

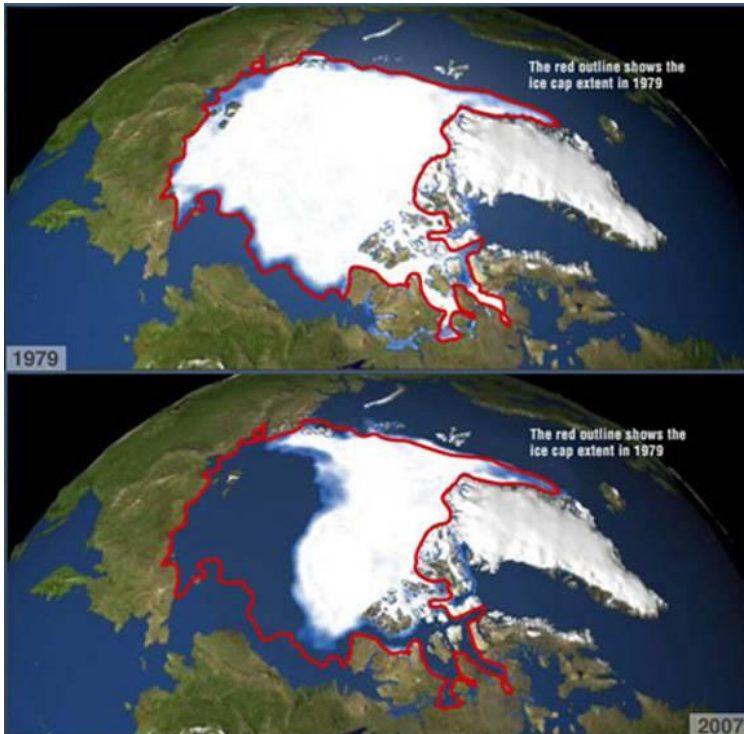
Autor: Javier Colomo Ugarte

Año 2007 / actualizado febrero 2013

TÍTULO:

Los probables impactos climáticos, derivado de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero

En el desarrollo de la sociedad armónica con el medio ambiente está el futuro de la humanidad



TEMARIO

Introducción

1 Incremento acumulado de CO₂ en el aire atmosférico en (Mt / año), en (ppm / año), y forzamiento radiativo (W/m² / año)

1.1 Acumulación de los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera

1.2 Absorción de CO₂ por los océanos y la biomasa

1.3 Incremento acumulado de CO₂ en el aire atmosférico en (Mt / año) y en (ppm / año), y forzamiento radiativo (W/m² / año) hasta el final de los combustibles fósiles

2 Los probables efectos climáticos derivados las emisiones de gases de efecto invernadero

2.1 El Forzamiento radiativo y el ascenso de las temperaturas en el ciclo térmico diario

2.2 Estimación de las variaciones térmicas en diferentes ambientes climáticos terrestres según el aumento de las ppm de CO₂ en el aire atmosférico

2.3 Incremento del promedio anual de las temperaturas mínimas hasta el final de las reservas probadas de combustibles fósiles del año 2005

2.4 La subida del nivel de los océanos por la desglaciación

2.3 El incremento térmico climático y su influencia en la circulación general atmosférica

Introducción

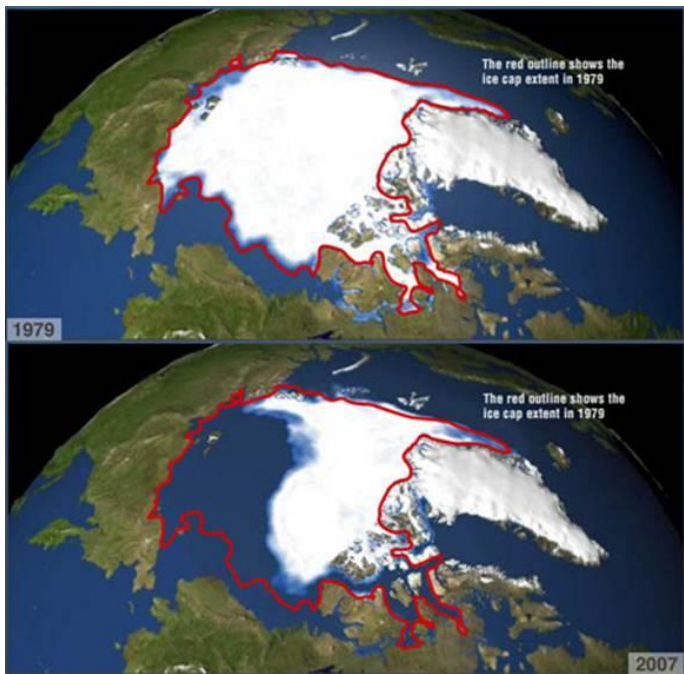
El presente estudio se orienta a cuantificar el impacto que la libre emisión de gases de efecto invernadero (que el vigente modelo económico competencial mundial impone), puede tener en el aire atmosférico, y que puede durar hasta la finalización de las reservas probadas de combustibles fósiles en el año 2005, al terminar el presente siglo.

Los impactos más importantes van a venir determinados por la elevación media de la temperatura mínima nocturna, siendo mayor esta elevación en la medida que los promedios de temperatura mínima son más bajos, afectando por lo tanto de manera más importante a los climas más fríos, favoreciendo el deshielo en los polos y los glaciares de alta montaña. A su vez, con el calentamiento global se está produciendo el ajuste de las masas térmicas de aire que regulan la circulación atmosférica, dando lugar en el hemisferio norte a grandes vaguadas en altura con gran profundidad meridional y dorsales con gran profundidad septentrional y a la inversa en el hemisferio sur. Este ajuste de las masas térmicas de aire, que probablemente durará el tiempo que dure el calentamiento térmico de la tropopausa por la emisión de gases de efecto invernadero, ocasionan con frecuencia fenómenos meteorológicos extremos.

Los probables impactos climáticos, derivado de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero

Consecuencias por el cambio térmico climático

Reducción del hielo en las regiones polares



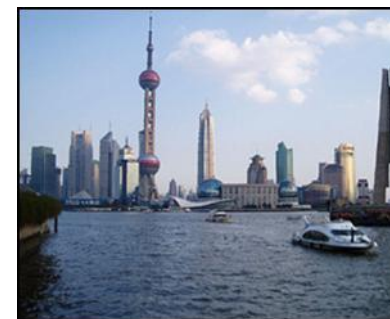
Extinción de los glaciares de Montaña



Cambio del régimen de los ríos pluvionivales



Riesgo de incremento del nivel del mar para finales del siglo XXI



Fenómenos meteorológicos extremos por el ajuste de las masas térmicas que regulan la circulación atmosférica

