

# **BASES TECNICAS DEL CAMBIO EN EL CLIMA SIGLOS XX Y XXI.**

**Autor: Uldarico García**

El objetivo de este artículo es, exponer los fundamentos técnicos aparecidos desde final del siglo XIX, que, justifican el título de este. El clima se puede definir como el tiempo meteorológico promedio, es decir, como “la descripción estadística en términos de la media y variabilidad de magnitudes tales como temperatura ambiente, precipitaciones, vientos, humedad del aire, nubosidad, presión atmosférica y evaporación a lo largo de un largo periodo de tiempo, que la Organización Mundial de meteorología (WMO) acuerda en de treinta años, este concepto, es diferente del tiempo que hace durante una día, semana, mes o un año como periodo máximo, siendo fácilmente comprensible que frases habituales como “el clima no ha cambiado “ necesitan conocer el soporte estadístico para justificarla, ya que ningún humano es capaz de retener en su memoria los datos meteorológicos de treinta años y en mi opinión, ni siquiera el tiempo que se tuvo en el último año, igualmente frases habituales de “no creo en el cambio climático” tampoco son justificables, ya que el diccionario de la RAE, en el primer significado de la palabra creer dice “tener algo por cierto sin conocerlo de manera directa o sin que este comprobado o demostrado” y al ser el CC (cambio climático) un hecho cierto, (otra cuestión es asegurar cuál es su origen), se puede comprobar o demostrar.

- **Introducción**

La paleo climatología es la ciencia que se encarga de estudiar el clima en el pasado y debido a que no es posible, volver en el tiempo, para saber cómo era el clima, se deben estudiar impresiones creadas por los factores climáticos en épocas remotas. A estas herramientas que se utilizan para inferir el paleo clima se les llama proxies, siendo las más utilizadas, las diatomeas, foraminíferas, corales, núcleos de hielo, anillos de árboles y núcleos de algunas rocas sedimentadas. Las predicciones del CC se basan en el conocimiento que actualmente se tiene de los cambios climáticos a largo plazo para utilizados de modelos climáticos.

Los principales factores, que influyen en el cc de la época geológica, desde el Precámbrico al Holoceno, (es decir desde el origen de la tierra hace más de 4500 millones de años a nuestros días), son las variaciones galácticas y orbitales, la oblicuidad, la excentricidad y la precesión de la tierra, los ciclos de Milankovich y la variación solar, y como factores externos y la orogenia, la epirogénica, la actividad volcánica y los cambios de la composición atmosférica.

A lo largo de la historia de la Tierra, el clima ha cambiado mucho. Por ejemplo, durante la Era Mesozoica, la Era de los Dinosaurios, el clima era mucho más cálido y el dióxido de carbono abundaba en la atmósfera. Sin embargo, a lo largo de la Era Cenozoica (hace 65 millones de años hasta hoy), el clima se ha ido enfriando gradualmente. A lo largo de la historia geológica, el clima ha cambiado lentamente a lo largo de millones de años. Antes de la glaciación más reciente del Plioceno-Cuaternario, hubo otras tres glaciaciones importantes. La más antigua, conocida como Huroniana, ocurrió hacia el final del Arcaico-Proterozoico temprano (hace unos 2.500 millones de años). El evento principal de esa época, el gran evento de oxigenación se asocia más comúnmente con la causa de esa glaciación. Se cree que el aumento de oxígeno reaccionó con el potente gas de efecto invernadero metano, lo que provocó un enfriamiento.

El final del Proterozoico (hace unos 700 millones de años) tuvo otra glaciación, conocida como la hipótesis de la bola de nieve. La evidencia glacial se ha interpretado en secuencias de rocas generalizadas a nivel mundial e incluso se ha relacionado con la glaciación de baja latitud. La roca caliza (generalmente formada en entornos marinos tropicales) y los depósitos glaciares (generalmente formados en climas fríos) a menudo se encuentran juntos de esta época en regiones de todo el mundo. En Utah, la isla Antílope en el Gran Lago Salado tiene depósitos intercalados de piedra caliza y glaciares (dinamitas) que se interpretan como formados por glaciación continental. La idea de la controvertida hipótesis de la Tierra Bola de Nieve es que un efecto albedo descontrolado (hielo y nieve que reflejan la radiación solar) pudo causarla congelación completa de las superficies terrestres y oceánicas y un colapso de la actividad biológica. La tierra cubierta de hielo solo se derretiría cuando el dióxido de carbono de los volcanes alcanzara altas concentraciones, debido a la incapacidad del dióxido de carbono para ingresar al océano entonces congelado. Algunos estudios han estimado que el dióxido de carbono era 350 veces superior a las concentraciones actuales. Se ha puesto en duda su congelación completa y su alcance. También se produjeron glaciaciones en el Paleozoico, sobre todo con la glaciación Karoo del Pensilvano (hace entre 323 y 300 millones de años). Esto también fue causado por un aumento del oxígeno y una posterior caída del dióxido de carbono, probablemente producida por la evolución y el surgimiento de plantas terrestres. Las partes más cálidas del clima dentro de una era glacial se denominan interglaciares, con versiones breves llamadas interestadiales. Estos repuntes del calentamiento están relacionados con variaciones en el clima de la Tierra, como los ciclos de Milankovich. En los últimos 500.000 años, ha habido 5 o 6 interglaciares, siendo el más reciente el que pertenece a nuestra época actual, el Holoceno.

Dos de los cambios climáticos más recientes demuestran la complejidad de los cambios: la Pequeña Edad del Hielo (1300-1800) y el Periodo Cálido Medieval (800-1300). Estos eventos son más recientes y, sin embargo, tienen información contradictoria. El enfriamiento de la Pequeña Edad del hielo es ampliamente reconocido en el hemisferio norte, aunque el momento del evento (hace unos 12.000 años) no parece ser igual en todas partes. También es difícil de encontrar en el hemisferio sur. El Periodo Cálido Medieval, no fue universalmente más cálido, y probablemente no tan cálido como el calentamiento actual, y no al mismo tiempo en todas partes.

- **Radiación solar y algunos científicos que desarrollaron la climatología siglo XIX**

El Sol es la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta. Localizado a una distancia media de 150 millones de kilómetros, tiene un radio de 109 veces el de la Tierra y está formado por gas a muy alta temperatura. En su núcleo se producen continuamente reacciones atómicas de fusión nuclear que convierten el hidrógeno en helio. Este proceso libera gran cantidad de energía que sale hasta la superficie visible del Sol (fotosfera), y escapa en forma de rayos solares al espacio exterior. Se calcula que en el interior del Sol se queman cada segundo unos 700 millones de toneladas de hidrógeno, de las que 4,3 millones se transforman en energía. Una parte importante de esta energía se emite a través de los rayos solares al resto de planetas, lunas, asteroides y cometas que componen nuestro sistema solar. Más concretamente, hasta la Tierra llega una cantidad de energía solar equivalente a  $1,7 \times 10^{14}$  KW, lo que representa la potencia correspondiente a 170 millones de

reactores nucleares de 1.000 MW de potencia eléctrica unitaria, o lo que es lo mismo, 10.000 veces el consumo energético mundial. Si tenemos en cuenta que las previsiones actuales, apuntan a que, en los próximos 6.000 millones de años, el Sol tan solo consumirá el diez por ciento del hidrógeno que contiene en su interior, podemos asegurar que disponemos de una fuente de energía gratuita, asequible a todos y respetuosa con el medio ambiente, por un periodo de tiempo prácticamente ilimitado.

