados), bienestar animal (favorecería a sistemas alternativos más extensificados) y las emisiones de gases de efecto invernadero (que obligaría a reducir la explotación de rumiantes, sobre todo ganado vacuno de carne).

¹¹⁷ Una de las campañas más conocidas es "Meat free monday" (Lunes libre de carne), apoyada por algunas ciudades hasta conocidos actores o cantantes que proponen no comer carne un día a la semana. En este sentido, hace solo unos días (2-11-2017) el conocido músico vegetariano Paul McCartney emitió su documental "One day a week" (Un día a la semana), en el que apoyaba la citada campaña.

¹¹⁸ La principal diferencia entre una persona vegetariana y vegana una es que la segunda no consume productos de origen animal, pero algunos vegetarianos sí. Los veganos no consumen productos de origen animal: carne, pescado, aves, huevos, productos lácteos, miel o gelatina. Un vegetariano es alguien que no come carne, pescado ni pollo. El término "ovo-lacto-vegetariano" se utiliza para quienes comen leche y huevos. El objetivo de los movimientos animalistas es promover las dietas vegetarianas y veganas como paradigma de la lucha contra el cambio climático y contra el uso y abuso de los animales en la industria cárnica. Sin embargo, señalan que será un cambio progresivo que llevará tiempo, educación y sensibilización.

¹¹⁹ En el año 2006 se publicó "Livestock's long shadow" (traducido al castellano, en 2009, como "La larga sombra del ganado"); ver Steinfeld *et al.*, (2006)

En cualquier caso, un cambio dietético hacia un consumo reducido de carne es una estrategia eficiente para contrarrestar la pérdida de biodiversidad y el cambio climático en regiones (países desarrollados y en transición) donde el consumo ya está en un nivel muy alto o se está expandiendo rápidamente, como China (Stoll-Kleemann & Schmidt, 2017).

Para finalizar este apartado hay que señalar otras alternativas incipientes en el aporte de proteínas más respetuosas con las emisiones de GEI y el cambio climático: los insectos y la carne creada “in vitro”.

En lo que se refiere a la primera alternativa, señalar que, aproximadamente, un 30% de la población mundial consume insectos capturados en su entorno natural (FAO/WUR, 2013). Los insectos comestibles contribuyen al suministro de alimentos y son un medio de vida de quienes los recolectan, pueden ser “criados” y, según algunas investigaciones, podrían ser más eficientes y producir emisiones de metano más bajas que las del ganado (Oonincx *et al.*, 2010).

En cuanto a la segunda alternativa, destacar que hay propuestas que, como señala Gaudio (2015), nos apartan incluso de la propia vida animal, como la de un grupo de investigadores holandeses, encabezados por Willen Van Eelen, que proponen crear carne de vacuno cultivada “in vitro” que sustituya a la producida en las explotaciones ganaderas tradicionales. Esta carne “in vitro” presenta las ventajas potenciales de usar menos agua y energía y respetar el bienestar de los animales, pero a la tecnología le resta aún un largo camino por recorrer antes de producir carne que pueda comercializarse.

Las técnicas actuales comprenden el crecimiento en medios de cultivo de células madre de animales de granja en estructuras musculares tridimensionales. No obstante, es difícil lograr un gran crecimiento de las células, ya que estas solamente se dividen un cierto número de veces (Jones, 2010). La carne producida artificialmente “in vitro” constituye un posible competidor futuro de la carne animal para quienes desean consumir carne producida de manera sostenible o tienen preocupaciones relativas al bienestar de los animales.

9.3.6- Políticas agrarias y financiación frente al cambio climático

Es posible que no sea suficiente un cambio hacia prácticas sostenibles en el sector agrario para situar a los sistemas alimentarios en el camino de la sostenibilidad y asegurar el suministro de alimentos para erradicar el hambre. Las medidas de apoyo pueden tener efectos colaterales no deseados si no están coordinadas con las iniciativas para hacer frente al cambio climático y el medioambiente. Así, las subvenciones a los inputs agrarios pueden inducir al uso ineficiente de plaguicidas y fertilizantes sintéticos, aumentando la intensidad de las emisiones en la producción. En este sentido, cerca del 50% de las subvenciones agrarias concedidas por los gobiernos de los países de la OCDE a comienzos de la presente década fueron muy negativas para el medio ambiente, ya que favorecían el incremento de la demanda de fertilizantes químicos y combustibles fósiles, aumentando las emisiones de gases de efecto invernadero (OCDE, 2015).

No obstante, en los países de la OCDE, el porcentaje de subvenciones perjudiciales para el medio ambiente ha disminuido, mientras que las ayudas y pagos por el cumplimiento de los reglamentos medioambientales han aumentado. A pesar de ser una tendencia positiva, los países de la OCDE todavía tienen mucho trabajo que realizar para que las políticas de precios agrarios sean consecuentes con los incentivos establecidos para adoptar prácticas productivas ambientalmente sostenibles.

Una forma de compaginar el desarrollo del sector agrario con los objetivos del cambio climático sería adoptar medidas de apoyo al mismo que estuvieran condicionadas a la adopción de prácticas agropecuarias y forestales encaminadas a reducir las emisiones y preservar el medio ambiente.

Los cultivos agrícolas y, sobre todo, la ganadería son los subsectores con mayores repercusiones en la deforestación y la degradación de los bosques. Por ello, el éxito de las medidas de adaptación al cambio climático y de mitigación del mismo dependerá, en gran medida, de la coordinación entre los objetivos en los sectores agrario y energético. Así, por un lado, la reducción de los impuestos sobre combustibles empleados en la producción agropecuaria y, por otro, el apoyo al desarrollo de biocombustibles son una muestra de las políticas contradictorias en materias relativas al sector agrario, la energía y el cambio climático.

Las razones que se esgrimen para reducir los impuestos sobre los combustibles utilizados en el sector agrario es su importancia para el transporte de inputs productivos y que en la mayoría de las ocasiones se utiliza fuera de la red de carreteras. No obstante, en las emisiones de gases de efecto invernadero, el empleo de combustible diésel contribuye en las mismas cantidades a las emisiones de CO₂, independientemente de donde se produzca. Por ello, una política agraria que permita la exención total de impuestos no sería coherente con las medidas de mitigación del cambio climático.

En cuanto a los biocombustibles son otro aspecto vinculado con la energía en el que la coherencia de las políticas empleadas resulta complicada. La utilización de materias primas para producir biocombustibles compite con las actividades agrarias tradicionales por la tierra y por otros recursos, lo que pueda afectar al suministro de alimentos al favorecer precios más elevados e inestables de los mismos. Debido a que la viabilidad económica de los biocombustibles depende del precio del petróleo, las fuertes fluctuaciones de los mercados energéticos se transmiten a los mercados agrarios, así como los precios de los alimentos (Enciso *et al* 2016).

Frente al cambio climático se pueden emplear medidas de gestión de riesgos que están relacionadas con la incertidumbre que genera el mismo. Así, en algunos países, como España o India, se ha instaurado un tipo de seguro agrario denominado “seguro indexado” que tiene importantes diferencias con los tradicionales seguros de daños basados en indemnizaciones. En los seguros indexados, el pago se realiza en base a un índice observable, como por ejemplo imágenes tomadas por satélite sobre el estado de la vegetación. Por esta razón, los pagos son más sencillos de calcular, ya que no requieren inspección de daños, disminuyendo, además, el riesgo moral y de selección adversa debido a que los productores no pueden influir en los índices.

Las actividades agropecuarias y forestales tienen un gran potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático. En este sentido, existen diversas posibilidades desde el punto de vista técnico muchas de las cuales se emplean con frecuencia en las explotaciones más avanzadas, generalmente de sistemas intensificados. El problema se encuentra en los costes que tiene la mitigación y en las posibilidades económicas de agricultores, ganaderos y silvicultores para poder aplicar prácticas adecuadas de reducción de emisiones y captación de carbono.

Por todo ello, sería necesario establecer un marco legislativo en el que se incluyeran una serie de incentivos económicos para que los productores agrarios optasen por emplear técnicas de mitigación frente al cambio climático. Algunos ejemplos serían: incentivos positivos a productores para que proporcionen sumideros de carbono y los conserven; impuestos sobre los fertilizantes nitrogenados sintéticos, en países donde se emplee de forma excesiva y existan problemas de contaminación de las aguas por nitratos, y, finalmente, iniciativas sobre la cadena de suministros para comercializar productos alimenticios con una baja huella de carbono (Paustian *et al.*, 2016).

Aunque es complicado realizar un seguimiento detallado, diversas informaciones sugieren que el sector privado es, con gran diferencia, la principal fuente de financiación para la adaptación al cambio climático y su mitigación. Así, dicho sector privado contribuyó con cerca del 62% de los 391.000 millones de dólares USA invertidos para abordar el cambio climático en 2014 (Buchner *et al.*, 2015).

Por otro lado, la financiación pública internacional para hacer frente al cambio climático en la actividad agropecuaria y forestal ha aumentado notablemente desde 2002. A finales de 2014, había alcanzado casi 4.000 millones de dólares USA, aunque esta cantidad es sólo una pequeña parte del total de fondos públicos nacionales que los países en desarrollo dedican al sector agrario, que ascendieron a unos 252.000 millones en 2012 (FAO, 2016a).

En un entorno más apropiado y favorable, la financiación pública, puede actuar como motor para estimular los acuerdos que procedan de otras fuentes de los sectores privado y público. Una amplia alianza de Organizaciones No Gubernamentales y empresas privadas firmaron, en 2014, la declaración de Nueva York sobre los bosques, constituyendo un ejemplo de la función catalizadora que puede ejercer la financiación pública. La Alianza tiene como meta reducir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero entre 4,5 Gt y 8,8 Gt al año (Conway *et al.*, 2015).

Uno de los principales objetivos expresados por el sector privado en la declaración de Nueva York es eliminar hasta el año 2020 la deforestación vinculada a la obtención de productos agrarios como la soja, el aceite de palma, la celulosa o la carne de vacuno.

No obstante, los datos experimentales de 11 países indican que los recursos internos de los mismos son una parte importante, y en ocasiones predominante, del gasto en cambio climático (PNUD, 2015). Además, existen fondos de desarrollo rural que, a pesar de no pertenecer a la categoría de financiación climática, son adecuados para el clima ya que la obtención de otros objetivos de política puede influir en los resultados del cambio climático en aspectos como resiliencia o las emisiones de gases de efecto invernadero.