Inundaciones extremas



Sequías prolongadas



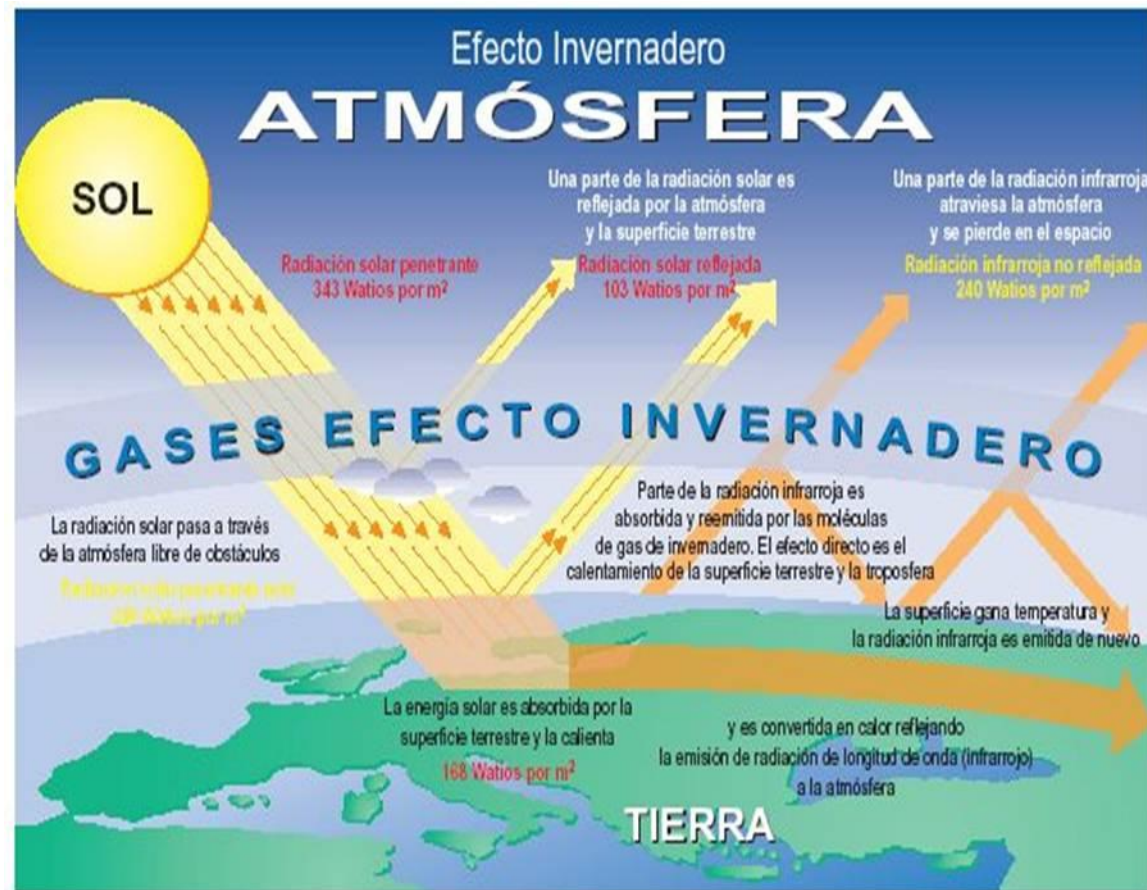
Huracanes de fuerza desconocida



Elaboración propia.

1 Incremento acumulado de CO₂ en el aire atmosférico en (Mt / año), en (ppm / año), y forzamiento radiativo (W/m² / año)

Tal y como se desarrolla el ciclo diario térmico terrestre las temperaturas diurnas y nocturnas se atienen a dos aspectos básicos; en el caso de las diurnas, a la absorción y reflexión de la radiación solar por la superficie terrestre y distintos componentes de la atmósfera, dependiendo ello, de la latitud y estación del año, y en el caso de las nocturnas, a la capacidad de estos mismos elementos para retener durante la noche parte del calor recibido durante el día.



Fuente: UNEP -GRID-Arendal.

De la radiación solar que llega a la Tierra se considera que el 31% es, reflejada de nuevo hacia el espacio exterior, el resto es absorbida por la tierra y reemitida de nuevo en longitudes de onda superiores a la entrante.

La dinámica de la atmósfera, océanos y distintas capas terrestres permite una redistribución de la energía capturada. Las superficies de océanos y continentes pierden constantemente energía irradiando en diversas longitudes de onda larga dependiendo éstas de sus respectivas temperaturas.

La radiación de onda larga emitida por la superficie terrestre hacia la atmósfera es casi ignorada por gases elementales como el oxígeno o el nitrógeno que son prácticamente transparentes a la radiación térmica, pero es absorbida y vuelta a emitir en todas direcciones, por los gases de la atmósfera terrestre con propiedades de opacidad para absorber la radiación en longitudes de onda larga (especialmente vapor de agua, dióxido de carbono, metano, clorofluorocarbonos y ozono), midiéndose esta irradiación atmosférica en W/m^2 .

La presencia de estos gases reduce la pérdida de calor de la superficie terrestre hacia el espacio exterior.

Y el incremento de estos gases por causas antropogénicas provoca una mayor concentración de los mismos dotándoles de una mayor opacidad a la radiación emitida en longitudes de onda larga de rango menor a las precedentes históricas, y por lo tanto contribuye a un incremento de la energía acumulada.

Esta característica ha venido a denominarse por la Organización Meteorológica del Mundo (WMO)¹ en el Panel Intergubernamental del Cambio del Clima (IPCC) como “forzamiento radiativo” expresado en (W/m^2) , tal y como se puede ver en el **Cuadro 1** donde se presenta los datos del incremento en la atmósfera de éstos gases en Partes por Millón de Partes iguales (PPM) o número de moléculas en un millón de moléculas de aire, procedimiento utilizado para determinar la concentración de una sustancia química en el aire atmosférico.



¹ Reconociendo el problema del cambio global potencial del clima, la Organización Meteorológica del Mundo (WMO) y el Programa del Ambiente de Naciones Unidas (UNEP) establecieron el panel intergubernamental en el cambio del clima ([Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC](#)) en 1988, Está abierto a todos los miembros de la ONU y WMO.

Cuadro 1

Forzamiento radiativo desde el inicio de la era industrial

Gas de efecto Invernadero	Concentración 1750	Concentración 1992	Concentración 1999	Incremento fuerza Irradiativa (W/m ²) respecto de 1750	Contribución al forzamiento radiativo (%)
Dióxido de Carbono	280 ppm	355 ppm	367 ppm	1,56	59,80%
Metano	0,80 ppm	1,72 ppm	1,77 ppm	0,5	19,20%
Oxido Nitroso	0,275 ppm	0,310 ppm	0, 460 ppm	0,1	3,80%
CFC-11	0	280 pptv	Regulado el protocolo de Montreal 1989	0,3	Todos los CFCs
CFC-12	0	484 pptv			
HCFCs/HFCs	0	Sin datos		0,05	1,90%
Ozono Troposférico	Sin datos	Variable	Variable	0,2	-0,6
Ozono Estratosférico	Sin datos	300 unidad dobson		-0,1	-3,80%
Total				2,61	(W/m²)

Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Considerando que el CO₂ es el gas que más contribuye al forzamiento radiativo con el 59,80% del total. Este valor porcentual, se toma de referencia porcentual constante, en la contribución al forzamiento radiativo, respecto del total de emisiones de gases de efecto invernadero. De tal manera, que para las proyecciones de variación del forzamiento radiativo (W/m²), la contribución al mismo, se divide en dos categorías, 59,8% atribuible a las emisiones de CO₂, y 40,2% al resto de gases de efecto invernadero.

Esta división se puede realizar porque, en el modelo energético vigente desde la revolución industrial, existe una estrecha relación entre los volúmenes de emisión de los gases de efecto invernadero, particularmente de los dos gases que más contribuyen al forzamiento radiativo (W/m²), el Dióxido de carbono (CO₂) y el Metano (CH₄). Por ejemplo, considerando las ppm de ambos gases en los años 1750, 192 y 1999, la correlación es igual a: $r = 0,99$, lo que explica el incremento de un gas en función del otro en el: $r^2 (\%) = 99,3\%$, como se puede ver en los siguientes datos.

Gas Invernadero	Concentración 1750 (ppm)	Concentración 1992 (ppm)	Concentración 1999 (ppm)	Correlación entre el incremento del dióxido de carbono y el metano (ppm)	Incremento fuerza Irradiativa (W/m ²) respecto de 1750	Contribución al forzamiento radiativo (%)
Dióxido de Carbono	280	355	367	$r = 0,99$	1,56	59,80%
Metano	0,8	1,72	1,77	$r^2 (\%) = 99,3\%$	0,5	19,20%
Total:					2,06	79,0%

Partiendo de este criterio, se ha establecido el forzamiento radiativo (W/m^2) atribuible a una ppm de CO_2 (59,80%); Conocido ese valor, el resto de gases de efecto invernadero contribuye hasta el 100% en un 40,2%.²

Cálculo del incremento global de la fuerza Irradiativa (W/m^2) a causa de las emisiones de CO_2 (59,8%), y de la fuerza irradiativa: (W/m^2) / ppm de CO_2				
Abreviatura	Concepto	Fórmula	Unidad de medida	Valor
A	CO_2 en el aire atmosférico en el año 1750: (Fuente IPCC)		ppm CO_2 =	280
B	CO_2 en el aire atmosférico en el año 1999: (Fuente IPCC)		ppm CO_2 =	367
C	Diferencia ppm CO_2 años 1999-1750	$(B - A) =$	ppm CO_2 =	87
D	Incremento fuerza Irradiativa en 1999 respecto de 1750 (100%) gases efecto invernadero		$(W/m^2) =$	2,61
E	Contribución al forzamiento radiativo de las emisiones de CO_2 : (Fuente IPCC)		(%) (constante) =	59,8
F	Contribución al forzamiento radiativo resto de gases de efecto invernadero: (Fuente IPCC)	$(100 - E) =$	(%) =	40,2
G	Incremento fuerza Irradiativa (59,8%) a causa del CO_2 .	$(E \times D / 100) =$	$(W/m^2) =$	1,56078
H	Incremento fuerza Irradiativa / ppm (59,8%) a causa del CO_2 .	$(G / C) =$	$(W/m^2) / ppm CO_2$ Constante =	0,01794

Fuente: (IPCC). Cálculos propios.