Radiación puede ser definida como la emisión, propagación y absorción de la energía en forma de ondas electromagnéticas. El proceso de radiación se diferencia de las otras formas de energía, como convección y conducción, por el hecho de que estas siempre necesitan un medio de transmisión, ya sea sólido, líquido o gaseoso, mientras que la radiación de energía se puede presentar además en el vacío. La radiación que llega del sol a la tierra es la fuente principal de energía para la generación de los fenómenos en la atmósfera, en los océanos y, en general, para la vida en la tierra. Conforme el espectro total de radiación solar (ultravioleta, UV, visible e infrarrojo, IR) penetra la atmósfera, se va modificando, de tal manera que gran parte de la radiación UV e IR son absorbidas, mientras que principalmente es la radiación visible la que llega a la superficie terrestre. La atmósfera tiene un papel muy importante en el mantenimiento del balance entre la radiación solar que entra al sistema terrestre y la radiación que sale de la tierra, manteniendo un promedio global de temperatura superficial del orden de 15°C. Si la tierra no tuviera una atmósfera para absorber y distribuir el calor que nos llega del sol, entonces gran parte de esa energía solar sería reflejada inmediatamente y la temperatura media sobre la superficie terrestre estaría por abajo de los 0°C. Cuando la radiación solar llega a la superficie de la tierra, es transformada en calor y en radiación infrarroja. Esta energía es absorbida por la atmósfera y emitida de nuevo al espacio. En el término de un año y a primera aproximación, el sistema terrestre devuelve exactamente la misma cantidad de energía que llega del sol, pues de otra manera la tierra se calentaría (o se enfriaría) ilimitadamente, por lo que difícilmente se podría mantener la vida tal y como la conocemos actualmente.

Las diferencias, en tiempo y espacio, del campo de radiación (solar y terrestre) y las características de la superficie terrestre originan lo que se conoce como el clima. Aunado a esto, los distintos procesos dinámicos y termodinámicos entre la atmósfera, el océano y la tierra, finalmente darán origen a lo que se conoce como el estado del tiempo o estado meteorológico. Distintos factores, tales como la altitud, la latitud, la proximidad a los océanos, a los continentes, y otros, tienen un efecto importante en el balance de radiación y en el control del clima y de la meteorología en cada región del mundo.

Como hemos comentado, la energía solar es energía de radiación que se propaga por ondas electromagnéticas de distintas longitud de ondas y estas se caracterizan en términos de longitud de onda, de la frecuencia o del número de onda, la frecuencia,  $\nu$ , se puede definir como el cociente de la velocidad de propagación de la radiación electromagnética dividida por su longitud y el número de ondas es la inversa de su longitud, en la radiación solar los espectro de ondas que mayoritariamente intervienen son parte del visible y del ultravioleta e infrarrojo ,es decir longitudes de onda entre 0.1 y 4 micrómetros.

El primer científico ,que se planteó, porque la tierra no es tan fría como el espacio que la rodea, fue Fourier (1768-1822) y aunque su aportación a la ciencia más importante fue su análisis de Fourier, base matemática de buena parte de la física teórica y experimental ,lo citamos por haber sido autor de "Theorie Analytique de la Chaleur" iniciada en el 1804 ,presentada en Institut de France en 1807 y publicada al final de su vida, libro que contiene

las matemática de la teoría analítica del calor y fundamental para la historia de la ciencia; hombre de multitud de inquietudes, estudio la difusión del calor en la Tierra ,siendo este tema una de las principales razones que le llevaron a establecer su teoría, estudio las variaciones de temperatura diurnas así como las estacionales y determino que el planeta era más cálido de lo que uno esperaría si la única fuente de calor fuera la radiación solar, por lo menos si la Tierra podía volver a radiar hacia el espacio la mayor parte de esta radiación. La Tierra debía tener, pues una especie de cobija, una manta aislante, y Fourier dedujo que la capa terrestre del aire, que nos protege del rigor del espacio en muchos aspectos, debía de ser lo que actuaba como ese aislante.

El Sol es un cuerpo negro, por tanto, la luz de los colores que emite depende de la temperatura. Debido a su alta temperatura de 5800 grados Kelvin, en la superficie, emite luz en muchos colores o longitudes de onda y como ya hemos comentado, principalmente en el visible y el ultravioleta pero también un poco en el infrarrojo, el clima de la Tierra está gobernado por la Primera Ley de la Termodinámica y se rige por un principio simple “ la cantidad de energía que entra en un sistema debe ser igual que sale” y como es evidente, la mayor parte de la energía que llega a nuestro sistema proviene del sol. A continuación explicaremos el balance energético de la Tierra ,lo haremos con el aparato matemático imprescindible ,pero, si debemos citar las leyes que lo rige y sus autores que fueron los que permitieron, que a principio del siglo XX ,que la radiación Solar fuera bien conocida, entre ellas ,Ley de Stefan-Boltzmann ,que establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total proporcional a la cuarta potencia de la temperatura (1879),Ley de Plank (1900) que describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico en una temperatura definida ,de modo que la intensidad de la radiación depende de la longitud de onda y de la temperatura y la ley de Wein (1890) que determina el pico máximo de emisión de una onda es función de una constante dividida por la temperatura de emisión del cuerpo negro.