10.- A MODO DE CONCLUSIÓN

Me gustaría señalar que el sector de los seguros agropecuarios será uno de los más beneficiados como consecuencia del cambio climático. Es casualidad que el último apartado del último artículo de la última revista “Economía Exterior” (última en el sentido estricto, ya que ha dejado de publicarse como tal) trate precisamente sobre el tema de los seguros agropecuarios. Concretamente, aborda la problemática de la utilización de grandes números (más conocido como “big data”) para el cálculo de las primas de riesgo para la cobertura de las pérdidas de cultivos y ganado, esto último, casualmente, o quizás no, el tema de mi tesis doctoral. Aquí también se cierra el círculo del que hablaba en mi toma de posesión como Académico correspondiente.

Para finalizar, me gustaría destacar que el planeta Tierra seguirá aquí durante miles de millones de años, a pesar de las perturbaciones que los seres humanos realizamos sobre su sistema climático y sobre la biosfera. Su salud no corre peligro, la nuestra, lamentablemente sí.

El cambio climático es una oportunidad que no podemos perder para reflexionar sobre nuestro crecimiento que, incluso sin los efectos del calentamiento producido por los gases de efecto invernadero, estaba condenado a un probable colapso por falta de recursos. Si actuamos con inteligencia y lo aprovechamos, podremos legar un mundo mejor del que nos hemos encontrado.

Nos gusta pensar en la eternidad, algunos como individuos, otros como especie. Yo añadiría, jugando con una palabra de nuestro idioma: si el tiempo lo permite.

Muchas gracias, he dicho.

11.- BIBLIOGRAFIA

- ASFAW, S., MCCARTHY, N., LIPPER, L., ARSLAN, A. & CATTANEO, A. (2014). *Climate variability, adaptation strategies and food security in Malawi*. ESA Working Paper No. 14-08. FAO. Rome.
- BALZTER, H., GERARD, F.F., GEORGE, C.T., ROWLAND, C.S., JUPP, T.E., MCCALLUM, I.... SCHMULLIUS, C. (2005). Impact of the Arctic oscillation pattern on interannual forest fire variability in Central Siberia. *Geophysical Research Letters*, 32, L14709 doi:10.1029/2005GL022526
- BARDAJÍ, T., & ZAZO, C. (2009). El Cuaternario: un "nuevo" periodo en la escala Geocronológica global. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(1), 37-43.
- BARLAGE, M., ZENG, X., WEI, H. & MITCHELL, K. E (2005). A global 0.052 maximum albedo dataset of snow-covered land based on MODIS observations, *Geophysical Research Letters*, 32, L17405
- BELLARBY, J. FOEREID, B., HASTINGS, A. & SMITH, P. (2008). *Cool farming: climate impacts of agriculture and mitigation potential*. Greenpeace International. Amsterdam.
- BELTRAMI, H., BOURLON, E., KELLMAN, L., & GONZALEZ-ROUCO, J. F. (2006). Spatial patterns of ground heat gain in the Northern Hemisphere, *Geophysical Research Letters*, 33, L06717. doi:10.1029/2006GL025676.
- BERGER, A. (1988). Milankovitch theory and climate. *Reviews of geophysics*, 26 (4): 624-657.
- BERNER R.A. (1999). Atmospheric oxygen over the Phanerozoic time. *Proceedings of the National Academy of Science*, 96, 10955-10957
- BERNERS-LEE, M. (2010). *How bad are bananas?: the carbon footprint of everything*. Profile Books. London.
- BERCKMANS, D. (2017). General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers*, 7(1):6-11.
- BERCKMANS, D. & GUARINO, M. (2017). Precision livestock farming for the global livestock sector. *Animal Frontiers*, 7(1):4-5.
- BRACONNOT, P., JOUSSAUME, S., MARTI, O., DE NOBLET, N. (1999). Synergistic feedbacks from ocean and vegetation on the African monsoon response to mid-Holocene insolation, *Geophysical Research Letters*, 26 (16): 2481-2484
- BRASERO, R. (2017). *La influencia silenciosa. Como el clima ha condicionado la historia*. Espasa. Barcelona.
- BROECKER, W.S. (1975). Climatic change: are we on the brink of a pronounced global warming?. *Science*, 189 (4201): 460-463.
- BROECKER, W. S., SUTHERLAND, S. & PENG, T.H. (1999), A possible 20th Century slowdown of southern ocean deep water formation. *Science*, 286 (5442): 1132-1135. DOI: 10.1126/science.286.5442.1132
- BUCHNER, B.K., TRABACCHI, C., MAZZA, F., ABRAMSKIEHN, D. & WANG, D. (2015). *Global Landscape of climate finance 2015*. Climate Finance Initiative. Venice, Italy.
- BURNEY, J.A., DAVIS, S.J. & LOBELL, D.B. (2010). Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107: 12052-12057.
- CAPEL J.J.(1999). *El Niño, y el sistema climático terrestre*. Ed. Ariel. Barcelona.

- CASCANTE, K. (2017). Materias primas, especulación y cambio climático. *Economía Exterior*, 81: 59-66.
- CEARRETA, A. (2015). La definición geológica del Antropoceno según el Anthropocene Working Group (AWG). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23 (3): 263-271.
- CESS R. (2005). Water vapor feedback in climate models. *Science*, 310 (5749): 795-796.
- CHAPPELL, A., BALDOCK, J. & SANDERMAN, J. (2016). The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes. *Nature Climate Change*, 6: 187-191.
- CHARLSON, R.J., VALERO, F.P.J. & SEINFELD, J.H. (2005). In search of balance, *Science*, 308 (5723): 806-807. DOI: 10.1126/science.1108162.
- CHISHOLM, S.W., FALKOWSKI, P.G. & CULLEN, J.J. (2001). Dis-crediting ocean fertilization. *Science*, 294 (5541): 309-310. DOI: 10.1126/science.1065349.
- CIFOR (Center for International Forestry Research) (2010). *Forests and climate change toolbox*. (Disponible en: <http://www.cifor.org/fctoolbox/>).
- CLARK, P.U., DYKE, A.S., SHAKUN J.D., CARLSON, A.E., CLARK J., WOHLFARTH, B....MCCABE AM. (2009), The Last Glacial Maximum. *Science*, 325 (5941): 710-714. doi: 10.1126/science.1172873
- CLAUSSEN, M., KUBATZKI, C., BROVKIN, V., GANOPOLSKI, A. Philipp HOELZMANN, P. & PACHUR, H.J. (1999). Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the mid-Holocene, *Geophysical Research Letters*, 26 (14): 2037-2040.
- CONWAY, H., HALL, B.L., DENTON, G.H., GADES, A.M., WADDINGTON, E., 1999. Past and future grounding-line retreat of West Antarctic Ice Sheet. *Science*, 286 (5438): 280 – 283.
- CONWAY, D., KEENLYSIDE, P., ROE, S., STRECK, C., VARGAS-VICTORIA, G. & VARNS, T. (2015). *Progress on the New York Declaration on Forests – an assessment framework and initial report*. Prepared by Climate Focus, in collaboration with Environmental Defense Fund, Forest Trends, The Global Alliance for Clean Cookstoves, and The Global Canopy Program.
- COOK, A. J., FOX, A. J., VAUGHAN, D. G., & FERRIGNO, J. G. (2005). Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. *Science*, 308(5721): 541-544.
- COOK, J., ORESKES, N., DORAN, P. T., ANDEREGG, W. R., VERHEGGEN, B., MAIBACH, E. W., ... & NUCCITELLI, D. (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, 11(4), 048002. doi:10.1088/1748-9326/11/4/048002
- CRUTZEN, P. J. & STOERMER, E. F. (2000). The “Anthropocene.”. *Global Change Newsletter*, 41: 17-18.
- CURRY, R., & MAURITZEN, C. (2005). Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades. *Science*, 308(5729): 1772-1774.
- DANSGAARD, W., JOHNSEN, S. J., MØLLER, J., & LANGWAY, C. C. (1969). One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet. *Science*, 166 (3903): 377-380.
- DAVIS, C. H., LI, Y., MCCONNELL, J. R., FREY, M. M., & HANNA, E. (2005). Snowfall-driven growth in East Antarctic ice sheet mitigates recent sea-level rise. *Science*, 308(5730): 1898-1901.
- DECONTO, R. M., & POLLARD, D. (2003). Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, 421(6920): 245-249.

- DELMAS, R. A., MARENCO, A., TATHY, J. P., CROS, B., & BAUDET, J. G. R. (1991). Sources and sinks of methane in the African savanna. CH₄ emissions from biomass burning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 96(D4): 7287-7299.
- DEMENOCAL, P., ORTIZ, J., GUILDERSON, T. & Michael SARNTHEIN, M. (2000). Coherent High and low latitude climate variability during the Holocene warm period. *Science*, 288(5474): 2198-2202
- DENNIS, C. (2004). Vaccine targets gut reaction to calm livestock wind. *Nature*, 429, 119
- DE SILVA, S. L., & ZIELINSKI, G. A. (1998). Global influence of the AD 1600 eruption of Huaynaputina, Peru. *Nature*, 393(6684): 455-458.
- DIAZ, L. (2017). Tecnologías CAC: una oportunidad en la mitigación del cambio climático. *Economía Exterior*, 81: 97-105.
- DODD, M. S., PAPINEAU, D., GRENN, T., SLACK, J. F., RITTNER, M., PIRAJNO, F., ... & LITTLE, C. T. (2017). Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates. *Nature*, 543(7643): 60-64.
- DOWSETT, H. J., BARRON, J. A., POORE, R. Z., THOMPSON, R. S., CRONIN, T. M., ISHMAN, S. E., & WILLARD, D. A. (1999). Middle Pliocene paleoenvironmental reconstruction: PRISM2. *US Geological Survey open file report*, 99: 535.
- DUARTE, C.M. (Coord), ABANADES, J.C. AGUSTÍ, S., ALONSO, S., BENITO, G., CISCAR, J.C., DACHS, J., GRIMALT, J.O., LÓPEZ, I., MONTES, C., PARDO, M., RÍOS, A.F., SIMÓ, R. Y VALLADARES, F. (2009). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. CSIC. Madrid
- DURAN, G. y SÁNCHEZ, A. (2017) Cambio climático y desnutrición: los retos del sector agrícola. *Economía Exterior*, 81: 49-57.
- EASTERLING, D. R., MEEHL, G. A., PARMESAN, C., CHANGNON, S. A., KARL, T. R., & MEARN, L. O. (2000). Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 289(5487): 2068-2074.
- ECODES (2016). *Cocina comprometida con el clima*. Fundación Ecología y Desarrollo. Zaragoza.
- ELSIG, J., SCHMITT, J., LEUENBERGER, D., SCHNEIDER, R., EYER, M., LEUENBERGER, M., ... & STOCKER, T. F. (2009). Stable isotope constraints on Holocene carbon cycle changes from an Antarctic ice core. *Nature*, 461(7263): 507-510.
- ENCISO, S. R. A., FELLMANN, T., DOMINGUEZ, I. P., & SANTINI, F. (2016). Abolishing biofuel policies: Possible impacts on agricultural price levels, price variability and global food security. *Food Policy*, 61: 9-26.
- ERISMAN, J. W., SUTTON, M. A., GALLOWAY, J., KLIMONT, Z., & WINIWARTER, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1(10): 636-639.
- ESCRIVÁ, A. (2017). Encara no és tard. Claus per a entendre i aturar el canvi climàtic. Coedició Universitat de València (Servei de Publicacions) y Edicions Bromera. Alzira (Valencia).
- FAO (2010). "Climate-smart" agriculture: policies, practices and financing for food security, adaptation and mitigation. Ed. FAO. Roma,
- FAO (2011a) World Livestock 2011 – Livestock in food security. Rome, FAO.
- FAO (2011b). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk*. FAO. Rome and London. Earthscan.