El forzamiento radiativo en (W/m^2) por cada ppm CO_2 de incremento en el aire atmosférico sería de manera constante igual a: **0,01794** W/m^2

1.1 Acumulación de los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera

Con el fin de conocer la incidencia teórica que tienen la a acumulación de CO_2 en la atmósfera terrestre por las emisiones ocasionadas por la acción del hombre; se han cuantificado estimativamente el peso de cada sustancia en el total del aire atmosférico, correspondiente a los años, 1992 y 1999, teniendo en cuenta las variaciones de las tres sustancias, que se emiten sin control a la atmósfera terrestre, el Dióxido de Carbono, el Metano y el Óxido Nitroso.³

² Este proceso es comúnmente conocido como "efecto invernadero", pero, para algunos autores no es un término adecuado, pues, el vidrio o capa de un invernadero es transparente a la luz solar, y opaca a la radiación terrestre, pero a diferencia del fenómeno atmosférico donde existe una redistribución de calor por convección hacia el aire que lo rodea, el invernadero confina el aire en su interior, evitando que se pueda escapar el aire caliente, pues el vidrio o capa inhibe su circulación. Por ello, el fenómeno atmosférico se basa en un proceso distinto al de un invernadero, pero el término está ya suficientemente adoptado en diferentes ámbitos del conocimiento, lo que hace necesario su adopción.

³ Los CFCs), tienen un protocolo de regulación.

Cuadro 2

Cálculo del peso de las sustancias químicas que componen el aire atmosférico terrestre, años 1992 y 1999
(Composición del aire (seco y limpio) al nivel del mar)

Paso 1°		Peso de la atmósfera: Superficie terrestre: (5.100.652.847.020.000.000 cm ²) x (1 kg/cm ²) / 1000.000.000 =					5.100.652.847 (Mt)	
Paso 2°	Paso 3°	Paso 4° y 5°		Paso 6°	Paso 7°			
Sustancia química en estado gaseoso en la atmósfera terrestre	Fórmula	Átomos, peso atómico (uma)	Masa molecular = (u)	Masa molar = (g/mol)	PPM = Partes Por Millón	Peso del aire en un millón ppm = (Masa molar sustancia) x (número ppm) =	% peso del aire = (peso ppm sustancia) / (peso total ppm) x (100)	Peso de cada sustancia del aire atmosférico (Mt) = (Porcentaje peso sustancia) x (Peso total atmosférico) / 100 =
AÑO 1992								
Amoníaco	NH ₃	nitrógeno: 1 x (14,0067) + hidrógeno 3 x (1,00794) =	17,035920	17,03592	0,0100	0,170	0,0000006	30
Argón	Ar	argón 1 x (39,948) =	39,948000	39,948	9,300,0000	371.516,400	1,2826971	65.425.928
Criptón	Kr	criptón 1 x (83,798) =	83,798000	83,798	1,0000	83,798	0,0002893	14.757
Dióxido de Azufre	SO ₂	oxígeno 2 x (15,9994) + azufre 1 x (32,065) =	64,063800	64,0638	0,0002	0,013	0,0000000	2
Dióxido de Carbono	CO ₂	oxígeno 2 x (15,9994) + carbono 1 x (12,0107) =	44,009500	44,0095	355,0000	15.623,373	0,0539412	2.751.355
Helio	He	elio 1 x (4,002602) =	4,002602	4,002602	5,2000	20,814	0,0000719	3.665
Hidrógeno (diatómico)	H ₂	hidrógeno 2 x (1,00794) =	2,015880	2,01588	0,2800	0,564	0,0000019	99
Metano	CH ₄	carbono 1 x (12,0107) + hidrógeno 4 x (1,00794) =	16,042460	16,04246	1,7200	27,593	0,0000953	4.859
Monóxido de carbono	CO	carbono 1 x (12,0107) + oxígeno 1 x (15,9994) =	28,010100	28,0101	0,1000	2,801	0,0000097	493
Neón	Ne	neón 1 x (20,1797) =	20,179700	20,1797	18,0000	363,235	0,0012541	63.967
Nitrógeno (diatómico)	N ₂	nitrógeno 2 x (14,0067) =	28,013400	28,0134	780.899,9650	21.875.663,080	75,5278916	3.852.415.556
Óxido nítrico	N ₂ O	nitrógeno 2 x (14,0067) x oxígeno 1 x (15,9994) =	44,012800	44,0128	0,3100	13,644	0,0000471	2.403
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	nitrógeno 1 x (14,0067) + oxígeno 2 x (15,9994) =	46,005500	46,0055	0,0010	0,046	0,0000002	8
Oxígeno gaseoso (diatómico)	O ₂	oxígeno 2 x (15,9994) =	31,998800	31,9988	209.363,0000	6.699.364,764	23,1302198	1.179.792.216
Ozono	O ₃	oxígeno 3 x (15,9994) =	47,998200	47,9982	0,0200	0,960	0,0000033	169
Vapor de Agua	H ₂ O	hidrógeno 2 x (1,00794) + oxígeno 1 x (15,9994) =	18,015280	18,01528	55,3138	996,494	0,0034405	175.488
Xenón	Xe	xenón 1 x (131,293) =	131,293000	131,293	0,0800	10,503	0,0000363	1.850
TOTALES					1.000.000	28.963.688,251	100%	5.100.652.847
AÑO 1999								
Amoníaco	NH ₃	nitrógeno: 1 x (14,0067) + hidrógeno 3 x (1,00794) =	17,035920	17,03592	0,0100	0,170	0,0000006	30
Argón	Ar	argón 1 x (39,948) =	39,948000	39,948	9,300,0000	371.516,400	1,2826906	65.425.595
Criptón	Kr	criptón 1 x (83,798) =	83,798000	83,798	1,0000	83,798	0,0002893	14.757
Dióxido de Azufre	SO ₂	oxígeno 2 x (15,9994) + azufre 1 x (32,065) =	64,063800	64,0638	0,0002	0,013	0,0000000	2
Dióxido de Carbono	CO ₂	oxígeno 2 x (15,9994) + carbono 1 x (12,0107) =	44,009500	44,0095	367,0000	16.151,487	0,0557643	2.844.344
Helio	He	elio 1 x (4,002602) =	4,002602	4,002602	5,2000	20,814	0,0000719	3.665
Hidrógeno (diatómico)	H ₂	hidrógeno 2 x (1,00794) =	2,015880	2,01588	0,2300	0,464	0,0000016	82
Metano	CH ₄	carbono 1 x (12,0107) + hidrógeno 4 x (1,00794) =	16,042460	16,04246	1,7700	28,395	0,0000980	5.001
Monóxido de carbono	CO	carbono 1 x (12,0107) + oxígeno 1 x (15,9994) =	28,010100	28,0101	0,1000	2,801	0,0000097	493
Neón	Ne	neón 1 x (20,1797) =	20,179700	20,1797	18,0000	363,235	0,0012541	63.967
Nitrógeno (diatómico)	N ₂	nitrógeno 2 x (14,0067) =	28,013400	28,0134	780.899,8150	21.875.658,878	75,5274932	3.852.395.233
Óxido nítrico	N ₂ O	nitrógeno 2 x (14,0067) x oxígeno 1 x (15,9994) =	44,012800	44,0128	0,4600	20,246	0,0000699	3.565
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	nitrógeno 1 x (14,0067) + oxígeno 2 x (15,9994) =	46,005500	46,0055	0,0010	0,046	0,0000002	8
Oxígeno gaseoso (diatómico)	O ₂	oxígeno 2 x (15,9994) =	31,998800	31,9988	209.351,0000	6.698.980,779	23,1287765	1.179.718.598
Ozono	O ₃	oxígeno 3 x (15,9994) =	47,998200	47,9982	0,0200	0,960	0,0000033	169
Vapor de Agua	H ₂ O	hidrógeno 2 x (1,00794) + oxígeno 1 x (15,9994) =	18,015280	18,01528	55,3138	996,494	0,0034405	175.487
Xenón	Xe	xenón 1 x (131,293) =	131,293000	131,293	0,0800	10,503	0,0000363	1.850
TOTALES:					1.000.000	28.963.835,481	100%	5.100.652.847

Fuente datos: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). ([Ver Cálculos completos en anexo en Excel](#)).