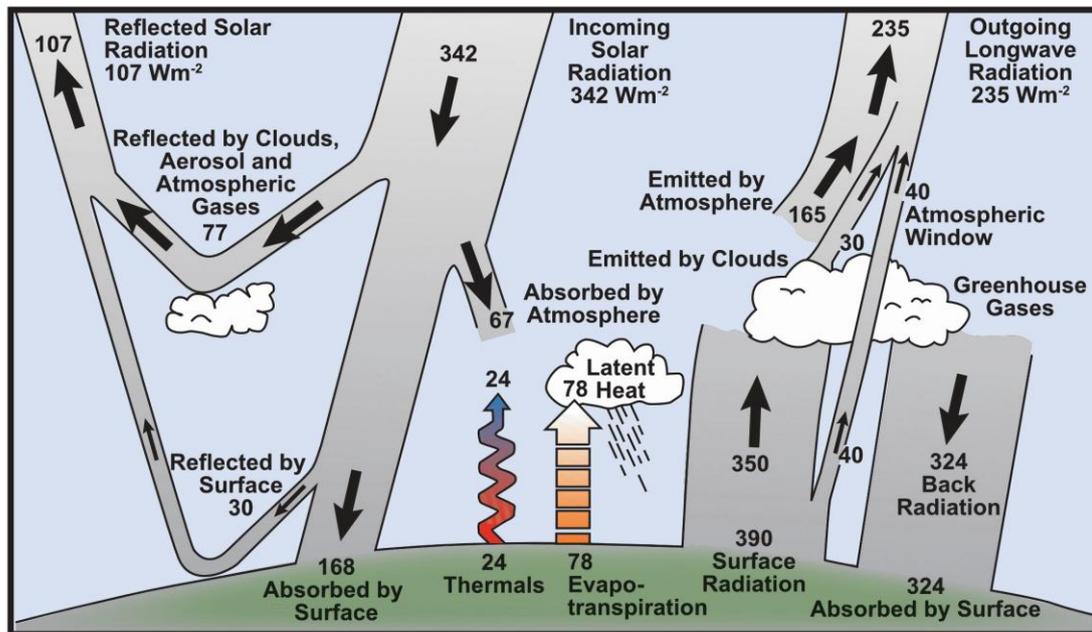
La radiación emitida por el Sol es (ley de Stefan-Boltzman) de 3.86 por diez elevada a la veintiséis potencia, esta energía se emite en todas las direcciones de forma homogénea repartiéndose en una esfera, cuyo tamaño crece con la distancia al Sol, por lo que si consideramos que la distancia Sol-Tierra y dividiendo la energía total por esta área obtenemos un flujo promedio de energía Solar en las proximidades de la Tierra, es de 1368 W por metro cuadrado (llamada constante solar),teniendo en consideración que la constante solar, se mide en la dirección perpendicular a los rayos incidentes del Sol y que la mayor parte de la Tierra ,no lo es,la intensidad recibida es menor de manera que se puede calcular que solo una cuarta parte es la energía incidente por unidad de área ,es decir  $1368/4=342$  W por metro cuadrado. La palabra albedo se deriva de la raíz latina albus que significa blanco, de tal manera que el albedo de un cuerpo es su capacidad de reflejar la luz. La radiación solar que llega a la tierra es intensamente reflejada por los cuerpos claros o blancos ,tales como las nubes ,el agua ,la nieve ,el hielo, los desiertos y las planicies; mientras los cuerpos opacos tales como los bosques ,las selvas y las ciudades, son relativamente malos reflectores de la luz ,por lo que teniendo en consideración unos y otros se puede calcular que el albedo es en un 30% de la radiación incidente de modo que esta, es del orden de 100 y como la incidente es de 342 pues la radiación absorbida es de 240 W por metro cuadrado

Ahora, estamos en situación de calcular la temperatura de equilibrio de la Tierra, según energía recibida y emitida:

Energía que llega a la Tierra en cada segundo procedente del Sol será la constante solar multiplicada por  $(1-\text{albedo}) = (1-0.3)$  multiplicada por el área del círculo máximo, valor que es 10 elevado a la diecisiete es decir 100000 tetra vatios de potencia.

Según la ley de Stefan-Boltzman, la Tierra ,radia por toda su superficie por lo tanto la energía emitida será la superficie de la Tierra multiplicada por la constante de SB y la temperatura de equilibrio y si esto lo igualamos a 10 elevado a 17, la temperatura resultantes es de 255 grados Kelvin, es decir -18 grados centímetros, por lo que la tierra tendría que estar congelada y no lo está ,la razón está en el efecto invernadero producido por la atmosfera que es casi transparente a la radiación visible la mayoría de la radiación solar emitida por el Sol ,al estar este a una temperatura de 5800 grados Kelvin se emite en el espectro visible ) y sin embargo la radiación solar reflejada por la tierra con una temperatura de 288 grados Kelvin se emite en el espectro del infrarrojo y la atmosfera, AL NO SER transparente a esta radiación ,lo que produce el efecto invernadero natural.

El efecto invernadero se puede explicar suponiendo que hay vidrio entre el suelo (atmosfera) y el espacio, al mismo, le llegara la radiación solar de onda corta (PS) que lo atraviesa (espectro visible) al 100%,esta radiación calienta la Tierra hasta una temperatura TS, que se remite al espacio como radiación de onda larga (PI),la lámina, absorbe una fracción X de esta radiación, se calienta y emite PA en ambas direcciones, el equilibrio se alcanza con los flujos en ambas direcciones  $PS=(1-X)TS +PA$  y tambien  $PS=TS-PA$  ,despejando ambas ecuaciones y como TS ,según la ley de SB, es igual a una constante por la temperatura elevada a la cuarta potencia ,despejando esta temperatura a la cuarta potencia es igual a PS y dividiendo resulta que la temperatura media es 16 grados Celsius (la temperatura media resultante será mayor o menor en función del valor de la fracción X supuesta ,la radiación de energía es del orden de 390 W metro cuadrado. Estos modelos sencillos de la radiación solar, resultantes de los primeros avances tecnológicos de final del siglo XIX e inicios del veinte han sido confirmados por los sistemas actuales de medición directa de la radiación solar, durante los últimos cincuenta años, en resumen : existe una radiación solar emitida, transportada a través de ondas electromagnéticas mayoritariamente del espectro visible, que, atraviesan la atmosfera ,la Tierra ,se calienta y refleja el calor a través de ondas electromagnéticas del espectro ultravioleta (debido a la temperatura de la Tierra) y parte de las mismas son reflejadas por la atmosfera (que no es transparente a dicho espectro ) dando lugar al efecto invernadero.



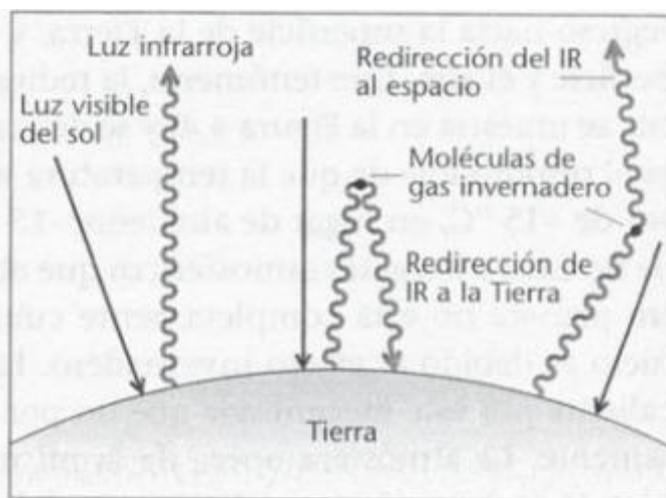
FAQ 1.1, Figure 1. Estimate of the Earth's annual and global mean energy balance. Over the long term, the amount of incoming solar radiation absorbed by the Earth and atmosphere is balanced by the Earth and atmosphere releasing the same amount of outgoing longwave radiation. About half of the incoming solar radiation is absorbed by the Earth's surface. This energy is transferred to the atmosphere by warming the air in contact with the surface (thermals), by evapotranspiration and by longwave radiation that is absorbed by clouds and greenhouse gases. The atmosphere in turn radiates longwave energy back to Earth as well as out to space. Source: Kiehl and Trenberth (1997).