- FAO (2011c). *Global food losses and food waste: extent, causes and prevention*. Rome.
- FAO (2011d). “Energy-smart” food for people and climate – an issue paper. Rome.
- FAO (2012). *State of the World’s Forests 2012*. Rome.
- FAO (2013). *Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains, a global life cycle assessment*. Rome.
- FAO (2014^a). *The State of Food and Agriculture 2014. Innovation in family farming*. Rome.
- FAO (2014b). Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. <http://www.fao.org/docrep/019/i3671e/i3671e.pdf>
- FAO (2014b). *Walking the nexus talk – assessing the waterenergy-food nexus*. Rome.
- FAO (2016a) The State of Food and Agriculture 2016. Climate change, agriculture and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- FAO & ITPS (Intergovernmental Technical Panel on Soils). (2015). *Status of the World’s Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Rome.
- FAO/WUR. 2013. Edible insects: future prospects for food and feed security. Ed. FAO. Roma.
- FEENSTRA, J.F., BURTON, I., SMITH, J.B. AND TOL, R.S.J., eds. (1998). *Handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies*. United Nations Environment Programme (UNEP) and Vrije Universiteit Amsterdam. Amsterdam. <http://dare.uvu.vu.nl/bitstream/handle/1871/10440/fl.pdf?se>
- FIELD, D. B., BAUMGARTNER, T. R., CHARLES, C. D., FERREIRA-BARTRINA, V., & OHMAN, M. D. (2006). Planktonic foraminifera of the California Current reflect 20th-century warming. *Science*, 311(5757): 63-66.
- FISCHER, H., WAHLEN, M., SMITH, J., MASTROIANNI, D., & DECK, B. (1999). Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations. *Science*, 283(5408): 1712-1714.
- FISHER, D., DYKE, A., KOERNER, R., BOURGEOIS, J., KINNARD, C., ZDANOWICZ, C., ... & ROCHON, A. (2006). Natural variability of Arctic sea ice over the Holocene. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87(28):273-275.
- FLÜCKIGER, J., DÄLLENBACH, A., BLUNIER, T., STAUFFER, B., STOCKER, T. F., RAYNAUD, D., & BARNOLA, J. M. (1999). Variations in atmospheric N₂O concentration during abrupt climatic changes. *Science*, 285(5425): 227-230.
- FOLEY, J. A., DEFRIES, R., ASNER, G. P., BARFORD, C., BONAN, G., CARPENTER, S. R., ... & HELKOWSKI, J. H. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734): 570-574.
- GALINDO, L. M., SAMANIEGO, J., ALATORRE, J. E., FERRER, J., REYES, O., & SÁNCHEZ, L. (2015). Ocho tesis sobre el cambio climático y el desarrollo sostenible en América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile.
- GAN, L., & YU, J. (2008). Bioenergy transition in rural China: Policy options and co-benefits. *Energy Policy*, 36(2): 531-540.
- GARIBALDI, L.A., CARVALHEIRO, L.G., VAISSIÈRE, B. E., GEMMILL-HERREN, B., HIPÓLITO, J., FREITAS, B.M. & AN, J. (2016). Mutually beneficial pollinator diversity and crop yield outcomes in small and large farms. *Science*, 351(6271): 388–391.

- GARNETT, T., APPLEBY, M. C., BALMFORD, A., BATEMAN, I. J., BENTON, T. G., BLOOMER, P., ... & HERRERO, M. (2013). Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. *Science*, 341(6141): 33-34.
- GARG, M. R., SHERASIA, P. L., BHANDERI, B. M., PHONDBA, B. T., SHELKE, S. K., & MAKKAR, H. P. S. (2013). Effects of feeding nutritionally balanced rations on animal productivity, feed conversion efficiency, feed nitrogen use efficiency, rumen microbial protein supply, parasitic load, immunity and enteric methane emissions of milking animals under field conditions. *Animal Feed Science and Technology*, 179(1): 24-35.
- GARRETT, T. J., & ZHAO, C. (2006). Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes. *Nature*, 440(7085): 787-789.
- GAUDIOSO, V. (2015). *Los nuevos condicionantes de la zootecnia*. Lección Inaugural del curso Académico 2015-2016 (Campus de León). Ed. Universidad de León (área de publicaciones). León.
- GEDEN, O. (2015). Policy: Climate advisers must maintain integrity. *Nature*, 521 (7550): 27-28.
- GEDNEY, N., COX, P. M., BETTS, R. A., BOUCHER, O., HUNTINGFORD, C., & STOTT, P. A. (2006). Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, 439(7078): 835-838.
- GERBER, P., VELLINGA, T., OPIO, C., & STEINFELD, H. (2011). Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livestock Science*, 139(1): 100-108.
- GERBER, P. J., HRISTOV, A. N., HENDERSON, B., MAKKAR, H., OH, J., LEE, C., ... & ROTZ, A. (2013a). Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal*, 7(s2), 220-234.
- GERBER, P. J., STEINFELD, H., HENDERSON, B., MOTTET, A., OPIO, C., DIJKMAN, J., ... & TEMPIO, G. (2013b). *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome.
- GIBBARD, P. L., & HEAD, M. J. (2009). The definition of the Quaternary system/era and the Pleistocene series/epoch. *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 20(2): 125-133.
- GONZÁLEZ-ROUCO, F., VON STORCH, H., & ZORITA, E. (2003). Deep soil temperature as proxy for surface air-temperature in a coupled model simulation of the last thousand years. *Geophysical Research Letters*, 30(21). doi:10.1029/2003GL018264.
- GONZALO, T. (2017). El Big Data transforma la lucha contra el cambio climático. *Economía Exterior*, 81: 107-111.
- GRAY, J., DAUTEL, H., ESTRADA-PEÑA, A., KAHL, O. & LINDGREN, E. (2009). Effects of climate change on ticks and tick-borne diseases in Europe. *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases*, 2009: ID 593232.
- HAGENS, N. J. (2015) “La situación del mundo 2015” Worldwatch Institute comprobar
- HALLEGATTE, S., BANGALORE, M., BONZANIGO, L., FAY, M., KANE, T., NARLOCH U., ROZENBERG, J., TREGUER, D. & VOGT-SCHILB, A. (2016). *Shock waves: managing the impacts of climate change on poverty*. Climate change and development series. World Bank Publications. Washington, DC.
- HAMAIDE, B., & BOLAND, J. J. (2000). Benefits, costs, and cooperation in greenhouse gas abatement. *Climatic change*, 47(3): 239-258.

- HAMILTON, L. C. (2010). Education, politics and opinions about climate change evidence for interaction effects. *Climatic Change*, 104(2): 231–242.
- HANSEN, J., JOHNSON, D., LACIS, A., LEBEDEFF, S., LEE, P., RIND, D., & RUSSELL, G. (1981). Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science*, 213(4511): 957-966.
- HARANGOZO, S. (2006). Atmospheric circulation impacts on winter maximum sea ice extent in the west Antarctic Peninsula region (1979-2001). *Geophysical Research Letters*, 33 (2), L02502. doi:10.1029/2005GL024978.
- HARVEY, J. 2010. Plenty of guilt and a very heavy footprint. In Business and Food Sustainability. Financial Times Special Report (available at <http://media.ft.com/cms/62017148-0b29-11df-9109-00144feabdc0.pdf>).
- HEAD, M. J., & GIBBARD, P. L. (2015). Formal subdivision of the Quaternary System/Period: Past, present, and future. *Quaternary International*, 383: 4-35.
- HERAS, F. (2015). La educación en tiempos de cambio climático: facilitar el aprendizaje para construir una cultura de cuidado del clima. *Mètode Science Studies Journal*, 85: 57-63.
- HERRERO, M., HAVLÍK, P., VALIN, H., NOTENBAERT, A., RUFINO, M.C., THORNTON, P.K., ...OBERSTEINER, M. (2013). Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52): 20888-20893.
- HLPE (High Level Panel of Experts). (2016). *Sustainable agricultural development for food security and nutrition, including the role of livestock*. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. FAO. Rome.
- HOOVER, R., CALVERT, J., THOMPSON, R. L., DEETLEFS, M. E., & BURNEY, P. (2008). Urban/rural differences in diet and atopy in South Africa. *Allergy*, 63(4), 425-431.
- HRISTOV, A.N., OH, J., FIRKINS, J.L., DIJKSTRA, J., KEBREAB, E., WAGHORN, G., ...TRICARICO, J.M. (2013). Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91 (11): 5045–5069.
- <http://www.kipster.farm/> (consultado 7-11-2017)
- HUEY, R. B., & WARD, P. D. (2005). Hypoxia, global warming, and terrestrial Late Permian extinctions. *Science*, 308(5720): 398-401.
- HUGHEN, K. A., SOUTHON, J. R., LEHMAN, S. J., & OVERPECK, J. T. (2000). Synchronous radiocarbon and climate shifts during the last deglaciation. *Science*, 290(5498): 1951-1954.
- HUYBERS, P. & WUNSCH, C. (2005). Obliquity pacing of the late Pleistocene glacial terminations. *Nature*, 434 (7032): 491-494. doi:10.1038/nature03401
- HULME, M. (2009). *Why we disagree about climate change. Understanding controversy, inaction and opportunity*. Cambridge University Press. Cambridge.
- HYDE, W. T., CROWLEY, T. J., BAUM, S. K., & PELTIER, W. R. (2000). Neoproterozoic ‘snowball Earth’ simulations with a coupled climate/ice-sheet model. *Nature*, 405(6785): 425-429.
- IFPRI (2004). *Research and Outreach: Food Systems Governance*. International Food Policy Research Institute. Washington DC.