El procedimiento seguido en el Cuadro 2, para cuantificar el peso de cada sustancia en el total del aire atmosférico, correspondiente a los años, 1992 y 1999 consta de los siguientes pasos:

Paso 1º) Se ha calculado el <<peso total de la atmósfera terrestre: 5.100.652.847 millones de toneladas>>. ⁴

Paso 2º) Se han tenido en cuenta las siguientes sustancias químicas en estado gaseoso en la atmósfera terrestre: Amoníaco (NH₃); Argón (Ar); Criptón (Kr); Dióxido de Azufre (SO₂); Dióxido de Carbono (CO₂) Helio (He); Hidrógeno (diatómico) (H₂); Metano (CH₄); Monóxido de carbono (CO); Neón (Ne); Nitrógeno (diatómico) (N₂); Óxido nitrógeno (N₂O); Dióxido de nitrógeno (NO₂); Oxígeno gaseoso (diatómico) (O₂); Ozono (O₃); Vapor de Agua (H₂O); Xenón (Xe).

Paso 3º) Partiendo del peso atómico de los elementos que componen cada sustancia se ha obtenido, de cada una de ellas:

<<la masa molecular>> y <<la masa molar correspondiente>>. ⁵

⁴ **Peso total estimado de la atmósfera terrestre:**

km² = 510.065.284,70; m² = ; 510.065.284.702.000; Cm² = ; 5.100.652.847.020.000.000;

Un centímetro cuadrado a nivel del mar recibe un peso de, aproximadamente, 1 kg (1 kg/cm² = 1 atm = 1 bar)

kg/cm² = 1; Peso en Kg = 5.100.652.847.020.000.000; Peso en millones de toneladas = **5.100.652.847**

⁵ **Descripción teórica de relación entre masas moles en la atmósfera (ejemplo de C y CO₂)**

Masa atómica

Según la tabla periódica las masas atómicas de los elementos que participan en una reacción química estioquemétrica expresadas en unidades de masa atómica (uma) (u) o peso de un átomo son:

Carbono; Masa atómica C; C = 12 u

Oxígeno; Masa atómica O; O = 16 u

Masa molecular;:

Carbono; C = 1 átomo x 12 u =; 12 u;

Oxígeno; O₂ = 2 átomos x 16 u =; 32 u

Dióxido de carbono; CO₂ = 1 átomo de C x 12 + 2 átomos de O x 16 u =; 44 u

Masa molar:

Si la masa molecular es la masa de una molécula, expresada en unidades de masa atómica (u). La masa molar es la cantidad en gramos de esa sustancia que corresponde a 1 mol de la misma.

Ambos datos coinciden numéricamente, por lo que se puede decir:

Masa molecular O₂ = 32 = masa molar O₂ 32g/mol

Masa molecular C = 12 = masa molar C 12g/mol

Masa molecular CO₂ = 44 = masa molar CO₂ 44g/mol

Reactivos:

Conocida la masa molar de cada sustancia y teniendo en cuenta que si reaccionan 1 mol de C y 2 moles de O₂ la masa estioquiométrica es la siguiente:

1 mol de C corresponde a: masa = 12 g/mol = 12 g C

2 moles de O₂ corresponde a: masa = 32 g/mol = 32 g O₂

Producto;

1 mol de CO₂ corresponde a: masa 44 g/mol = 44 g CO₂

Relación entre masas moles de C y CO₂ en la atmósfera:

La reacción del Carbono liberado a la atmósfera al mezclarse con el oxígeno atmosférico ofrece pues, la siguiente relación en peso

(Masa de 1 mol de CO₂ = 44 g) / (Masa de 1 mol de C = 12 g) = a 1 g de C equivale a 3,667 g de CO₂

El factor de conversión del Carbono liberado a la atmósfera a dióxido de carbono es pues de 1 a 3,667

Paso 4º) Conocida la <<masa molar>>, y las <<ppm de cada sustancia química>>; se ha calculado:

$$((\text{Masa molar sustancia}) \times (\text{número ppm de la sustancia})) = \text{<<Peso de cada sustancia en un millón de ppm del aire atmosférico>>}$$

Paso 5º) Siendo la (suma del peso de todas las sustancias igual) = <<Al peso del aire atmosférico en un millón de ppm>>.

Paso 6º) Conocido el <<peso de cada sustancia en un millón de ppm del aire atmosférico>>, y el <<peso total de un millón de ppm del aire atmosférico>>; se ha calculado: $((\text{peso ppm sustancia}) / (\text{peso total ppm}) \times (100)) = \text{<<Porcentaje (\%) del peso de cada sustancia en un millón de ppm>>}$

Paso 7º) Conocido el <<peso total de la atmósfera terrestre>>, y el <<porcentaje (%) del peso de cada sustancia en un millón de ppm>> se ha calculado:

$$((\text{Porcentaje peso sustancia}) \times (\text{Peso total atmosférico}) / (100)) = \text{<<Peso de cada sustancia en el total del aire atmosférico en (Mt)>>}$$

En el siguiente extracto del **Cuadro 2**, se resume el peso total en el aire atmosférico del principal gas de efecto invernadero el CO₂, que contribuye aproximadamente en un 60% al forzamiento radiativo en el año 1992 y 1999

Sustancia química en la atmósfera terrestre	Fórmula	Átomos, peso atómico	Masa molecular =	Masa molar =	PPM =	Peso del CO ₂ en un millón ppm =	% Peso CO ₂ en el aire atmosférico	Peso del CO ₂ en el aire atmosférico (Mt) =
En estado gaseoso Dióxido de Carbono	CO ₂	(uma)	(u)	(g/mol)	Partes Por Millón	(Masa molar sustancia) x (número ppm) =	(peso ppm sustancia) / (peso total ppm) x (100) =	(Porcentaje peso sustancia) x (Peso total atmosférico) / 100 =
Año 1992	CO ₂	oxígeno 2 x (15,9994) + carbono 1 x (12,0107) =	44,009500	44,0095	355,0000	15.623,373	0,0539412	2.751.355
Año 1999	CO ₂	oxígeno 2 x (15,9994) + carbono 1 x (12,0107) =	44,009500	44,0095	367,0000	16.151,487	0,0557643	2.844.344

Conocido, en los años 1992 y el año 1999, el peso total del CO₂ (Mt), y las ppm de este gas en el aire atmosférico, se ha relacionado ambas variables, en cada año, para estimar si existe una constante entre el valor de una ppm de CO₂ y el peso de este gas en la atmósfera terrestre, y de esta manera obtener la equivalencia entre ambas variables. Los cálculos se pueden ver en el siguiente resumen.

Cálculo de los millones de toneladas CO₂ acumuladas en la atmósfera terrestre
equivalente al incremento de 1 Parte Por Millón (ppm) de CO₂ en el aire atmosférico:

Años	Año 1992	Año 1999
Peso del CO ₂ atmosférico (En Millones de toneladas (Mt) =	2.751.355	2.844.344
Partes Por Millón (ppm) de CO ₂ en el aire atmosférico (Fuente: IPCC)	355	367
Equivalencia del CO ₂ atmosférico en Mt, y de 1 ppm de CO ₂ (Mt CO ₂ atmosférico) / (ppm) =	7.750	7.750

El cálculo ofrece una <<constante de equivalencia>> de: 7.750 (Mt) de CO₂ de incremento en la atmósfera por cada ppm de incremento de CO₂.

1.2 Absorción de CO₂ por los océanos y la biomasa

No obstante, la acumulación de CO₂ en la atmósfera, esta en función no solo de la cantidad de emisiones de este gas, sino de la capacidad de los océanos y la biomasa terrestre de absorber el CO₂ atmosférico, en el denominado ciclo del carbono.