- **Medición de la concentración de CO<sub>2</sub> y su relación con el incremento de la temperatura**

La siguiente pregunta que es necesario responder es explicar porque la atmosfera tiene capacidad de absorber parte de esta energía reflejada por la Tierra y que componentes de esta tienen esta capacidad. Comencemos por recordar la composición química de la atmosfera y sus proporciones. La atmosfera está compuesta por para capas ,Troposfera, Estratosfera, Mesosfera, Mesosfera y Exosfera el límite superior de la Exosfera, la región más distante ,alcanza aproximadamente los mil kilómetros de distancia y es la zona de tránsito hasta el espacio interplanetario ,la capa más próxima a la tierra (donde se produce los fenómenos de efecto invernadero) es la Troposfera ,que significa, región de mezclas, y recibe este nombre debido a las corrientes de aire que ocurren en la misma, se extiende hasta unos diez kilómetros y su altura varía en función de la estación del año ya que es algo más alta en verano que en invierno, tiene el mayor porcentaje de la masa total y la diferencia de su temperatura verticalmente puede ser de hasta seis grados centígrados, la composición química es diferente según los niveles y el noventa y nueve por ciento de la masa se concentra en los primeros cuarenta kilómetros.

Los tres elementos mayoritarios existentes en la atmosfera son el nitrógeno-75.5 %- ,el oxígeno-23,1 %,y el argón-1,28%- del resto solo destacar el vapor del agua- 0-2.5%- y el dióxido de carbono -553ppm.- (atención concentración de masa) y no como relacion de mezcla (número de moléculas de CO<sub>2</sub> /por un numero de moléculas de aire) el resto de los compuestos de la atmosfera son el neón, criptón, helio, hidrogeno y ozono, pero no todas estos compuestos son capaces de absorber energía del espectro del infrarrojos, una molécula absorbe energía cuando la frecuencia de la misma prácticamente coincide con la frecuencia de algún movimiento interno de la misma ,es decir, debe de ser radiación que produzca vibración en los enlaces ,debiendo existir un cambio en el momento dipolar de la molécula, cambio que puede referir bien tamaño o bien localización, la frecuencia de las vibraciones se obtiene de la ley de Hooke, que indica que para muchos tipos de enlaces ,como el C-H , la

frecuencia de tensión no se encuentra en la región del infrarrojo térmico y por tanto para absorber luz IR, la molécula debe tener un momento dipolar durante alguna etapa de su vibración, situación que no se produce ni en el Ar, N<sub>2</sub> o O<sub>2</sub> que no absorben luz IR y sin embargo en el caso del CO<sub>2</sub>, sus moléculas, presentan dos tipos de vibración de tensión simétrica y anti simétrica y durante su vibración antisimétrica, su molécula puede absorber luz IR, de modo que absorben la mitad de la radiación que escapa en las longitudes de onda entre 14 y 16 pico metros y una parte importantísima del rango 12-14 y 16-18, la molécula del agua, absorbe luz IR térmica a causa de la vibración de flexión de H-O-H y esta absorción, ocurre alrededor de 6,3 pico metros, el vapor de agua es el gas de efecto invernadero más importante después del anhídrido carbónico aunque su molécula es menos eficaz en absorción radiante que la del anhídrido carbónico; de la absorción del CO<sub>2</sub> y agua, solo la luz infrarroja comprendida entre 8 y 13 es esencialmente la que escapa por la ventana del espectro.



Hace 150 años, el miércoles 18 de mayo de 1859, después de un día entero de trabajo en el laboratorio del sótano de la Royal Institution en el centro de Londres, el científico irlandés John Tyndall, de 38 años, escribió en su diario: Experimenté todo el día; ¡el tema está completamente en mis manos! Tyndall había estado experimentando con las propiedades absorbentes de los gases y vapores con vistas a probar la idea de que los diferentes gases, que se encuentran comúnmente en la atmósfera de la Tierra, absorben diferentes cantidades de calor radiante (es decir, radiación infrarroja de onda larga). Esta era la idea que el físico Joseph Fourier había articulado más de 30 años antes y sobre la que Claude Pouillet había elaborado más recientemente. Pero nadie había demostrado experimentalmente que tal fenómeno existía. De ser cierta, la idea podría ayudar a explicar cómo se regula la temperatura de este y otros planetas. Los experimentos de Tyndall de mayo de 1859, que luego perfeccionó durante varios años, establecieron por primera vez que las moléculas de gases, como el vapor de agua, el dióxido de carbono y el metano, absorben efectivamente más energía que el oxígeno y el nitrógeno cuando pasan a través de ellas calor radiante. Menos de cuatro semanas después de anunciar el éxito en su diario, el viernes 10 de junio, en una reunión vespertina de la Royal Institution presidida por el príncipe Alberto, el príncipe consorte, John Tyndall ofreció la primera explicación pública y basada en experimentos de lo que se ha dado en llamar el efecto invernadero. Esta base física del calentamiento global antropogénico se estableció seis meses

antes de que Charles Darwin publicara El origen de las especies, que sentó las bases biológicas de la diversidad evolutiva de la vida