IMHOFF, M. L., BOUNOUA, L., RICKETTS, T., LOUCKS, C., HARRISS, R., & LAWRENCE, W. T. (2004). Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature*, 429(6994): 870-873.

INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) & FAO. (2016). *Feedipedia. Animal feed resources online system*. (Available at <http://www.feedipedia.org/>).

IPCC (1991). Climate Change 1990, the IPCC scientific assessment. Cambridge University Press. Cambridge

IPCC (1996) Climate Change 1995, Impacts, adaptations of climate change, Cambridge University Press. Cambridge

IPCC 2001, Climate Change 2001, Synthesis Report, Cambridge University Press. Cambridge

IPCC (2007). Climate change 2007: The physical science basis. Fourth assessment report, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 2007.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

IVANY, L. C., PATTERSON, W. P., & LOHMANN, K. C. (2000). Cooler winters as a possible cause of mass extinctions at the Eocene/Oligocene boundary. *Nature*, 407(6806): 887-890.

JACKSON, R. B., JOBBÁGY, E. G., AVISSAR, R., ROY, S. B., BARRETT, D. J., COOK, C. W., ... & MURRAY, B. C. (2005). Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 310(5756): 1944-1947.

JACOBSON, M. Z. (2001). Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*, 409(6821): 695-697.

JENKYN, H. C., FORSTER, A., SCHOUTEN, S., & DAMSTÉ, J. S. S. (2004). High temperatures in the late Cretaceous Arctic Ocean. *Nature*, 432(7019): 888-892.

JIRIKOWIC, J. L., & DAMON, P. E. (1994). The medieval solar activity maximum. *Climatic change*, 26(2-3): 309-316.

JOHANNESSEN, O. M., KHVOROSTOVSKY, K., MILES, M. W., & BOBYLEV, L. P. (2005). Recent ice-sheet growth in the interior of Greenland. *Science*, 310(5750): 1013-1016.

JONES, N. (2010). Food: A taste of things to come?. *Nature News*, 468(7325): 752-753.

JOSHI, M. M., CHARLTON, A. J., & SCAIFE, A. A. (2006). On the influence of stratospheric water vapor changes on the tropospheric circulation. *Geophysical research letters*, 33(9). L09806. DOI: 10.1029/2006GL025983

JOUZEL, J. (1999). Calibrating the isotopic paleothermometer. *Science*, 286(5441): 910-911.

JOUZEL, J., MASSON, V., CATTANI, O., FALOURD, S., STIEVENARD, M., STENNI, B., ... & SCHWANDER, J. (2001). A new 27 ky high resolution East Antarctic climate record. *Geophysical Research Letters*, 28(16): 3199-3202.

JUNFENG, L. (2007). REEEP: Activities that Support AD Project Development Worldwide. *Paper presented at the Methane to Markets Partnership Expo, Beijing*, 30 October – 1 November. (disponible en: http://www.methanetomarkets.org/expo/docs/postexpo/ag_junfeng.pdf).

KANGMIN, L. & HO, M.W. (2006). *Biogas China*. Institute of Science in Society Report.(disponible en <http://www.i-sis.org.uk/BiogasChina.php>).

- KAPLAN, M. R., SCHAEFER, J. M., DENTON, G. H., BARRELL, D. J., CHINN, T. J., PUTNAM, A. E., ... & DOUGHTY, A. M. (2010). Glacier retreat in New Zealand during the Younger Dryas stadial. *Nature*, 467(7312): 194-197.
- KARL, T. R., & TRENBERTH, K. E. (2003). Modern global climate change. *Science*, 302(5651): 1719-1723.
- KAUFMAN, Y. J., & KOREN, I. (2006). Smoke and pollution aerosol effect on cloud cover. *Science*, 313(5787): 655-658.
- KENNEDY, M., DROSER, M., MAYER, L. M., PEVEAR, D., & MROFKA, D. (2006). Late Precambrian oxygenation; inception of the clay mineral factory. *Science*, 311(5766): 1446-1449.
- KEPPLER, F., HAMILTON, J. T., BRAß, M., & RÖCKMANN, T. (2006). Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, 439(7073): 187-191.
- KERR, R. A. (2001). Evolutionary pulse found, but complexity as well. *Science*, 293(5539): 2377-2377.
- KERR, R. A. (2004). An early start for greenhouse warming?. *Science*, 303(5656): 306-306.
- KHATIWALA, S., TANHUA, T., MIKALOFF-FLETCHER, S., GERBER, M., DONEY, S.C., GRAVEN, ...SABINE, C.L. (2013). Global ocean storage of anthropogenic carbon. *Biogeosciences*, 10: 2169–2191.
- KIRSCHVINK, J. L., RIPPERDAN, R. L., & EVANS, D. A. (1997). Evidence for a large-scale reorganization of Early Cambrian continental masses by inertial interchange true polar wander. *Science*, 277(5325): 541-545.
- KRAUSMANN, F., ERB, K. H., GINGRICH, S., HABERL, H., BONDEAU, A., GAUBE, V., ... & SEARCHINGER, T. D. (2013). Global human appropriation of net primary production doubled in the 20th century. *Proceedings of the national academy of sciences*, 110(25): 10324-10329.
- KUKLA, G. J. (2000). The last interglacial. *Science*, 287(5455): 987-988.
- KURTZ, A. C., KUMP, L. R., ARTHUR, M. A., ZACHOS, J. C., & PAYTAN, A. (2003). Early Cenozoic decoupling of the global carbon and sulfur cycles. *Paleoceanography*, 18(4).1090. doi:10.1029/2003PA000908
- LAL, R. (2004). Carbon emission from farm operations. *Environment international*, 30(7): 981-990.
- LAL, R. (2010). Enhancing eco-efficiency in agro-ecosystems through soil carbon sequestration. *Crop science*, 50(Supplement 1): S-120.
- LANDSEA, C. W., HARPER, B. A., HOARAU, K., & KNAFF, J. A. (2006). Can we detect trends in extreme tropical cyclones?. *Science*, 313(5786): 452-454.
- LASKAR, J., ROBUTEL, P., JOUTEL, F., GASTINEAU, M., CORREIA, A. C. M., & LEVRARD, B. (2004). A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428(1): 261-285.
doi: 10.1051/0004-6361:20041335
- LEAR, C. H., ELDERFIELD, H., & WILSON, P. A. (2000). Cenozoic deep-sea temperatures and global ice volumes from Mg/Ca in benthic foraminiferal calcite. *Science*, 287(5451): 269-272.
- LENTON, T. M., & WATSON, A. J. (2004). Biotic enhancement of weathering, atmospheric oxygen and carbon dioxide in the Neoproterozoic. *Geophysical Research Letters*, 31(5). L05202, doi:10.1029/2003GL018802,2004

- LEVITUS, S., ANTONOV, J., & BOYER, T. (2005). Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophysical Research Letters*, 32(2). DOI: 10.1029/2004GL021592
- LEWANDOWSKY, S., GIGNAC, G. E., & VAUGHAN, S. (2013). The pivotal role of perceived scientific consensus in acceptance of science. *Nature Climate Change*, 3(4): 399-404.
- LIAO, T., CAMP, C. D., & YUNG, Y. L. (2004). The seasonal cycle of N₂O. *Geophysical Research Letters*, 31(17). L17108
- LOOPE, D. B., ROWE, C. M., & JOECKEL, R. M. (2001). Annual monsoon rains recorded by Jurassic dunes. *Nature*, 412(6842): 64-66.
- LUBIN, D., & VOGELMANN, A. M. (2006). A climatologically significant aerosol longwave indirect effect in the Arctic. *Nature*, 439(7075): 453-456.
- LUCHT, W., PRENTICE, I. C., MYNENI, R. B., SITCH, S., FRIEDLINGSTEIN, P., CRAMER, W., ... & SMITH, B. (2002). Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 296(5573): 1687-1689.
doi: 10.1126/science.1071828
- LUIS-CALABUIG, E (2017). *Teoría ecológica, agroecosistemas, gestión ambiental y cambio global*. Academia de Ciencias Veterinarias de Castilla y León. Ed. Universidad de León.
- MACDONALD, G. J. (1990). Role of methane clathrates in past and future climates. *Climatic Change*, 16(3): 247-281.
- MACDONALD, F. A., SCHMITZ, M. D., CROWLEY, J. L., ROOTS, C. F., JONES, D. S., MALOOF, A. C., ... & SCHRAG, D. P. (2010). Calibrating the cryogenian. *Science*, 327(5970): 1241-1243.
- MCMICHAEL, A. J., POWLES, J. W., BUTLER, C. D., & UAUY, R. (2007). Food, livestock production, energy, climate change, and health. *The lancet*, 370(9594), 1253-1263. DOI:10.1016/S0140- 6736(07)61256-2
- MANN, M.E. & KUMP, L.E. (2015). *Dire predictions: understanding Climate Change*. Dorling Kindersley. New York.
- MANN, M. E., BRADLEY, R. S., & HUGHES, M. K. (1999). Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical research letters*, 26(6): 759-762.
- MANN, M. E. (2012). *The Hockey Stick and the Climate Wars*. Columbia University Press. New York.
- MANNE, A. S., & RICHELIS, R. G. (2000). The Kyoto Protocol: a cost-effective strategy for meeting environmental objectives?. In *Efficiency and equity of climate change policy* (pp. 43-61). Springer Netherlands.
- MANNING, J. G., LUDLOW, F., STINE, A. R., BOOS, W. R., SIGL, M., & MARLON, J. R. (2017). Volcanic suppression of Nile summer flooding triggers revolt and constrains interstate conflict in ancient Egypt. *Nature Communications*, 8(1), 900. Publicado online: 17-10-2017. doi:10.1038/s41467-017-00957-y
- MARTÍN-CHIVELET, J., PALMA, R.M., DOMINGO, L., LÓPEZ- GÓMEZ, J. (2015). Cicloestratigrafía, Cambio Climático y la Escala de Tiempo Astronómico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23 (2): 136-147.
- MARTIN-CHIVELET, J. (2016). *Memorias de un clima cambiante. Claves científicas para enfrentarse al cambio climático*. Batiscafo S.L. Barcelona.