Por ejemplo:

1) El total de emisiones de CO₂ del periodo 1992-1999, a la atmósfera, por el consumo humano de combustibles fósiles sumaba **177.898** (Mt).

2) Cuando el incremento real de CO₂ atmosférico de 1992 a 1999 fue de:

$$((\text{Mt de CO}_2 \text{ en 1999 } (2.844.344)) - ((\text{Mt de CO}_2 \text{ en 1992 } (2.751.355))) = \mathbf{92.989} \text{ (Mt)}.$$

3) Siendo la diferencia:

$$(\text{Total emisiones combustibles fósiles 1992-1999; } \mathbf{177.898} \text{ Mt}) - (\text{Incremento real CO}_2 \text{ en la atmósfera 1992-1999; } \mathbf{92.989} \text{ Mt}) = \mathbf{84.909} \text{ (Mt)}.$$

4) Es decir, que existe un déficit de 84.909 (Mt) de CO₂. Este déficit, es la cantidad que ha restado la absorción de los océanos y la biomasa, a la atmósfera.

5) Puesto que, esta cantidad corresponde a 8 años de emisión se puede considerar que los océanos y la biomasa, restan anualmente de manera constante de las emisiones de CO₂ por consumo de combustibles fósiles:

$$(\mathbf{84.909} \text{ Mt}) / (8 \text{ años}) = \mathbf{10.614} \text{ Mt de CO}_2 \text{ anuales absorbidas por los océanos y la biomasa terrestre.}^6$$

⁶ Los océanos y la biomasa del planeta pueden absorber un total de 13.000 a 14.000 millones de toneladas de dióxido de carbono cada año. La cifra ofrecida en el presente cálculo hace referencia solamente a la parte de absorción que el ciclo del carbono resta de las emisiones de CO₂ debido al consumo humano de combustible fósiles.

El resumen es el siguiente:

Cálculo de (Mt) de CO₂ de promedio anual, absorbido por los mares y la biomasa terrestre:

Años	Año 1992	Año 1993	Año 1994	Año 1995	Año 1996	Año 1997	Año 1998	Año 1999	Total
Emisiones mundiales de CO ₂ entre 1992 y 1999 (Fuente: EIA) (Mt):	21.247	21.501	21.651	22.034	22.514	22.909	22.849	23.193	177.898
Incremento de CO ₂ atmosférico entre 1992 y 1999 (Mt) = ((Mt de CO ₂ atmosférico en 1999 (2.844.344)) – ((Mt de CO ₂ Atmosférico de 1992 (2.751.355))) =									92.989
CO ₂ absorbido por los mares y la biomasa de 1992 a 1999 (Mt): ((Total Mt de CO ₂ emitido entre 1992 y 1999 (177.898)) - ((Total Mt Incremento de CO ₂ atmosférico entre 1992 y 1999 (92.948))) =									84.909
Numero de años de la muestra:									8
Promedio anual (Mt) de CO ₂ absorbido por los mares y la biomasa terrestre de 1992 a 1999 = (Tota Mt de CO ₂ absorbido entre 1992 y 1999 (84.950)) / (8 años) =									10.614

Todo este proceso de cálculo se resume en la obtención de cinco constantes:

- 1ª) El valor porcentual de forzamiento radiativo que representa la acumulación de CO₂ en ppm en el aire atmosférico = **(59,8%)**
- 2ª) El valor porcentual de forzamiento radiativo que representa la acumulación del *resto de gases de efecto invernadero* en el aire atmosférico = **(40,2%)**
- 3ª) El forzamiento radiativo (W/m²) equivalente al valor medio de una ppm de CO₂ = **(0,01794 W/m²/ ppm CO₂)**
- 3ª) El valor en Mt de CO₂ acumuladas en la atmósfera terrestre equivalentes al incremento de 1 (ppm) de CO₂ en el aire atmosférico = **(7.750 Mt)**
- 5ª) El valor de absorción en (Mt) de CO₂ de los océanos y la biomasa terrestre de las emisiones de CO₂ = **(10.614 Mt)**

1.3 Incremento acumulado de CO₂ en el aire atmosférico en (Mt / año) y en (ppm / año), y forzamiento radiativo (W/m² / año) hasta el final de los combustibles fósiles de las reservas probadas en el año 2005

Conocidas estas cinco constantes, se han aplicado a los valores de emisiones de CO₂ por consumo de combustibles fósiles, desde 1999, hasta el probable final de las reservas probadas en los años 2004-2005, para obtener en cada año los siguientes resultados:

(Ver **Cuadro 3**):

1) El incremento neto del CO₂ atmosférico (Mt).

Que es igual a:

Las emisiones en Mt de CO₂, menos **la constante** de absorción de este gas por los océanos y la biomasa).

2) La variación del CO₂ acumulado en la atmósfera (Mt).

Que es igual a:

La suma anual de los Mt de CO₂ netos, partiendo del acumulado en la atmósfera en 1992).

3) El incremento acumulado del CO₂ en el aire atmosférico en (ppm).

Que es igual a:

El CO₂ acumulado dividido por **la constante de Mt/ppm**)

4) La fuerza irradiativa (W/m²) atmosférica.

Que es igual a:

La constante de Wm²/ppm de CO₂, por el número de ppm de CO₂, incrementándole del 59,8% al 100% (40,2%).

5) El incremento del 100% del forzamiento radiativo (W/m²).

Que es igual a:

La diferencia de la fuerza radiativa (calculada para el año 1750), con el resto de años).

6) El incremento del forzamiento radiativo (W/m²) debido al CO₂.

Que es igual a:

El 59,8% del total del forzamiento radiativo).

Cuadro 3

Incremento acumulado de CO₂ en el aire atmosférico en (Mt / año) y en (ppm / año), y forzamiento radiativo (W/m² / año) hasta el final de los combustibles fósiles de las reservas probadas en el año 2005

Real	Proyección	Incremento CO ₂ =	CO ₂	Incremento ppm CO ₂ =	Incremento fuerza Irradiativa atmosférica			Comparativa ppm CO ₂ con registro de datos reales anuales de WMO NOAA	
Año	Emisiones CO ₂ (MT) año	Emisiones CO ₂ año	acumulado en el aire atmosférico (MT) atmósfera	CO ₂ acumulado	(nº ppm CO ₂ / 59,8% x 100)	100%	59,8%		
		-		/	x	Total	Por		
		Constante absorción =	Constante Mt CO ₂ / ppm =		Constante w/m ² / ppm CO ₂ =	gases	CO ₂		
		(MT) a la atmósfera	(MT) atmósfera	(nº ppm CO ₂)	(W/m ²) / año	Incremento anual			
1750				280,0		8,40			280,0
1999	23.193	12.579	2.844.344	367,0		11,01	2,61	1,56	367,0
2000	23.851	13.238	2.857.582	368,7		11,06	2,66	1,59	369,6
2001	24.121	13.507	2.871.090	370,5		11,11	2,71	1,62	371,2
2002	24.317	13.703	2.884.793	372,2		11,17	2,77	1,65	373,7
2003	25.040	14.426	2.899.220	374,1		11,22	2,82	1,69	376,0
2004	25.762	15.149	2.914.368	376,0		11,28	2,88	1,72	377,5
2005	26.485	15.872	2.930.240	378,1		11,34	2,94	1,76	379,1
2006	27.208	16.594	2.946.834	380,2		11,41	3,01	1,80	381,2
2007	27.931	17.317	2.964.151	382,5		11,47	3,07	1,84	383,1
2008	28.653	18.040	2.982.191	384,8		11,54	3,14	1,88	385,2
2009	29.376	18.762	3.000.954	387,2		11,62	3,22	1,92	386,8
2010	30.099	19.485	3.020.439	389,7		11,69	3,29	1,97	389,0
2011	30.821	20.208	3.040.647	392,3		11,77	3,37	2,02	390,9
2012	31.544	20.931	3.061.577	395,0		11,85	3,45	2,06	393,1
2013	32.267	21.653	3.083.230	397,8		11,93	3,53	2,11	396,0
2014	32.990	22.376	3.105.606	400,7		12,02	3,62	2,17	399,6
2015	33.712	23.099	3.128.705	403,7		12,11	3,71	2,22	
2016	34.435	23.821	3.152.526	406,8		12,20	3,80	2,27	
2017	35.158	24.544	3.177.070	409,9		12,30	3,90	2,33	
2018	35.880	25.267	3.202.337	413,2		12,40	4,00	2,39	
2019	36.603	25.990	3.228.327	416,5		12,50	4,10	2,45	
2020	37.326	26.712	3.255.039	420,0		12,60	4,20	2,51	
2030	44.553	33.939	3.561.910	459,6		13,79	5,39	3,22	
2040	33.101	22.488	3.885.678	501,4		15,04	6,64	3,97	
2050	24.974	14.360	4.061.811	524,1		15,72	7,32	4,38	
2060	28.309	17.695	4.223.756	545,0		16,35	7,95	4,75	
2070	31.644	21.030	4.419.049	570,2		17,11	8,71	5,21	
2080	34.978	24.365	4.647.690	599,7		17,99	9,59	5,74	
2084	36.312	25.699	4.748.484	612,7		18,38	9,98	5,97	

Final de las reservas probadas de los combustibles fósiles en el año 2005

Elaboración propia.