El químico sueco Svante August Arrhenius ,primer ganador sueco del premio Nobel en 1903,centro sus actividades inicio en 1896 sus estudios sobre el clima de forma indirecta, ya que lo que él estudiaba el origen de las edades del hielo y como terminan , escribió su primer artículo sobre el tema , explorando como las posibles variaciones periódicas de la atmosfera podían modificar el efecto invernadero (nunca escribió que el incremento del CO<sub>2</sub> en la tierra fuera provocado por el incremento de la actividad industrial ) y ,en consecuencia, tambien la temperatura de la Tierra en intervalos cortos, calculo que radiación infrarroja es absorbida por el dióxido de carbono y el vapor del agua en la atmosfera y estimo que el 70% de la radiación infrarroja que viaja verticalmente hacia arriba era absorbida por la atmosfera de su época, desarrollo un modelo de equilibrio de energía que consideraba los efectos radiactivos del CO<sub>2</sub> y el vapor de agua a temperatura ambiente y estudiando las respuestas del modelo a cambios de concentración del mismo y tuvo en consideración la ley de Stepan sobre la emisiones de radiación ,la de Bort sobre la estimación del albedo de las nubes y las de Angstrom sobre los valores de los coeficientes de absorción del CO<sub>2</sub> y el vapor de agua y la de Buchan sobre las medias de temperatura de todo el planeta ,llegando a la conclusión de que si la cantidad de ácido carbónico aumenta en progresión geométrica ,la temperatura variara en progresión aritmética, de manera que se produciría un incremento de 5 a 6 grados Celsius si se duplicaba la concentración del gas. El artículo de Arrhenius ,se publicó en la revista “The Phisophical Magazine and Journal of Science ,abril 1896,paginas desde la 237 hasta la 276 (tamaño cuartilla) y el titulado “On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground”, estaba dividido en cuatro secciones, la primera “ Introducción: observaciones de Langley sobre la absorción atmosférica”(le sirvió para calcular cuando radiación infrarroja es absorba por el CO<sub>2</sub> y el vapor del agua) ,la segunda “la absorción total por atmosferas de composición variable, la tercera “equilibrio térmico de la superficie y la atmosfera de la tierra ,cuarta “cálculo de la variación de temperatura que se produciría como consecuencia de una variación dada del ácido carbónico en el aire y finalmente la quinta “conclusiones geológicas”, en la introducción cita los trabajos de Fourier y de Tyndall, se pregunta que si la temperatura media del suelo esta de algún modo influida por la presencia de gases que absorben el calor de la atmosfera y responde que según los trabajos de Pouillet y Langey esta sería de -20 grados Celsius, en las partes segunda y tercera describe una parte importante de la teoría de la radiación solar expuesta anteriormente ,siendo la parte que ha pasado a la historia , la tabla ,contenida en la parte cuarta ,sobre, el incremento que se produce en la temperatura del planeta cuando se incrementa la concentración del ácido carbónico , que reproducimos, y con la cual ,se aproximó ,cien años antes y con errores ,a las mediciones reales del CO<sub>2</sub> en la atmosfera que inicio Keeling y a las mediciones con métodos más sofisticados como satélites espaciales.

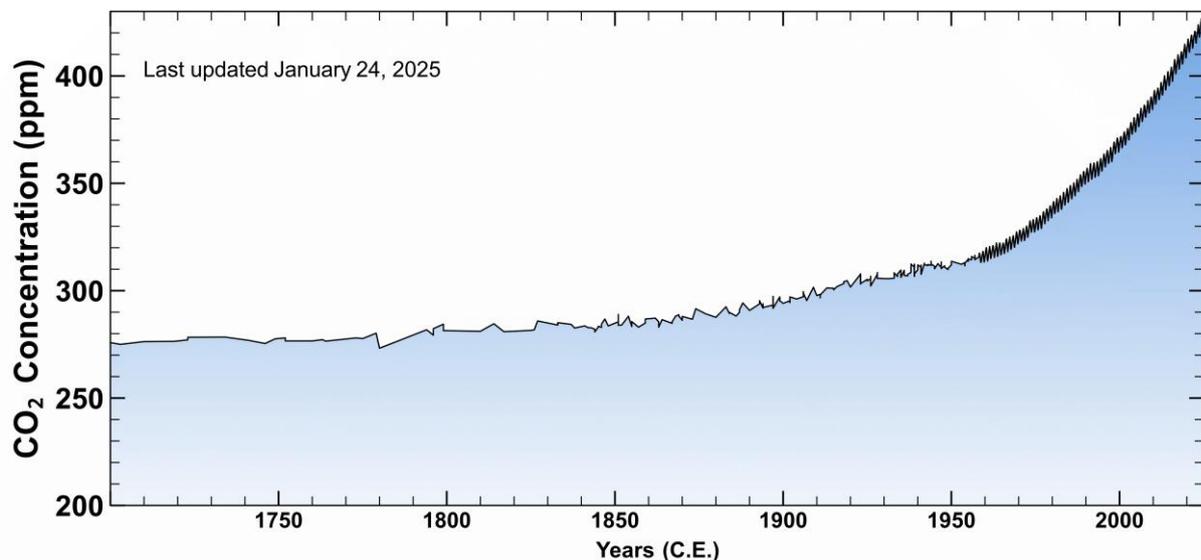
TABLE VII.—Variation of Temperature caused by a given Variation of Carbonic Acid.

Latitude.	Carbonic Acid=0.67.					Carbonic Acid=1.5.					Carbonic Acid=2.0.					Carbonic Acid=2.5.					Carbonic Acid=3.0.				
	Dec.- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.	Dec.- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.	Dec.- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.	Dec.- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.	Dec.- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.
70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.52	6.0	6.1	6.0	6.1	6.05	7.9	8.0	7.9	8.0	7.95	9.1	9.3	9.4	9.4	9.3
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62	6.1	6.1	5.8	6.1	6.02	8.0	8.0	7.6	7.9	7.87	9.3	9.5	8.9	9.5	9.3
50	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	-3.3	3.7	3.8	3.4	3.7	3.65	6.1	6.1	5.5	6.0	5.92	8.0	7.9	7.0	7.9	7.7	9.5	9.4	8.6	9.2	9.17
40	-3.4	-3.4	-3.2	-3.3	-3.32	3.7	3.6	3.3	3.5	3.52	6.0	5.8	5.4	5.6	5.7	7.9	7.6	6.9	7.3	7.42	9.3	9.0	8.2	8.8	8.82
30	-3.3	-3.2	-3.1	-3.1	-3.17	3.5	3.3	3.2	3.5	3.47	5.6	5.4	5.0	5.2	5.3	7.2	7.0	6.6	6.7	6.87	8.7	8.3	7.5	7.9	8.1
20	-3.1	-3.1	-3.0	-3.1	-3.07	3.5	3.2	3.1	3.2	3.25	5.2	5.0	4.9	5.0	5.02	6.7	6.6	6.3	6.6	6.52	7.9	7.5	7.2	7.5	7.52
10	-3.1	-3.0	-3.0	-3.0	-3.02	3.2	3.2	3.1	3.1	3.15	5.0	5.0	4.9	4.9	4.95	6.6	6.4	6.3	6.4	6.42	7.4	7.3	7.2	7.3	7.3
0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.0	-3.02	3.1	3.1	3.2	3.2	3.15	4.9	4.9	5.0	5.0	4.95	6.4	6.4	6.6	6.6	6.5	7.3	7.3	7.4	7.4	7.35
-10	-3.1	-3.1	-3.2	-3.1	-3.12	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	5.0	5.0	5.2	5.1	5.07	6.6	6.6	6.7	6.7	6.65	7.4	7.5	8.0	7.6	7.62
-20	-3.1	-3.2	-3.3	-3.2	-3.2	3.2	3.2	3.4	3.3	3.27	5.2	5.3	5.5	5.4	5.35	6.7	6.8	7.0	7.0	6.87	7.9	8.1	8.6	8.3	8.22
-30	-3.3	-3.3	-3.4	-3.4	-3.35	3.4	3.5	3.7	3.5	3.52	5.5	5.6	5.8	5.6	5.62	7.0	7.2	7.7	7.4	7.32	8.6	8.7	9.1	8.8	8.8
-40	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	-3.37	3.6	3.7	3.8	3.7	3.7	5.8	6.0	6.0	6.0	5.95	7.7	7.9	7.9	7.9	7.85	9.1	9.2	9.4	9.3	9.25
-50	-3.2	-3.3	—	—	—	3.8	3.7	—	—	—	6.0	6.1	—	—	—	7.9	8.0	—	—	—	9.4	9.5	—	—	—
-60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