- MATTER, J. M., STUTE, M., SNÆBJÖRNSDÓTTIR, S. Ó., OELKERS, E. H., GISLASON, S. R., ARADÓTTIR, E. S., ... & AXELSSON, G. (2016). Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, 352(6291): 1312-1314.
- MATHESIOUS, S., HOFMANN, M., CALDEIRA, K., & SCHELLNHUBER, H. J. (2015). Long-term response of oceans to CO₂ removal from the atmosphere. *Nature Climate Change*, 5(12): 1107-1113.
- MAURER, B. A. (2002). Biogeography: big thinking. *Nature*, 415(6871): 489-491.
- MEIER, W., STROEVE, J., FETTERER, F., & KNOWLES, K. (2005). Reductions in Arctic sea ice cover no longer limited to summer. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 86(36): 326-326.
- MEIRA, P. A., ARTO, M., HERAS, F., MONTERO, P., & IGLESIAS, L. (2013). *La sociedad ante el cambio climático. Conocimientos, valoraciones y comportamientos en la población española*. Ed. Fundación Mapfre. Madrid.
- MENG, J., & MCKENNA, M. C. (1998). Faunal turnovers of Palaeogene mammals from the Mongolian Plateau. *Nature*, 394(6691): 364-367.
- MCGLADE, C., & EKINS, P. (2015). The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C. *Nature*, 517(7533): 187-190.
- MCKAY, C. (2000). Thickness of tropical ice and photosynthesis on a snowball Earth. *Geophysical research letters*, 27(14): 2153-2156.
- MENZEL, A., & FABIAN, P. (1999). Growing season extended in Europe. *Nature*, 397(6721): 659-659.
- MILLER, G. H., GEIRSDÓTTIR, Á., & KOERNER, R. M. (2001). Climate implications of changing Arctic sea ice. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(8): 97-103.
- MILLER, L., & DOUGLAS, B. C. (2004). Mass and volume contributions to twentieth-century global sea level rise. *Nature*, 428(6981): 406-409.
- MINNIS, P., HARRISON, E. F., STOWE, L. L., GIBSON, G. G., DENN, F. M., DOELLING, D. R., & SMITH, W. L. (1993). Radiative climate forcing by the Mount Pinatubo eruption. *Science*, 259(5100): 1411-1415.
- MITCHELL T. & HULME M. (2002). Length of the growing season. *Weather*, 57 (5): 196-198.
- MONAGHAN, A. J., BROMWICH, D. H., FOGT, R. L., WANG, S. H., MAYEWSKI, P. A., DIXON, D. A., ... & KASPARI, S. D. (2006). Insignificant change in Antarctic snowfall since the International Geophysical Year. *Science*, 313(5788): 827-831.
- MONTENEGRO, A., EBY, M., KAPLAN, J. O., MEISSNER, K. J., & WEAVER, A. J. (2006). Carbon storage on exposed continental shelves during the glacial-interglacial transition. *Geophysical research letters*, 33(8). L08703.
- MONTENY, G. J., GROENESTEIN, C. M., & HILHORST, M. A. (2001). Interactions and coupling between emissions of methane and nitrous oxide from animal husbandry. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60(1): 123-132.
- MORENO, A., HIDALGO, E. C., MORELLÓN, M., & VALERO, B. (2017). Descifrando el clima de los últimos 2,58 ma. ¿Cómo, dónde y por qué? Registros continentales y marinos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 25(1): 14-27.
- MORITZ, R. E., BITZ, C. M., & STEIG, E. J. (2002). Dynamics of recent climate change in the Arctic. *Science*, 297(5586): 1497-1502.

- MORTON, O. (2016). *The Planet Remade: How Geoengineering Could Change the World*. Granta. London.
- MOTTET, A., HENDERSON, B., OPIO, C., FALCUCCI, A., TEMPIO, G., SILVESTRI, S., ... & GERBER, P. J. (2017). Climate change mitigation and productivity gains in livestock supply chains: insights from regional case studies. *Regional Environmental Change*, 17(1): 129-141.
- MOUILLOT, F., NARASIMHA, A., BALKANSKI, Y., LAMARQUE, J. F., & FIELD, C. B. (2006). Global carbon emissions from biomass burning in the 20th century. *Geophysical Research Letters*, 33(1). L01801
- NAISH, T. R., WOOLFE, K. J., BARRETT, P. J., WILSON, G. S., ATKINS, C., BOHATY, S. M., ... & DUNN, A. G. (2001). Orbitally induced oscillations in the East Antarctic ice sheet at the Oligocene/Miocene boundary. *Nature*, 413(6857): 719-723.
- NARBONA, C. (2017). Urgencia de la transición ecológica de la economía. *Economía Exterior*, 81: 19-24.
- NEUMANN, C. G., DEMMENT, M. W., MARETZKI, A., DRORBAUGH, N., & GALVIN, K. A. (2010). The livestock revolution and animal source food consumption: benefits, risks, and challenges in urban and rural settings of developing countries. *Livestock in a changing landscape, Volume 1: drivers, consequences and responses*, 221-248.
- NIANG, I., RUPPEL, O.C., ABDRABO, M.A., ESSEL, A., LENNARD, C., PADGHAM, J. & URQUHART, P. (2014). Africa. In: V.R. Barros, C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea & L.L. White, eds. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- NOAA (2017) <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html>
- NORDHAUS, W. D. Y YANG, Z. (1996). A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *American Economic Review*, 86: 741–765.
- NORDHAUS, W.D. (2006): *The Stern Review on the Economics of Climate Change*. disponible en: <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/SternReviewD2.pdf>
- NORTON, T., & BERCKMANS, D. (2017). Developing precision livestock farming tools for precision dairy farming. *Animal Frontiers*, 7 (1):18-23.
- NUÑO, T. (2017). Cambio climático: realidad cotidiana. *Economía Exterior*, 81: 41- 47.
- OECD (2015a). Adapting to the impacts of climate change, <https://www.oecd.org/env/cc/Adapting-to-the-impacts-of-climate-change-2015-Policy-Perspectives-27.10.15%20WEB.pdf>
- OECD. (2015b). *Aligning policies for a low-carbon economy*. París.
- OENEMA, O., JU, X., DE KLEIN, C., ALFARO, M., DEL PRADO, A., LESSCHEN, J. P., ... & KROEZE, C. (2014). Reducing nitrous oxide emissions from the global food system. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 9: 55-64.
- OERLEMANS, J. (2005). Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science*, 308(5722): 675-677.

- OKI, T., & KANAE, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790): 1068-1072.
- OLIVEIRA SILVA, R., BARIONI, L. G., HALL, J. A. J., MATSUURA, M. F., ALBERTINI, T. Z., FERNANDES, F. A., & MORAN, D. (2016). Increasing beef production could lower greenhouse gas emissions in Brazil if decoupled from deforestation. *Nature Climate Change*, 6(5): 493-497.
- OLSEN, P. E., KENT, D. V., SUES, H. D., KOEBERL, C., HUBER, H., MONTANARI, A., ... & HARTLINE, B. W. (2002). Ascent of dinosaurs linked to an iridium anomaly at the Triassic-Jurassic boundary. *Science*, 296(5571): 1305-1307.
- OMM (2016). “El estado del clima Mundial 2011 a 2015”.
<https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-estado-del-clima-mundial-en-2011-2015-c%C3%A1lido-y-err%C3%A1tico>
- OMM (2017) https://www.wmo.int/pages/index_es.html
- ONINX, D. G., VAN ITTERBEECK, J., HEETKAMP, M. J., VAN DEN BRAND, H., VAN LOON, J. J., & VAN HUIS, A. (2010). An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. *PloS one*, 5(12), e14445. doi:10.1371/journal.pone.0014445
- OPIO, C., GERBER, P., MOTTET, A., FALCUCCI, A., TEMPIO, G., MACLEOD, M., VELLINGA, T., HENDERSON, B. & STEINFELD, H. (2013). *Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains: a global life cycle assessment*. FAO. Rome.
- PAGANI, M., ZACHOS, J. C., FREEMAN, K. H., TIPPLE, B., & BOHATY, S. (2005). Marked decline in atmospheric carbon dioxide concentrations during the Paleogene. *Science*, 309(5734): 600-603.
- PAGE, S. E., SIEGERT, F., RIELEY, J. O., BOEHM, H. D. V., JAYA, A., & LIMIN, S. (2002). The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 420(6911): 61-65.
- PARKER, D. E. (2004). Climate: large-scale warming is not urban. *Nature*, 432(7015), 290-291.
- PAUSTIAN, K., LEHMANN, J., OGLE, S., REAY, D., ROBERTSON, G. P., & SMITH, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597): 49-57.
- PEARSON, P. N., FOSTER, G. L., & WADE, B. S. (2009). Atmospheric carbon dioxide through the Eocene–Oligocene climate transition. *Nature*, 461(7267): 1110-1113.
- PECK, S.C. & TEISBERG, T.J. (1999). CO2 emissions control agreement: incentives for regional participation. *The Energy Journal*, Special Issue: The Costs of the Kyoto Protocol – A Multi-Model Evaluation: 367–390.
- PINSTRUP-ANDERSEN, P. (2009). Food security: definition and measurement. *Food security*, 1(1), 5-7.
- POLYAKOV, I. V., & JOHNSON, M. A. (2000). Arctic decadal and interdecadal variability. *Geophysical Research Letters*, 27(24): 4097-4100.
- POLYAKOV, I. V., BESZCZYNSKA, A., CARMACK, E. C., DMITRENKO, I. A., FAHRBACH, E., FROLOV, I. E., ... & JOHNSON, M. A. (2005). One more step toward a warmer Arctic. *Geophysical Research Letters*, 32(17). L17605
- POLLACK, H. N., HUANG, S., & SHEN, P. Y. (1998). Climate change record in subsurface temperatures: a global perspective. *Science*, 282(5387): 279-281.