[WMO](#) World Meteorological Organization / [NOAA](#) Earth System Research Laboratory (U.S) [Ver cálculos completos en anexo](#)

Los dos datos más significativos desde el punto de vista atmosférico y radiativo del Cuadro 3 son:

La concentración de CO₂ en el aire atmosférico ha pasado de 280 ppm en el año 1750 a 367 ppm en 1999, y de continuar el vigente sistema de energético mundial, podía pasar en el último cuarto del siglo XXI a 613 ppm. En términos porcentuales, desde la primera revolución industrial hasta el año 1999, la concentración de CO₂, se incrementó en un 31% y al final de las reservas probadas de combustibles fósiles (en los años 2004-2005), en la década de los ochenta del presente siglo XXI, este incremento podía ser del 118%.

El forzamiento radiativo (W/m²) como consecuencia de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, se incrementó desde el año 1750 al año 1999 en 2,61 W/m², y podía llegar en el último cuarto del siglo XXI (desde 1750) a 9,98 W/m², siendo de 5,97 W/m² por efecto de las emisiones de CO₂ (59,8%). La fuerza irradiativa (W/m²) atmosférica hacia la corteza terrestre habría pasado de 8,40 W/m² en el año 1750, a 11,01 W/m² en el año 1999, y podía llegar al final de los combustibles fósiles a 18,38 W/m². En términos porcentuales, el incremento, respecto del año 1750, sería equivalente al incremento del CO₂ y del resto de gases de efecto invernadero, del 31% en el año 1999, y del 118% a finales del siglo XXI.

Seguimiento de la proyección de los datos del Cuadro 3 con los datos reales emitidos por la Organización Meteorológica Mundial (WMO)

Según consta en los informes emitidos por la Organización Meteorológica Mundial (WMO), la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera en los años 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013 fueron:

Año	(nº ppm CO ₂) según		
	La proyección	Registro WMO	Registro NOAA
2005	378,1	379,1	380,1
2006	380,2	381,2	381,8
2007	382,5	383,1	384,0
2008	384,8	385,2	385,6
2009	387,2	386,8	387,5
2010	389,7	389,0	390,0
2011	392,3	390,9	391,8
2012	395,0	393,1	394,5
2013	397,8	396,0	397,3
2014	400,7		399,65
2015	403,7		
2016	406,8		
2017	409,9		
2018	413,2		

2 Los probables efectos climáticos derivados de las emisiones de gases de efecto invernadero

2.1 El Forzamiento radiativo y el ascenso de las temperaturas en el ciclo térmico diario

Una vez definidos los conceptos del efecto invernadero, y estimados cuantitativamente los cambios en el aire atmosférico y su incidencia el forzamiento radiativo en W/m^2), para poder definir con mayor precisión la incidencia de estos cambios, es conveniente tener en cuenta como se desarrolla el ciclo térmico diario, que resumidamente se explica a continuación:

1) La cantidad de energía absorbida por unidad de área de suelo aumenta a lo largo de la mañana según asciende el Sol sobre el horizonte. La superficie terrestre transfiere energía y calienta el aire inmediatamente por encima. En los primeros metros de la atmósfera puede formarse un gradiente térmico muy pronunciado. El aire muy próximo a la superficie puede estar mucho más caliente que el que se encuentra a un metro de la misma. El aire caliente próximo a la superficie se mezcla con el de alrededor. Se comienza a calentar la baja troposfera. La máxima entrada de radiación solar se produce al mediodía solar.



2) En todo este proceso se está produciendo un balance energético. Mientras la radiación de entrada sea superior a la de salida existe un incremento de la temperatura. La temperatura máxima normalmente no coincide con el mediodía solar, pues durante unas horas a pesar de que comienza a declinar la entrada de radiación, la existente, se acumula con la entrante y la temperatura sigue subiendo. A partir del momento en que sale al espacio exterior más energía de la que entra, la temperatura disminuye.

3) Por la noche la tierra radia mucho más eficientemente que la atmósfera. Por este motivo se enfría mucho más rápidamente el suelo. El aire en contacto con el suelo se enfría más rápidamente que el resto de la atmósfera. Conforme desciende la temperatura la emisión de radiación de longitud de onda larga aumenta. Las longitudes de onda más largas coinciden con las temperaturas más bajas. Los gases que muestran más opacidad a las mismas contribuyen a mitigar el descenso de las temperaturas.

A la finalización de la noche e inicio de la mañana se registran habitualmente las temperaturas mínimas del ciclo diario.

A continuación, de nuevo, se repite el ciclo diurno.

El **Cuadro 4**, muestra de manera resumida, con datos reales de tomas de radiación solar y temperaturas cada 10 minutos de todo el año 2003 (El cuadro resume el tratamiento de 78.000 registros de radiación solar y temperatura), del observatorio meteorológico de Pamplona, la secuencia descrita anteriormente.

El equipo que mide la radiación solar (en este caso del observatorio meteorológico de Pamplona) es el Piranómetro. Su rango de trabajo se expresa en w/m^2 y su rango espectral se sitúa entre los 305 y 2800 nm⁷, es decir mide la radiación de longitud de onda emitida por el sol en todo su espectro visible que se sitúa entre los 400 y 700 nm, colores: azul, verde y rojo; el infrarrojo próximo entre 700 y 1300 nm y se adentra en la longitud de onda del infrarrojo medio hasta los 2800 nm.⁸



Los datos de 10 minutos se han promediado en intervalos de 30 minutos para los 12 meses del año.

⁷ (nm) Abreviatura de nanómetro que es igual a la mil millonésima parte del metro.

Teniendo en cuenta las características del piranómetro, se considera ciclo diurno cuando los valores del promedio mensual superan los $9 w/m^2$

⁸ El infrarrojo medio que llega hasta los 8000 nm. El infrarrojo lejano o térmico de 8000 a 14000 nm que incluye la porción emisiva más importante del espectro terrestre. Siendo en esta longitud de onda donde se produce el cambio más importante en el proceso de absorción de energía.