266 Prof. S. Arrhenius on the Influence of Carbonic Acid

En el anterior artículo sobre cambio climático escrito en numero 241 de Cerveza y Malta ,cite los trabajos de Stewart Callendar y las mediciones de David Keeling sobre mediciones de las concentraciones de CO2 en la atmosfera en su ya su famosa curva de Keeling sobre las mediciones en la estación de Mauna Loa en Hawai ,lugar considerado el mejor medidor en la atmosfera ya que el observatorio está rodeado de lava desnuda ,situado a 3400 metros sobre el nivel del mar ,sin vegetación y a mucha distancia de las emisiones del mismo producida por el efecto humano, por lo que no incluimos comentarios adicionales y si haremos una lista muy abreviada de científicos que trabajaron en temas del cambio climático durante el siglo XX, además de los incluidos ,en 1938 Gy Stewart ,sugiere que el planeta está presentando un calentamiento por el incremento de la concentración del CO2,en 1941 Hermann Flohn ,publica que la influencia antropogénica, producto de la actividad humana ,está influyendo en el cambio climático planetario, en 1954 ,el inglés Evelyn Hutchison ,es el primero a postular que la desfloración, provoca el aumento de la concentración del anhídrido carbónico en la atmosfera ,en 1958 David Keeking ,se esforzó en la medición de la concentración del CO2,en 1971 ,el estudio de Mans impact on climate ,concluye que hay un gran potencial de peligro por el cambio climático ,causado por el hombre (con una concentración de CO2 de 326 ppm),en 1975, Wallace Broecker en un estudio en la revista Science con el texto “Cambio Climático:¿estamos al borde de un calentamiento global pronunciado ?introduce el termino de Calentamiento Global, todos estos estudios ,y otros más, tienen como consecuencia la aparición del PNUE (Programa de las naciones Unidas para el cambio climático) que recomienda establecer un tratado para luchar contra el cambio climático, y terminando aquí este breve enunciado ya que la continuación ya fue escrita en el artículo de referencia. En el anterior artículo ,aunque comentamos los trabajos de Keeling sobre la medida de la concentración del carbónico en la atmosfera ,no incorporamos las gráficas de las mismas ,que incluimos ahora, en la misma se expresan las concentraciones de CO2 desde 1960 hasta el 2025 que han variado desde 320 ppm hasta 430 aprox ,es decir del 34 % superiores ,pero sin embargo, si calculamos la

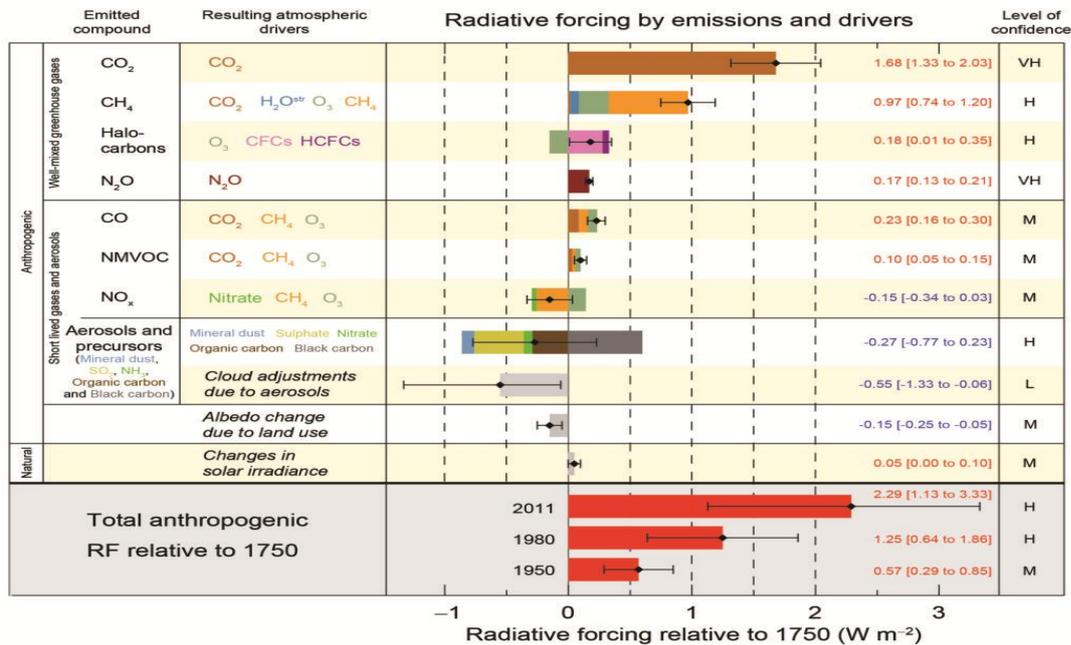
cantidad absoluta emitido a la atmosfera en peso en Gt (mil millones de toneladas) ,la cantidad total es de unas cinco veces ,la razón es que parte de este CO2 se puede disolver en el agua, transformándose en ácido carbónico, el primer año que aparecen mediciones es el 1958 y es una pregunta razonable es preguntarse si es posible conocer las mediciones en épocas anteriores, siendo la respuesta positiva ,ya que al igual que la información sobre el clima que nos ofrecen los anillos de los árboles o las capas de las rocas sedimentadas, en los lugares que permanecen nevados todo el tiempo ,el hielo se va depositando a medida que nieva con patrones diferentes en invierno y verano y al existir en el mismo burbujas de aire ,si medimos su composición podemos conocer la concentración del carbónico, por lo que presentamos las curva de Keeling actual y las realizadas a través de testigos de hielo a partir de 1700 y la que representa valores desde 800000 años (datos que se pueden obtener en la página webs de la UC San Diego ,Scripps Institution of Oceanography ),y para terminar adjuntamos también la gráfica de la emisiones de CO2 en peso emitidas desde 1960 ,resumiendo, con estas graficas se pueden asegurar, que las concentraciones de la época actual ,no tienen precedentes desde cerca de un millón de años



- **Forzamiento radiactivo**

El concepto de forzamiento radiactivo (FR) fue definido por V Ramaswamy (2001) como “el cambio de la irradiación neta, expresada en W por metro cuadrado, en la Tropopausa (zona de transición entre la troposfera y la estratosfera, donde no disminuye la temperatura con la altitud) después de permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten el equilibrio radiactivo, pero permaneciendo fijas, en sus valores no perturbados, las temperaturas de superficie y troposfera” se puede relacionar empíricamente con el cambio de la temperatura media global de equilibrio, siguiendo una ley lineal, de modo que el incremento de temperatura inicial es igual a un parámetro denominado “sensibilidad climática “ multiplicado por el incremento de temperatura final, teniendo este parámetro un valor casi invariable, para un valor convencional, para el conjunto de datos experimentales fidedignos de la evolución de los forzamientos medios globales, causados por perturbaciones antropogénicas de gases invernadero y otras variantes (albedo ,nubes etc) el FR neto total del clima ,ha sido, entre los años 1750 y 2005 , de 1.6Wm<sup>2</sup> para un incremento inicial de temperatura de 0.8 grados K, y en la gráfica siguiente se representa el RF desde 1750 hasta 2007 (IR5) del conjunto de los