- PORTER, J.R., XIE, L., CHALLINOR, A.J., COCHRANE, K., HOWDEN, S.M., IQBAL, M.M., LOBELL, D.B. & TRAVASSO, M.I. (2014). Food security and food production systems. In: C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea & L.L. White, eds. *Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, pp. 485–533.
- PITTELKOW, C. M., LIANG, X., LINQUIST, B. A., VAN GROENIGEN, K. J., LEE, J., LUNDY, M. E., ... & VAN KESSEL, C. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517(7534): 365-368.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) (2015). *Budgeting for climate change: how governments have used national budgets to articulate a response to climate change*. Bangkok.
- PUTZ, F.E. & ROMERO, C. (2015). *Futures of tropical production forests*. Occasional Paper 143. Bogor, Indonesia, CIFOR (Center for International Forestry Research).
- RAMPINO, M. R., & SELF, S. (1993). Climate-volcanism feedback and the Toba eruption of ~74,000 years ago. *Quaternary Research*, 40(3), 269-280.
- RANGANATHAN, J., VENNARD, D., WAITE, R., DUMAS, P., LIPINSKI, B & SEARCHINGER, T. (2016). Shifting Diets for a Sustainable Food Future. Working Paper, Installment 11 of Creating a Sustainable Food Future. *World Resources Institute* Washington, DC.
http://www.wri.org/sites/default/files/Shifting_Diets_for_a_Sustainable_Food_Future.pdf.
- RAYMO, M. E., LISIECKI, L. E., & NISANCIOGLU, K. H. (2006). Plio-Pleistocene ice volume, Antarctic climate, and the global $\delta^{18}\text{O}$ record. *Science*, 313 (5786): 492-495. doi: 10.1126/science.1123296
- REED, C. (2016). Climate catastrophe? A half a degree warming could make the difference. DOI: 10.1126/science.aaf9948, 2016.
- RIAL, J. A. (1999). Pacemaking the ice ages by frequency modulation of Earth's orbital eccentricity. *Science*, 285(5427): 564-568.
- RICHARDS, M. A., ALVAREZ, W., SELF, S., KARLSTROM, L., RENNE, P. R., MANGA, M., ... & GIBSON, S. A. (2015). Triggering of the largest Deccan eruptions by the Chicxulub impact. *Geological Society of America Bulletin*, 127(11-12), 1507-1520.
- RIGOR, I. G., & WALLACE, J. M. (2004). Variations in the age of Arctic sea-ice and summer sea-ice extent. *Geophysical Research Letters*, 31(9). L09401
- RÍOS, X (2017). China: el gran salto ambiental. *Economía Exterior*, 81: 77-82
- RIVERA, A. (2017). Un futuro gris si no se afronta el cambio climático. *Economía Exterior*, 81: 7-16.
- ROGELJ, J., DENELZEN, M., HÖHNE, N., FRANSEN, T., FEKETE, H., WINKLER, H., ... & MEINSHAUSEN, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2° C. *Nature*, 534(7609): 631-639. doi:10.1038/nature18307
- ROGELJ, J., SCHAEFFER, M., FRIEDLINGSTEIN, P., GILLETT, N. P., VAN VUUREN, D. P., RIAHI, K.,...& KNUTTI, R. (2016). Differences between carbon budget estimates unravelled. *Nature Climate Change*, 6(3): 245-252. doi: 10.1038/nclimate2868

- ROMM, J. (2016) *Climate Change: what everyone needs to know*. Oxford University Press, New York.
- ROSENTHAL, J. (2009). Climate change and the geographic distribution of infectious diseases. *EcoHealth*, 6(4): 489-495.
- RUIZ, X. (2017). Transformación de la UE en su lucha contra el cambio climático *Economía Exterior*, 81: 83-88.
- RUDDIMAN, W. F. (2003). The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic change*, 61(3): 261-293.
- RUNNING, S. W. (2012). A measurable planetary boundary for the biosphere. *Science*, 337(6101): 1458-1459.
- RUTHERFORD, S., & D'HONDT, S. (2000). Early onset and tropical forcing of 100,000-year Pleistocene glacial cycles. *Nature*, 408(6808): 72-75.
- SANCHEZ, A.B. (Coord.) (2016). *Informe sobre sostenibilidad en España 2016. Hoja de ruta hacia un modelo sostenible*. Ed. Fundación Alternativas y Ecoembes. Madrid.
- SCHARLEMANN, J. P., TANNER, E. V., HIEDERER, R., & KAPOV, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1): 81-91.
- SCHIERMEIER, Q. (2006). Putting the carbon back: The hundred billion tonne challenge. *Nature*, 442(7103): 620-623.
- SCHIMMEL, D. S., HOUSE, J. I., HIBBARD, K. A., BOUSQUET, P., CIAIS, P., PEYLIN, P., ... & CANADELL, J. (2001). Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414(6860): 169-172.
- SCHLEUSSNER, C. F., LISSNER, T. K., FISCHER, E. M., WOHLAND, J., PERRETTE, M., GOLLY, A., ...SCHAEFFER, M. (2015). Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5° C and 2° C. *Earth System Dynamics Discussions*, 6(2): 2447-2505. doi:10.5194/esdd-6-2447-2015
- SCHELLNHUBER, H. J., RAHMSTORF, S., & WINKELMANN, R. (2016). Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Climate Change*, 6(7), 649-653. doi:10.1038/nclimate3013
- SCHMITTNER, A., YOSHIMORI, M., & WEAVER, A. J. (2002). Instability of glacial climate in a model of the ocean-atmosphere-cryosphere system. *Science*, 295(5559): 1489-1493.
- SCHULTE, P., ALEGRET, L., ARENILLAS, I., ARZ, J. A., BARTON, P. J., BOWN, P. R., ... & COLLINS, G. S. (2010). The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 327(5970): 1214-1218.
- SEDDON, A. W., MACIAS-FAURIA, M., LONG, P. R., BENZ, D., & WILLIS, K. J. (2016). Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 531 (7593): 229-232.
- SEVERINGHAUS, J. P., & BROOK, E. J. (1999). Abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice. *Science*, 286(5441): 930-934.
- SEWALL, J. O., & SLOAN, L. C. (2001). Equable paleogene climates: The result of a stable, positive Arctic Oscillation?. *Geophysical Research Letters*, 28(19): 3693-3695.
- SHERWOOD, S. C., LANZANTE, J. R., & MEYER, C. L. (2005). Radiosonde daytime biases and late-20th century warming. *Science*, 309(5740): 1556-1559.

- SHEVENELL, A. E., KENNETT, J. P., & LEA, D. W. (2004). Middle Miocene southern ocean cooling and Antarctic cryosphere expansion. *Science*, 305(5691): 1766-1770.
- SHINDELL, D., FALUVEGI, G., LACIS, A., HANSEN, J., RUEDY, R., & AGUILAR, E. (2006). Role of tropospheric ozone increases in 20th-century climate change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111, D08302, doi:10.1029/2005JD006348
- SLOAN, L. C., & POLLARD, D. (1998). Polar stratospheric clouds: A high latitude warming mechanism in an ancient greenhouse world. *Geophysical Research Letters*, 25(18): 3517-3520.
- SMITH, D. M., SCAIFE, A. A., BOER, G. J., CAIAN, M., DOBLAS-REYES, F. J., GUEMAS, V., ...WYSER, K (2013). Real-time multi-model decadal climate predictions. *Climate dynamics*, 41(11-12): 2875-2888.
- SMITH P., BUSTAMANTE, M., AHAMMAD, H., CLARK, H., DONG, H., ELSIDDIG, ...TUBIELLO, F. (2014). Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel & J.C. Minx, eds. *Climate Change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- SOLANKI, S. K., USOSKIN, I. G., KROMER, B., SCHÜSSLER, M., & BEER, J. (2004). Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 431(7012): 1084-1087.
- SOMMER, S. G., OLESEN, J. E., PETERSEN, S. O., WEISBJERG, M. R., VALLI, L., RODHE, L., & BÉLINE, F. (2009). Region-specific assessment of greenhouse gas mitigation with different manure management strategies in four agroecological zones. *Global Change Biology*, 15(12): 2825-2837.
- SOLOMON, S., ROSENLOF, K. H., PORTMANN, R. W., DANIEL, J. S., DAVIS, S. M., SANFORD, T. J., & PLATTNER, G. K. (2010). Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. *Science*, 327(5970): 1219-1223.
- SOUSSANA, J.-F., DUMONT, B. & LECOMTE, P. (2015). *Integration with livestock. Agroecology for food security and nutrition*. Proceedings of the FAO International Symposium, 18–19 September 2014, Rome, Italy. pp. 225–249. FAO. Rome,
- STEINFELD, H., GERBER, P., WASSENAAR, T., CASTEL, V., ROSALES, M., DE HAAN, C. (2006). *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. FAO. Rome.
- STERN, N. (2006a). What is the economics of climate change? *World Economics*, 7(2), 1-10
- STERN, N. (2006b). *The economics of climate change: the Stern Review*. Cambridge, UK: Cambridge University Press
- STERNER, T. (2015). Economics: higher costs of climate change. *Nature*, 527 (7577), 177-178.
- STOKNES, P. E. (2015). *What we think about when we try not to think about global warming: toward a new psychology of climate action*. Chelsea Green Publishing. White River Junction, Vermont.
- STOLL-KLEEMANN, S. & SCHMIDT, U.D. (2017). Reducing meat consumption in developed and transition countries to counter climate change and biodiversity loss: a review of influence factors. *Regional Environmental Change*, 17 (5):1261–1277

- STONE R. (2004). Iceland's doomsday scenario?. *Science*, 306 (5700): 1278-1281
- STOREY, M., DUNCAN, R. A., & SWISHER, C. C. (2007). Paleocene-Eocene thermal maximum and the opening of the northeast Atlantic. *Science*, 316(5824): 587-589.
- STOTT, P. A., TETT, S. F. B., JONES, G. S., ALLEN, M. R., MITCHELL, J. F. B., & JENKINS, G. J. (2000). External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 290(5499): 2133-2137.
- STUBENRAUCH, C. J., & SCHUMANN, U. (2005). Impact of air traffic on cirrus coverage. *Geophysical research letters*, 32(14). L14813
- SUTTON, M. A., OENEMA, O., ERISMAN, J. W., LEIP, A., VAN GRINSVEN, H., & WINIWARTER, W. (2011). Too much of a good thing. *Nature*, 472(7342): 159-161.
- SVENSEN, H., PLANKE, S., MALTHE-SØRENSEN, A., JAMTVEIT, B., MYKLEBUST, R., EIDEM, T. R., & REY, S. S. (2004). Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming. *Nature*, 429(6991): 542-545.
- TANNER, L. H., HUBERT, J. F., COFFEY, B. P., & MCINERNEY, D. P. (2001). Stability of atmospheric CO₂ levels across the Triassic/Jurassic boundary. *Nature*, 411(6838): 675-677.
- TERRADAS, J. (2010). *Ecología viscuda*. Universitat de València, Servei de Publicacions. València
- THOMAS, D. J. (2004). Evidence for deep-water production in the North Pacific Ocean during the early Cenozoic warm interval. *Nature*, 430(6995): 65-68.
- THORNTON, P. K., VAN DE STEEG, J., NOTENBAERT, A., & HERRERO, M. (2009). The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems*, 101(3): 113-127.
- THØY, K., WENZEL, H., JENSEN, A. P., & NIELSEN, P. (2009). Biogas from manure represents a huge potential for reduction in global greenhouse gas emissions. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 6, No. 24, p. 242020). IOP Publishing.
- TRIPATHI, S. N., DEY, S., TARE, V., & SATHEESH, S. K. (2005). Aerosol black carbon radiative forcing at an industrial city in northern India. *Geophysical Research Letters*, 32(8). L08802.
- URIARTE, A. (2010). *History of earth's climate*. Eusko Jaurlaritza. Vitoria-Gasteiz.
- VALDES, P. J., BEERLING, D. J., & JOHNSON, C. E. (2005). The ice age methane budget. *Geophysical Research Letters*, 32(2). L02704
- VALLEJO, C. (2017). Donald Trump y el medio ambiente. *Economía Exterior*, 81: 67-75.
- VILNITZKY, M. (2017). Economía verde, más riqueza y equidad con menos polución. *Economía Exterior*, 81: 25-31.
- VIÑAS J. M. (2013). El clima de la Tierra a lo largo de la Historia. pp. 225-239, en: Alberola, A (coord.), *Clima, naturaleza y desastre. España e Hispanoamérica durante la Edad Moderna*. Universitat de València. Valencia.
<http://www.divulgameteo.es/uploads/Clima-Tierra-historia-JMV.pdf>
- VON FRESE, R. R., POTTS, L. V., WELLS, S. B., LEFTWICH, T. E., KIM, H. R., KIM, J. W., ... & GAYA-PIQUÉ, L. R. (2009). GRACE gravity evidence for an impact basin in Wilkes Land, Antarctica. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(2).
- VRANKEN, E. & BERCKMANS, D. (2017). Precision livestock farming for pigs. *Animal Frontiers*. 7 (1): 32-37