Cuadro 4

Matriz anual de promedio mensual de radiación solar (W/m²) y temperatura (°C) cada media hora (Pamplona)

Amanecer	MIN °C		Día	Mediodía		MAX W/m2		Radiación descendente; temperatura ascendente								Tarde		MAX °C		Atardecer		Noche		
Mes:	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
Hora solar	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C	RAD W/m ²	TEM °C
5:00																								
5:30																								
6:00																								
6:30																								
7:00																								
7:30																								
8:00																								
8:30																								
9:00																								
9:30																								
10:00																								
10:30																								
11:00																								
11:30																								
12:00																								
12:30																								
13:00																								
13:30																								
14:00																								
14:30																								
15:00																								
15:30																								
16:00																								
16:30																								
17:00																								
17:30																								
18:00																								
18:30																								
19:00																								
19:30																								
20:00																								

Relación entre temperatura (°C) y radiación (W/m²)

Mes:	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Relación de la radiación solar con la temperatura desde el amanecer hasta el inicio del declive de la radiación												
r =	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,95	0,97
Relación desde el inicio del declive de la radiación hasta el inicio del declive de la temperatura												
r =	-0,91	-0,73	-0,92	-0,85	-0,89	-0,80	-0,84	-0,83	-0,82	-0,81	-0,77	-1,0
Relación desde el inicio del declive de la temperatura hasta la puesta de Sol												
r =	0,91	0,93	0,96	0,97	0,95	0,95	0,98	0,96	0,98	0,95	0,95	0,99

Fuente: Gobierno de Navarra. Elaboración propia. [Enlace a base de datos en los que se basa la síntesis del Cuadro 4](#)

El Cuadro 4 se ha ordenado, para cada mes, según el ciclo de 24 horas en seis vistas:

- 1ª) Vista previa del amanecer, normalmente coincide con las temperaturas más bajas
- 2ª) Vista del ciclo matinal, presenta el ascenso de la radiación solar y de las temperaturas
- 3ª) Vista del mediodía solar, hora aproximada de la máxima radiación del día
- 4ª) Vista de las primeras horas de la tarde, que coincide con el momento del día en que la radiación comienza a descender y la temperatura asciende
- 5ª) Vista de las horas centrales de la tarde, donde la radiación solar continúa su descenso y las temperaturas comienzan a descender
- 6ª) Vista de la última hora del día, donde la radiación y la temperatura comienza a descender rápidamente.

El Cuadro 4 conforma la Matriz anual de promedio mensual de radiación solar (W/m^2) y temperatura ($^{\circ}C$) cada media hora en horario solar natural del punto de registro (Pamplona). Las altas correlaciones (r) expresan claramente el ciclo diurno.

En un primer momento, a partir del amanecer el ascenso de la radiación se relaciona directamente con el ascenso de la temperatura hasta primera hora de la tarde, después, la radiación comienza a declinar pero la temperatura sigue subiendo hasta media tarde, ello debido al fenómeno de descompensación entre radiación entrante y saliente, de tal manera, que el superávit se transforma en una elevación de las temperaturas, en ese momento se produce una alta correlación entre la variable de radiación y la de temperaturas pero de carácter inverso. Una vez avanzada la tarde de nuevo y hasta el atardecer se vuelve a establecer una alta correlación directa entre las dos variables pero esta vez se basa en un descenso de la radiación y la temperatura.

Estas diferencias del ciclo térmico diario hace que el forzamiento radiativo al establecerse por el incremento de la opacidad por mayor saturación de los gases que contribuye al calentamiento térmico, se sitúa en longitudes de onda del espectro que anteriormente eran transparentes,⁹ y por lo tanto, sus efectos a lo largo de las 24 horas del día; de los meses del año, y de los distintos ámbitos climáticos sea diferente.

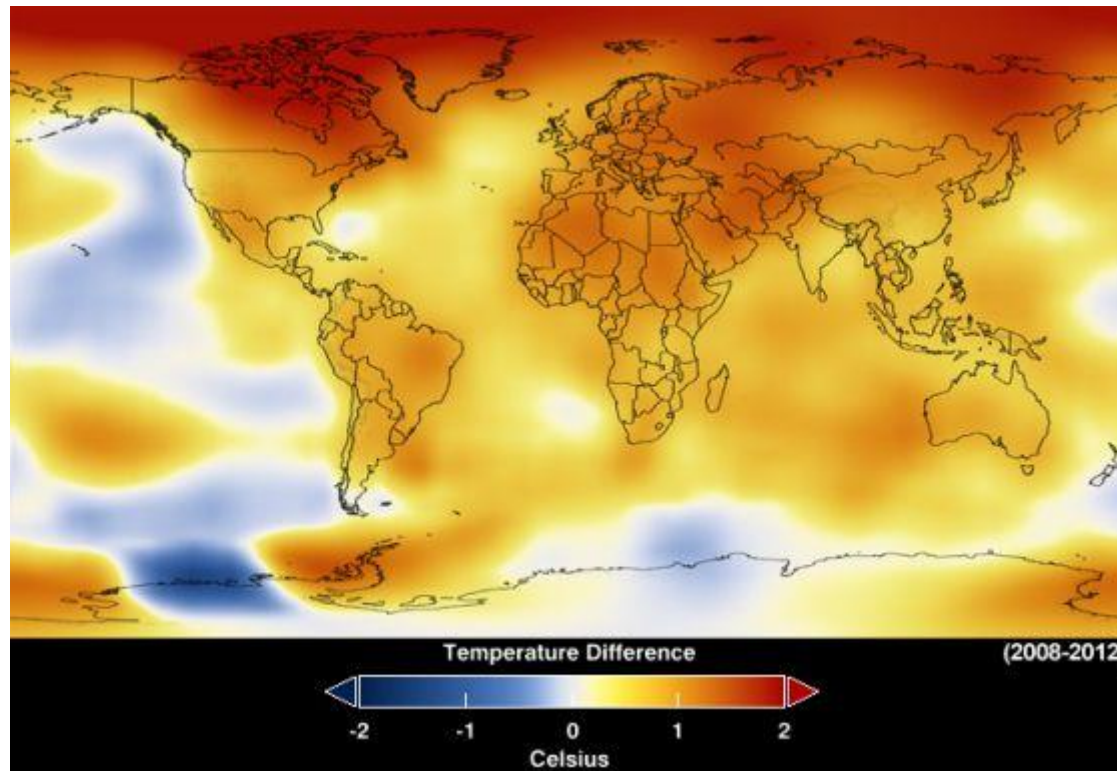
Tal y como se desarrolla el ciclo térmico diario, el forzamiento radiativo debe comenzar a cobrar importancia, pues, a partir del inicio de la tarde, y se explica porque es la hora en la que el aumento normal de las temperaturas se produce por la capacidad de la tropopausa para retener energía, a pesar de que comienza a declinar la entrada de radiación solar. Al incrementarse la capacidad de la tropopausa para la retención de energía, el diferencial entre radiación de entrada y salida aumenta, lo que debe producir un ligero incremento del pico de las máximas por encima de lo normal.

⁹ En el caso del CO_2 probablemente en longitudes de onda ente 8000 y 12000 nm.

Pero el efecto más importante se prolonga hasta el amanecer, pues una vez finalizada la radiación solar, la tierra comienza a emitir la energía almacenada hacia el espacio exterior, pero en la nueva situación, parte de la radiación que anteriormente alcanzaba el espacio exterior por emitirse en longitudes de onda que eran transparentes en la atmósfera, en la nueva situación, provocada por la concentración de gases de efecto invernadero, es absorbida en la tropopausa., de tal manera, que durante la noche, debido a la relación existente entre menor temperatura y mayor longitud de onda se produce una mayor incidencia de este fenómeno en la medida que las temperaturas mínimas son menores.

Teniendo en cuenta estas particularidades del forzamiento radiativo en el ciclo térmico el diario, el aumento de las temperaturas por incremento de gases de efecto invernadero en el aire atmosférico, se realiza principalmente sobre las temperaturas mínimas nocturnas, siendo mayor, cuanto más bajas son las temperaturas nocturnas, es decir en los climas fríos de alta montaña, y de latitud extrema como en los Polos.

Distribución del cambio térmico climático



Mapa elaborado por la NASA (Imagen añadida con posterioridad al estudio del año 2007)

2.2 Estimación de las variaciones térmicas en diferentes ambientes climáticos terrestres según el aumento de las ppm de CO₂ en el aire atmosférico (apartado revisado con posterioridad al estudio del 2007)

En el estudio de elaboración propia [El Cambio Climático visto desde un estudio local \(Navarra\)](#), se constata empíricamente en series de cuarenta años de datos diarios de temperatura mínima y máxima, del periodo (1973-2012) en estaciones meteorológicas de diferente climatología, la característica de la mayor incidencia del incremento térmico en los ambientes climáticos más fríos.

En el estudio, se ha dividido las series de cuarenta años en dos periodos de veinte años (1973-1992) (1993-2012). La comparación de los promedios respectivos de temperatura de los dos periodos en las diferentes estaciones meteorológicas, ha permitido obtener las *pendientes de variación térmica* entre ambos periodos. En el caso de las temperaturas mínimas la mayor o menor pendiente de variación térmica, está en función del mayor o menor promedio anual de temperatura mínima de las estaciones meteorológicas respectivas, estableciéndose una estrecha correlación entre ambas variables. Esta estrecha correlación ha permitido elaborar una recta de regresión que permite evaluar los cambios térmicos del promedio anual de temperatura mínima en diferentes ambientes climáticos según su rango su anual. Los resultados se pueden ver en el Cuadro 5.