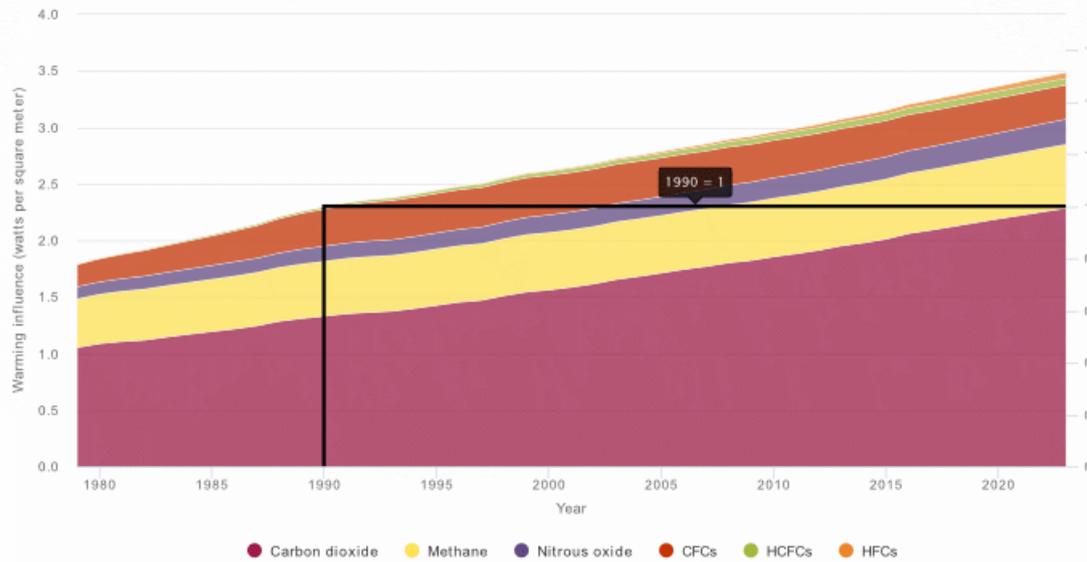
gases antropogénicos y naturales y como se observa en la gráfica existe un FR para cada gas independiente. En la parte inferior de la gráfica, incluye el FR total (incluido todos los gases) desde 1750 y como se ha incrementado el mismo pasando de valores de 0.53 a 2.29



Cuando la energía del sol llega a la Tierra, el planeta absorbe parte de esta energía e irradia el resto al espacio en forma de calor. La temperatura de la superficie de la Tierra depende de este equilibrio entre energía entrante y saliente. Las condiciones promedio tienden a permanecer estables a menos que la Tierra experimente una fuerza que cambie el equilibrio energético. Un cambio en el mismo hace que la temperatura promedio se vuelva más cálida o fría, lo que lleva a una variedad de otros cambios en la atmósfera inferior, en la Tierra y en los océanos. Una variedad de cambios físicos y químicos pueden afectar al equilibrio energético global y forzar cambios en el clima de la Tierra, algunos de estos cambios son naturales, mientras que otros están influenciados por los seres humanos, estos cambios se miden por la cantidad de calentamiento o enfriamiento que pueden producirlo que se denomina FR

La siguiente figura mide el FR total promedio de 22 gases de efecto invernadero de larga duración, entre ellos el dióxido de carbono, metano y el óxido nítrico. Los resultados fueron calculados por La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EEUU, basándose en las concentraciones medias de los gases en la atmósfera, en comparación con las concentraciones que había alrededor de 1750, antes que comenzara la Revolución Industrial. Debido a que cada gas tiene una capacidad diferente para absorber y emitir energía, este indicador convierte los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero en una media del forzamiento radiactivo total causado por cada gas. En la parte derecha de la gráfica se introduce un valor de índice Anual de Gases de Efecto Invernadero, este número compara el FR de un año en particular con el mismo en 1990, ya que es el año de referencia común para los acuerdos de seguimiento internacionales.

Figure 1. Radiative Forcing Caused by Major Long-Lived Greenhouse Gases, 1979- 2023

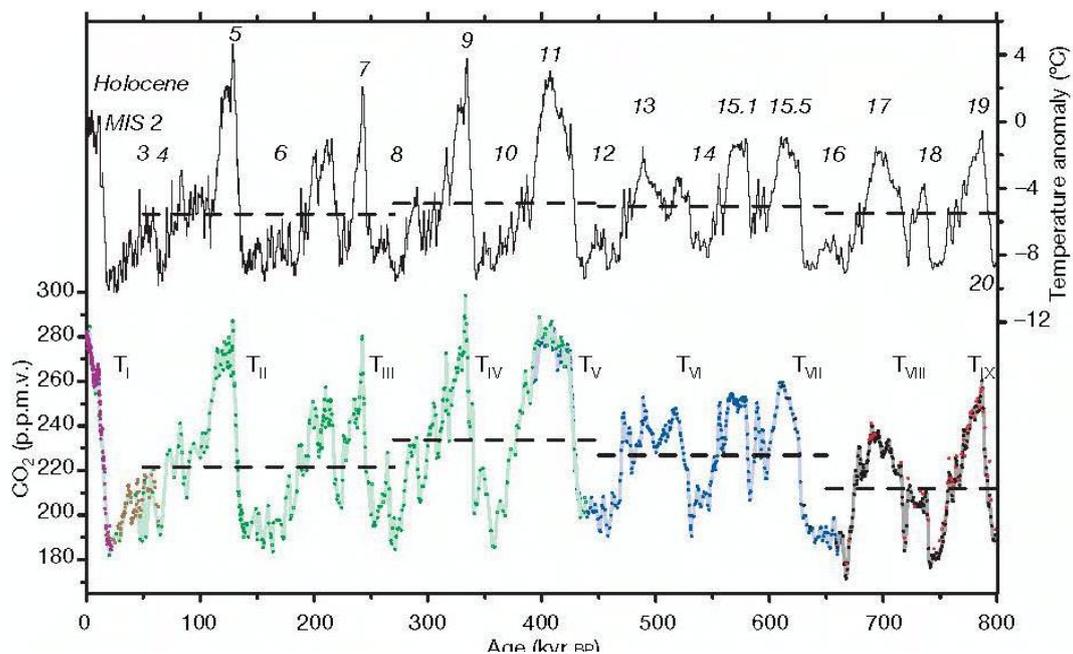
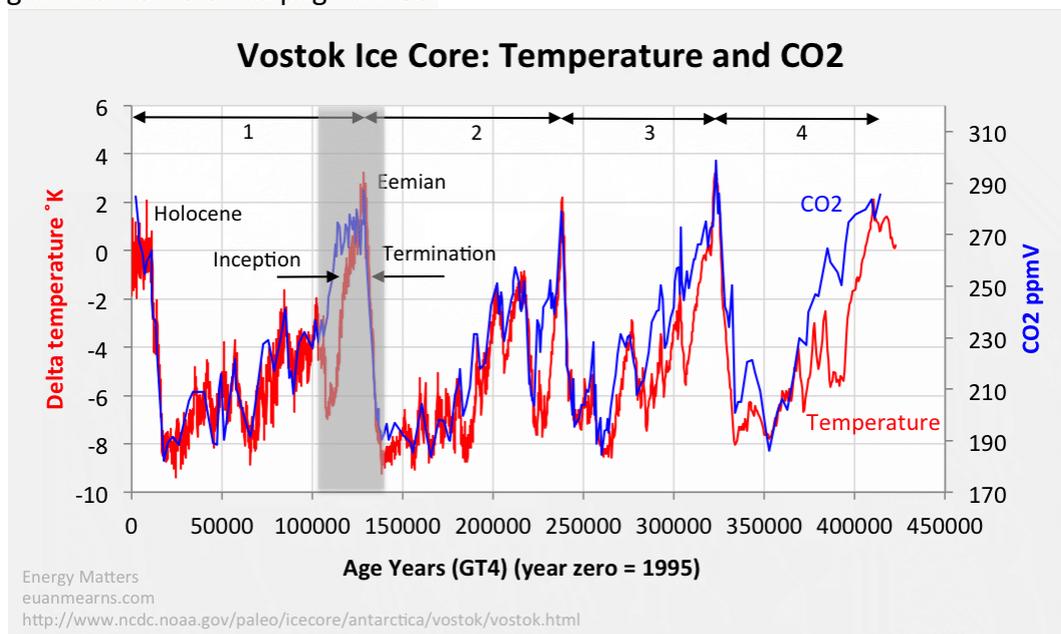