- WAITE, R. (2016). How I Tweaked My Diet to Cut its Environmental Footprint in Half, World Resources Institute, 20/04/2016.
<http://www.wri.org/blog/2016/04/how-i-tweaked-my-diet-cut-its-environmental-footprint-half>
- WALKER, P., RHUBART-BERG, P., MCKENZIE, S., KELLING, K., & LAWRENCE, R. S. (2005). Public health implications of meat production and consumption. *Public health nutrition*, 8(4): 348-356.
- WARD, P. D., MONTGOMERY, D. R., & SMITH, R. (2000). Altered river morphology in South Africa related to the Permian-Triassic extinction. *Science*, 289(5485): 1740-1743.
- WARD, P. D., HAGGART, J. W., CARTER, E. S., WILBUR, D., TIPPER, H. W., & EVANS, T. (2001). Sudden productivity collapse associated with the Triassic-Jurassic boundary mass extinction. *Science*, 292(5519): 1148-1151.
- WARNEKE, C., FROYD, K. D., BRIOUDE, J., BAHREINI, R., BROCK, C. A., COZIC, J., ... & MIDDLEBROOK, A. M. (2010). An important contribution to springtime Arctic aerosol from biomass burning in Russia. *Geophysical Research Letters*, 37(1). L01801
- WEISS, K. R. (2015). Global greenhouse-gas emissions set to fall in 2015, Nature News (07 December 2015) doi: 10.1038/nature.2015.18965,
- WENTZ, F. J., & SCHABEL, M. (2000). Precise climate monitoring using complementary satellite data sets. *Nature*, 403(6768): 414-416.
- WIGLEY, T. M. L. and JONES, P. D. (1981). Detecting CO₂-induced climate change», *Nature*, 292 (5820): 205-208. doi:10.1038/292205a0
- WILLIS, K. J., GILLSON, L., & BRNCIC, T. M. (2004). How "virgin" is virgin rainforest?. *Science*, 304(5669): 402-403.
- WING, S. L., HARRINGTON, G. J., SMITH, F. A., BLOCH, J. I., BOYER, D. M., & FREEMAN, K. H. (2005). Transient floral change and rapid global warming at the Paleocene-Eocene boundary. *Science*, 310(5750): 993-996.
- WINTER, A., PAUL, A., NYBERG, J., OBA, T., LUNDBERG, J., SCHRAG, D., & TAGGART, B. (2003). Orbital control of low-latitude seasonality during the Eemian. *Geophysical research letters*, 30(4).
- WOLLENBERG, E., RICHARDS, M., SMITH, P., HAVLÍK, P., OBERSTEINER, M., TUBIELLO, F. N., ... & VUUREN, D. P. (2016). Reducing emissions from agriculture to meet the 2 °C target. *Global change biology*, 22(12):3859-3864.
- WORLD BANK /CARBON PRICING LEADERSHIP COALITION. (2016). *What is the Impact of Carbon Pricing on Competitiveness?*, Executive Briefing, june de 2016.
<http://pubdocs.worldbank.org/en/759561467228928508/CPLC-Competitiveness-print2.pdf>
- WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED) (1987): *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford.
- XIN, H., & LIU, K. (2017). Precision livestock farming in egg production. *Animal Frontiers*, 7 (1):24-31.
- YOUNG, S. A., SALTZMAN, M. R., AUSICH, W. I., DESROCHERS, A., & KALJO, D. (2010). Did changes in atmospheric CO₂ coincide with latest Ordovician glacial–interglacial cycles?. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 296(3): 376-388.

- ZACHOS, J., PAGANI, M., SLOAN, L., THOMAS, E., & BILLUPS, K. (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517): 686-693.
- ZHAO, M., & RUNNING, S. W. (2010). Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 329(5994): 940-943.
- ZHU, Z., PIAO, S., MYNENI, R. B., HUANG, M., ZENG, Z., CANADELL, J. G., ... & CAO, C. (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature climate change*, 6(8): 791-795.

12.- LAUDATIO Y CONTESTACIÓN AL DISCURSO POR EL ACADÉMICO DE NÚMERO EXCELENTÍSIMO SR. DR. D. VICENTE GAUDIOSO LACASA

Excelentísimos Sr. Presidente de la Academia de Ciencias

Excelentísimos e Ilmos. Señoras y Señores Académicos,

Excelentísimas e Ilmas. Autoridades,

Señoras y Señores.

Queridos amigos todos

Tengo el honor y gran placer de presentar hoy, aquí, al Dr. González Eguren ante esta Academia de Ciencias Veterinarias de Castilla y León y entiendo que debo de ser muy breve y conciso

Nacido en su adorada Asturias, concretamente en Trubia, y afincado en León, toda su carrera de formación ha estado regada con generosas dosis de constancia y tenacidad en el trabajo, unida a una inteligencia natural y un magnífico instinto para separar lo trascendente de lo irrelevante.

El Dr. Eguren hace un magnífico bachillerato en Mieres, cerca de su pueblo natal y, con el valioso asesoramiento del Dr. Mendibil, a la sazón Jefe provincial de ganadería en León, se matricula en la Facultad de Veterinaria de esta ciudad, por entonces perteneciente al distrito universitario de la Universidad de Oviedo.

Compagina su excelente rendimiento académico con numerosas actividades culturales, viviendo con intensidad una formación complementaria en el Colegio Mayor San Isidoro. En esta institución colegial forja una buena parte de su capacidad de liderazgo y entrega al prójimo, aspectos que ha cultivado sistemáticamente.

Su brillante expediente académico le permite acceder a una de las escasas becas del plan de formación del personal investigador, del Ministerio de Educación y Ciencia, con el objetivo de materializar una Tesis Doctoral, tesis que obtuvo la máxima calificación, por unanimidad, del tribunal que la juzgó.

Gracias a sus profundos y documentados análisis de los seguros ganaderos en el vacuno en libertad, Agroseguro diseñó nuevas estrategias de protección de los pequeños ganaderos de montaña o de explotaciones sustentadas en el aprovechamiento de pastos en los sistemas extensivos, incorporando mejores y más justas primas de riesgo y los más eficientes protocolos de evaluación de siniestros.

Son numerosas sus colaboraciones o participación en proyectos de investigación, varios de ellos como investigador principal, tanto de convocatorias públicas oficiales cuanto vinculados a contratos con empresas privadas interesadas en su buen hacer. Todos ellos están relacionados con la producción animal, la fauna silvestre y la comercialización de productos agroalimentarios. Y fruto de ello son, también, numerosas las comunicaciones presentadas a congresos y las publicaciones científicas en revistas especializadas, tanto nacionales como de ámbito internacional. alguna de ellas ha sido particularmente distinguida con el Premio Nacional Cayetano López, de la Organización Veterinaria Colegial, o el Premio Prensa Agraria de la revista de Ciencia Animal ITEA.

Ha sido, además, autor de libros y capítulos de libros como el de las *Razas Autóctonas de Castilla y León*, publicado por la Consejería de Agricultura de la Junta de Castilla y León.

En el campo de la investigación científica hay que destacar, así mismo, su labor activa liderando las actividades del Comité Organizador del Congreso Internacional de la Federación Mediterránea de Sanidad y Producción de Rumiantes, su actividad como Presidente de Comités Científicos Internacionales, Presidente de la Junta Directiva Internacional de la Wild Animals Vigilance Euromediterranean Society (WAVES - Sociedad Euromediterránea para la Vigilancia de la Fauna Salvaje) y un largo etc.

Me resulta muy difícil dejar de resaltar, también, de entre sus mayores virtudes profesionales, una labor que, aunque no tiene gran repercusión

pública (no suele aparecer en las revistas de alto impacto) sí constituye una de las fuentes fundamentales de la esencia de la transmisión del saber o del conocimiento: la docencia. La preparación profunda y sistemática de una materia, la entrega a los alumnos, el ejemplo de la pasión por el saber han constituido, en el Dr. Eguren, un objetivo de vida.

Ha sido, y lo es, profesor de diversas asignaturas de las licenciaturas y los títulos de Grado de Veterinaria, Biología y de la Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria.

Ha sido, también, responsable de varios cursos de Doctorado y Coordinador del Programa de Producciones Animales Alternativas.

Ha pronunciado varias decenas de conferencias en foros nacionales e internacionales, generalmente relacionados con la producción animal y el medio ambiente.

Director de tres Master Universitarios, dos de ellos de ámbito internacional, vinculados con la fauna salvaje, y Director o Coordinador de varios cursos y jornadas sobre aspectos productivos y medioambientales, tanto nacionales como internacionales.

Recientemente ha sido nombrado Pastor mayor de los Montes de Luna, distinción que comparte, entre otros, con miembros de esta Academia, como Don Miguel Cordero del Campillo, Guillermo Suarez y Antonio Martinez, y también profesores de la Facultad de Veterinaria de León: Andres Suarez, Eduardo Zorita, Miguel Abad o Jose Manuel Gonzalo, así como con Benigno Rodriguez y Felipe Prieto Suarez, estos tres últimos padres de Academicos.

Entre otros cargos académicos o de gestión universitaria, hay que resaltar su papel como Director del Instituto de Ciencias de la Educación (ICE) y Vicerrector de Estudiantes de la Universidad de León.

A todo ello hay que añadir una brillante elocuencia (labia fecunda), una enorme capacidad de ponerse en la piel del otro, una bondad natural y una lealtad inquebrantable, en el sentido más noble del término, dignas de ser resaltadas de forma muy especial.

En fin, todo un universo, rico, variado y fecundo del que, como compañero de viaje desde hace varios lustros, quiero dar fe desinteresada.

En reconocimiento de méritos tan notables, la Academia de Ciencias Veterinarias de Castilla y León se honra en acoger en su seno, como miembro de número, al Dr. González con el discurso sobre “Cambio climático. Una visión desde la zootecnia” del que, a continuación, haré la oportuna y preceptiva crítica o contestación.

El discurso del Dr. González Eguren aborda el cambio climático desde la visión personal de un especialista en zootecnia. Dedicó los primeros apartados a analizar el sistema climático de nuestro planeta así como al estudio del clima de épocas geológicas pasadas, hechos que le permitirán comprender mejor los complejos mecanismos de realimentación del actual clima de la Tierra.

Gracias a la Paleoclimatología, estudio del clima de épocas geológicas pretéritas, podemos conocer a grandes rasgos la continua sucesión de cambios climáticos que ha experimentado nuestro planeta. Dichos cambios están caracterizados por la superposición progresiva de ciertas condiciones de aparente equilibrio sobre otras, hechos que se manifiestan en la alternancia de épocas cálidas y glaciaciones, en la escala temporal de millones de años, o de períodos glaciares e interglaciares, cuando dicha escala es de miles de años. Tales condiciones de equilibrio, que han sido relativamente constantes en el tiempo y en el espacio durante períodos apreciables, es lo que conocemos como clima.

Pero conviene aquí resaltar que el clima está relacionado con el concepto de permanencia y procede efectuar el análisis de los procesos atmosféricos desde la perspectiva de sus valores promedios, esto es, de la evaluación continua de observaciones en largos períodos de tiempo.

El clima ha cambiado tanto si nos fijamos en el tiempo geológico, y proyectamos nuestra visión a entornos de millones de años atrás, como si nos vamos a tan sólo hace unas décadas. Seremos capaces los humanos de desempeñar el papel del sol, los volcanes, etc. y provocar así un cambio abrupto en el planeta que habitamos desde hace tan sólo unos milenios.

Conocer el pasado es una herramienta imprescindible para entender qué afecta, y que no, al sistema climático. Es la base para interpretar un presente

cambiante que, sin duda, se encamina hacia un rango de temperaturas en el que no ha vivido nunca ningún humano.

Podemos afirmar que en la época que nos ha tocado vivir el cambio climático es distinto, difiere de lo percibido en el pasado. La diferencia fundamental está en el ritmo, la velocidad del incremento de la temperatura. Hace millones de años, hasta en los calentamientos más rápidos, la temperatura subía a un ritmo mucho más lento: un grado cada dos mil años en el máximo térmico del Paleoceno-Eoceno.

Sobre el calentamiento actual y su tendencia no existe discusión, hay suficiente consenso. Está documentado hasta la saciedad que a partir de 1860, con la finalización de la pequeña Edad de Hielo, entramos en un período de calentamiento intermitente que aún persiste.

Donde no existe total consenso científico es sobre cuáles son los factores que provocan ese incremento progresivo de la temperatura media global, ¿natural, antrópico o ambos a la vez? De ser los dos, ¿cuál tiene mayor incidencia? Son algunas de las preguntas más frecuentes a las que intenta responder el discurso del profesor González Eguren.

Debido a las ingentes cantidades de gases de efecto invernadero lanzadas a la atmósfera terrestre desde el inicio de la Revolución Industrial, sabemos que hay un cierto cambio inevitable. Esto implica que los escenarios climáticos en los cuales deberemos vivir en el futuro difieren de los que hemos conocido. Cambiarán –están ya cambiando– aspectos cruciales para nuestro bienestar: la disponibilidad de agua, la distribución geográfica de especies animales y vegetales, la frecuencia de olas de calor o la sensibilidad creciente a ciertas enfermedades infecto contagiosas.

Presentimos que la mayoría de quienes han hablado de calentamiento global han pecado de catastrofismo. Por ello, sería conveniente enmarcar el mensaje en una narrativa positiva. Este es el relato que defiende el Dr. Eguren. Abordar el cambio climático como una oportunidad para repensar el crecimiento económico y caminar hacia un futuro mejor, el del calentamiento global como promotor de acuerdos internacionales y potenciador de la solidaridad entre continentes y territorios, el del desarrollo sostenible como guía de un mundo cada vez más justo y más unido. Nadie se siente motivado a actuar en medio de un maremágnum de previsiones

calamitosas. Sin embargo, el optimismo nos envía señales de progreso, de movilización constructiva.

A lo largo del discurso se hace evidente que el consumo de recursos no es la causa inmediata de que cambie el clima o se extingan especies, sino que desencadena una serie compleja de mecanismos que interactúan entre sí y que cambiarán el planeta. El incremento del uso de dichos bienes de la biosfera plantea cuestiones fundamentales tales como: ¿Cómo ha afectado el aumento de su uso al clima? ¿Cómo ha alterado el funcionamiento de la biosfera? ¿Cómo ha afectado a los ecosistemas? ¿Cómo repercuten estos cambios sobre la sociedad? ¿Se puede predecir la evolución de estos efectos? ¿Podemos adaptarnos y paliar sus impactos?

Todas estas cuestiones no pueden encontrar respuesta en una única disciplina de la ciencia, requieren el concurso de la práctica totalidad de las ciencias naturales así como las sociales, lo que da idea de su magnitud y carácter transversal. Por ese motivo, el Dr. González Eguren dedica tres capítulos a resumir el estudio del problema desde las perspectivas social, económica e institucional (acuerdos Internacionales).

Desde el punto de vista social, plantea importantes retos educativos: Es necesario saber sus causas, reconocer las raíces del problema, y sus consecuencias, comprender mejor nuestras vulnerabilidades. Pero, sobre todo, es necesario saber sus potenciales soluciones para construir una cultura «baja en carbono» que evite interferencias peligrosas. El cambio climático va a determinar nuestro futuro y define o concluye por qué todos jugamos un papel en la compleja red de responsabilidades que lo alimenta.

El Dr. Eguren dedica también un apartado al complejo entramado de relaciones entre economía, cambio climático y desarrollo sostenible. Dependiendo de cuáles sean las políticas económicas, y en especial sus exigencias ambientales, así será también el clima del planeta. Como resultado de su análisis cabe plantearse hasta qué punto tiene sentido la insistencia en un crecimiento material que genera una afluencia creciente de mercancías, la mayoría de las veces impulsada por un consumismo desmedido, que poco tiene que ver con el bienestar y conduce a unos efectos cuyas secuelas ponen en entredicho los logros de dicho crecimiento.

Para comprender el cambio climático y los retos que nos plantea como disciplina científica es necesario considerar cuestiones como las responsabilidades personales y colectivas, la solidaridad con las generaciones futuras o el reparto de los riesgos y los esfuerzos de mitigación y adaptación.

El cambio climático es la tormenta perfecta, el peor enemigo para el sentido común ya que nos pide sacrificios actuales a cuenta de asegurar un futuro peor, el menos malo, mejor que si no hacemos nada.

Los humanos somos una especie excepcional que ha decidido situarse en el centro de la biosfera. Nos aprovechamos de más del 75% de la producción primaria total y de los frutos de todos los ecosistemas del planeta. Sin embargo, sólo somos una parte del engranaje biológico del sistema capaz de entender, eso sí, si ponemos voluntad, lo que está pasando a nuestro alrededor.

Disponemos de herramientas, recursos y la tecnología para impulsar un cambio de sistema energético y del modelo productivo. Nuestro mundo es finito, la biosfera, el planeta tiene límites. No podemos crecer indefinidamente. Cuanto antes actuemos antes seremos capaces de llegar a un futuro por el que valga la pena luchar.

Disponemos, además, de la ayuda de los ecosistemas, los cuales, si somos capaces de restaurarlos, nos pueden ayudar al cambio de tendencia.

Los efectos del cambio climático en el sector agroalimentario y sus implicaciones para asegurar el abastecimiento de alimentos (seguridad alimentaria) ya son alarmantes y pueden poner en peligro los principales objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de acabar con el hambre y la pobreza.

Tal vez sea necesario reajustar las políticas sobre nutrición, consumo de alimentos, apoyo a los precios de producción de dichos alimentos, gestión de los recursos naturales, desarrollo de infraestructuras y un largo etc. El cambio climático aporta nuevos riesgos. El manejo de dichos riesgos exige formas de acción colectiva mejoradas y sistemas que evalúen las vulnerabilidades y las opciones de adaptación.

Las medidas que adoptemos en la actualidad condicionarán el devenir del planeta en el que viviremos durante las próximas décadas. Por ello, el sector agrario debe responder enfrentándose a dicho cambio a la vez que toma medidas que contribuyan a su mitigación. Estas acciones deben estar en consonancia con los objetivos y prioridades de cada país, sin poner en peligro el suministro de alimentos a la población.

Hay una imperiosa necesidad de emplear, de manera más eficiente, todos los recursos que, como el agua, los combustibles fósiles o los cereales son utilizados en la cría de animales, de reciclar y reducir los residuos generados en el proceso y de establecer un balance positivo en la contribución del ganado al suministro mundial de alimentos.

Es posible que en el futuro la mayor parte del incremento de la demanda de alimentos recaiga sobre los productos avícolas y del ganado porcino. Sin embargo, las grandes explotaciones intensivas de aves y cerdos pueden generar nuevos problemas relacionados con la contaminación ambiental, el bienestar animal y un mayor riesgo de propagación de enfermedades, algunas zoonosis.

En su discurso, el Dr. González Eguren ha tratado de explicar, de forma comprensible, qué es el cambio climático de origen antropogénico, desde la perspectiva de un especialista en Zootecnia. Pero, sobre todo, ha pretendido mostrar que hay una salida y que ello puede comenzar ahora. Tenemos muchas potenciales alternativas y la posibilidad de hacer un cambio que contribuya a revertir, a mejorar, la situación.

Actualmente la zootecnia tiene el difícil reto de hacer frente al aumento de la demanda de alimentos de una humanidad en constante crecimiento y tiene que hacerlo con el mayor respeto a las garantías de calidad, de sanidad animal y humana, al bienestar de los animales y, como no, al medio ambiente. Todo ello según los principios éticos de nuestra deontología profesional y cumpliendo los retos que marcan la bioseguridad, la sostenibilidad la condicionalidad y la trazabilidad que los consumidores europeos merecen.

Muchas gracias, he dicho.