¿Porque el indicador de FR se utiliza, casi exclusivamente, para las simulaciones informáticas de los modelos de previsión climática? Si volvemos a los descubrimientos de Arrhenius, recordaremos que a partir de datos aproximados e incompletos, basados en la física de la radiación obtuvo una regla general que relacionaba la abundancia de CO<sub>2</sub> en la atmosfera con la temperatura superficial global de la Tierra, los mejores datos obtenidos de después de cien años, de la teoría de la absorción espectral del carbónico, así como nuevos modelos de simulación, la relación funcional que obtienen los climatólogos es básicamente la misma, pero con un factor de proporcionalidad que es, como máximo, de unas dos veces menor. Dado que la absorción por CO<sub>2</sub> afecta directamente al equilibrio radiativo en la parte superior de la atmosfera, es más sencillo y directo obtener, no una relación funcional entre la abundancia de CO<sub>2</sub> y la temperatura, como hizo Arrhenius, sino, entre la abundancia de CO<sub>2</sub> y el forzamiento radiativo. Esta es la forma en que se suele expresar la cuestión hoy en día, ya que una vez que se han determinado los términos del FR, se pueden usar los modelos climáticos para la determinar el cambio en la temperatura superficial de la Tierra, así como otros cambios referidos al clima. M. Krauss "The Physics of Climate Change 2001, capítulo 6 (M. Krauss "The Physics of Climate Change" 2021).

M. Krauss, capítulo 6, calcula el FR del CO<sub>2</sub> para pasar de una concentración de 300 ppm a una final de 600 y alcanza el valor de FR=3,36-4.05W/m<sup>2</sup>, y se pregunta, cómo se ajusta este valor a la predicción de Arrhenius, para ello debe transformar el FR en un incremento de temperaturas superficial y advirtiendo que no es una derivación directa y sencilla y después de plantear algunas estimaciones, alcanza, el valor para la duplicación de concentración, alcanza un grado Celsius y advirtiendo que es bastante conservadora indica que usando modelos más sofisticados el FR predicho, es del orden de 07-08, lo cual sugiere que el cambio de la temperatura media para la superficie terrestre, en la condición de duplicación de la concentración sería del orden de 2.5-3.5 grados Celsius

Para terminar, recordemos que los testigos obtenidos del hielo, permitieron el cálculo de las concentraciones de carbónico en épocas geológicas y también permiten calcular las

temperaturas en la edad geológica debido a la existencia, en el agua, de dos isotopos, el primero el hidrogeno pesado ,el deuterio y el segundo el isotopo pesado del oxígeno O18;al ser más pesados necesitan más energía para su evaporación en los océanos por lo que su estudio y por tanto el estudio de sus proporciones en periodo más fríos o más cálidos ,su desaparición será distinta, y permiten el cálculo de las temperaturas de las épocas que representa los testigos, para ello se han estudiado dos testigos importantes ,ambos en la Antártida ,uno el testigo e hielo de Vostok y otro el testigo de hielo Dome C ,también de la Antártida, la primera grafica adjunta esta obtenida de la página web del National Center for Environmetal Information ,respecto a la segunda apareció en un artículo publicado por Dieter Luthi y otros, en la revista Nature ,volumen 453 ,15 de mayo 2008,titulado “High –resolution carbón dioxide concentración récord 650-800000 years before present ,articulo ,que es uno de los más leídos ,relacionado con estos asuntos, de modo, que Nature termino por ofrecerlo gratuitamente en su página web.



A modo de resumen, la aparición en el final del siglo XIX de las leyes de Stefan-Boltzmann, Planck, Wien, los trabajos de Fourier, Tyndall, Arrhenius y Kirchhoff, el descubrimiento de la composición química del aire y la estructura de sus componentes, el primer principio de la termodinámica, entre otros, permiten formular los conocimientos de la radiación solar a través de energía transmitida por ondas electromagnéticas de espectro diferente en la emisión de la energía solar (espectro visible) casi transparente a través de la atmósfera, la absorción de dicha energía por la Tierra y la remisión al espacio a través también de ondas electromagnéticas del espectro ultravioleta que son absorbidas en parte por el CO<sub>2</sub> y el vapor de agua, presentes en la atmósfera de manera que la temperatura media de la Tierra, en esta época, es del orden de quince grados, posteriormente, los trabajos de Keeling, permiten conocer cuál es la concentración pasada y actual del CO<sub>2</sub> en la Tierra, como se ha incrementado en la época actual y a partir de aquí se podrá valorar si hay un CC en el siglo XX y XXI, y sus causas, pero lo que ninguna persona puede poner en duda, es, que existe una ciencia climática, a partir de final del siglo XIX, base, para el estudio de la transformación del clima, en nuestra época actual, cuyas bases científicas, han sido comprobadas y ratificadas, por miles de comprobaciones en nuestro siglo actual.