Cuadro 5

Recta de regresión de variación del promedio de temperatura mínima según rango del promedio anual de temperatura mínima

Altitud	Ambiente climático	Estación meteorológica	Promedio anual temperaturas mínimas del periodo 1973-2012	Pendiente de variación (°C) del promedio de temperaturas mínimas para el periodo 1993-2012 respecto del periodo (1973-1992)
120	Oceánico	Santesteban	8,8	0,34
342	Continental mediterráneo	Carcastillo	7,8	0,33
355	Continental mediterráneo	Sartaguda	8,5	0,48
449	Transición montaña	Pamplona	8,0	0,47
1032	Montaña húmedo	Abaurrea	4,4	0,95
Promedios:			7,52	0,51
			r =	-0,940

Recta de regresión de variación del promedio anual de temperatura mínima	Fórmula (promedio mínima) x pendiente + constante
Pendiente media:	-0,13
Constante:	1,51

Elaboración propia

Proyección de la recta de regresión en ámbitos climáticos y periodos de tiempo

Los cambios térmicos expresados en la *recta de regresión* son consecuencia del incremento de las ppm de CO₂ y resto de gases de efecto invernadero en la atmósfera en los veinte años del periodo 1993-2012.

En ese periodo, la concentración de CO₂ ha pasado de 355 ppm en 1992, a 392 ppm en 2011, lo que supone un incremento de 37 ppm CO₂, en esos veinte años.

La *recta de regresión* es aplicable para esos veinte años a diferentes ámbitos climáticos pues la concentración de los gases de *efecto invernadero* en la atmósfera tienden a realizarse homogéneamente, por ello, las mediciones de las **partes por millón** (ppm) de los diferentes gases que componen la atmósfera se expresan con un único valor terrestre.

Los ambientes climáticos de la Tierra en los que se puede aplicar la *recta de regresión* para el periodo 1993-2012 son aquellos con promedios anuales de temperatura mínima de 8,8 °C a los 4,4 °C por ser la amplitud de los promedios de temperatura mínima de las estaciones meteorológicas de estudio, pero debido a que, a menor temperatura corresponde mayor longitud de onda de radiación terrestre, y el efecto invernadero actúa con mayor intensidad en función de la mayor longitud de onda, la aplicación de la recta de regresión a promedios de temperatura mínima más bajos, no solamente es posible sino que sea moderada en sus resultados.

Teniendo en cuenta este criterio se ha aplicado la *recta de regresión* en una escala de -15 °C a 8 °C de promedio anual de temperatura mínima correspondientes, según latitud, a diferentes ambientes climáticos. Los resultados son el incremento térmico en cada uno de los promedios anuales de temperatura mínima de los ambientes climáticos respectivos, tal y como se puede ver en los cálculos del Cuadro 6.

Cuadro 6

Variación del promedio de temperatura mínima (°C) según latitud y ambiente climático para el periodo 1993-2012

Ámbitos climáticos	Entre 70° y 90° Clima Polar de tipo glaciar en plataformas continentales y ámbitos marítimos							Entre 60° y 70° Clima de tundra y taiga en la periferia de las plataformas continentales				Entre 50° y 60° Clima de taiga en las plataformas continentales				Entre 40° y 50° Climas continentales moderados a templados y mediterráneos continentales <i>Campo de elaboración de la recta</i>								
	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Mínima anual (°C)	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Variación (°C)	3,5	3,4	3,2	3,1	3,0	2,8	2,7	2,6	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
Nueva promedio mínima	-11,5	-10,6	-9,8	-8,9	-8,0	-7,2	-6,3	-5,4	-4,6	-3,7	-2,8	-2,0	-1,1	-0,2	0,6	1,5	2,4	3,2	4,1	5,0	5,8	6,7	7,6	8,5

Elaboración propia.

Los datos del Cuadro 6 ofrecen la variación térmica para el periodo 1993-2012:

De 0,5 °C a 1,4 °C en los ámbitos climáticos *continentales moderados a templados* y *mediterráneos continentales*, que tienen promedios de temperatura mínima anual entre 8 °C y 1 °C; correspondientes a una latitud entre los 40° y 50°.

De 1,5 °C a 1,9 °C en los ambientes climáticos de *taiga* con promedios anuales de temperatura mínima de 0 °C a -3 °C, correspondientes a una latitud entre los 50° y 60°.

De 2 °C a 2,6 °C en los ambientes climáticos de *taiga* y *tundra* con promedios anuales de temperatura mínima de -4 °C a -8 °C, correspondientes a una latitud entre los 50° y 60°.

De 2,7 °C a 3,5 °C en las regiones polares con clima de tipo *glaciar* con promedios anuales de temperatura mínima de -9 °C a -15 °C, correspondientes a una latitud entre los 70° y 90°.

2.3 Incremento del promedio anual de las temperaturas mínimas hasta el final de las reservas probadas de combustibles fósiles del año 2005

Si se cumple el Incremento acumulado de CO₂ en el aire atmosférico en (Mt / año) y en (ppm / año), y forzamiento radiativo (W/m² / año) **expuesto en el Cuadro 3**, como consecuencia de la liberación en forma de gases de efecto invernadero de las reservas probadas de combustibles fósiles de principios del siglo, el forzamiento radiativo de 11,01 W/m² en el año 1999 puede llegar a ser de 18,38 W/m² en el año 2084 al finalizar las citadas reservas.

Ello provocaría el progresivo aumento la de temperatura mínima en los diferentes ambientes ámbitos climáticos, principalmente en las regiones polares y de alta montaña

La aplicación de la *recta de regresión* como **proyección en el tiempo** del *cambio térmico atmosférico* es extrapolable a un periodo futuro equivalente en años al incremento de 37 ppm CO₂, por ser la variación correspondiente en ppm de CO₂ del periodo 1993-2002.

A partir del incremento de las ppm de CO₂ en el aire atmosférico calculado en el Cuadro 3 para cada año desde el 2005 al 2084, se ha realizado una proyección en el tiempo, en intervalos de 37 ppm de CO₂, de la variación térmica esperada en la escala de promedios anuales de temperatura mínima del Cuadro 6, hasta el final de las reservas probadas de combustibles fósiles del año 2005 (año 2084).

Los cálculos se pueden ver en el Cuadro 7.

Cuadro 7

Estimación del cambio térmico en periodos de 37 ppm CO₂ de aumento en el aire atmosférico, entre 1993-2082, en ámbitos climáticos según promedio anual de temperatura mínima

Variación del promedio de temperatura mínima (°C) según latitud y ámbitos climáticos	Régimen de heladas	Hielo	Transición con progresivo deshielo				Superación del nivel crítico de deshielo		Régimen de heladas
		Promedio de temperatura mínima (°C) esperada según periodos de años							
		1993-2012	2013-2024	2025-2032	2033-2042	2043-2059	2060-2074	2075-2082	
Entre 70° y 90° Clima Polar de tipo glaciar en plataformas continentales y ámbitos marítimos	Continuada	-15	-11,5	-8,5	-5,9	-3,6	-1,6	0,1	Continuada parte del año
		-14	-10,6	-7,7	-5,2	-3,0	-1,1	0,6	
		-13	-9,8	-7,0	-4,5	-2,4	-0,6	1,0	
		-12	-8,9	-6,2	-3,9	-1,9	-0,1	1,4	
		-11	-8,0	-5,5	-3,2	-1,3	0,4	1,8	
		-10	-7,2	-4,7	-2,6	-0,7	0,9	2,3	
Entre 60° y 70° Clima de tundra y taiga en la periferia de las plataformas continentales	Continuada gran parte del año	-9	-6,3	-4,0	-1,9	-0,2	1,4	2,7	Habituales en invierno y primavera
		-8	-5,4	-3,2	-1,3	0,4	1,9	3,1	
		-7	-4,6	-2,5	-0,6	1,0	2,3	3,5	
		-6	-3,7	-1,7	0,0	1,5	2,8	4,0	
		-5	-2,8	-1,0	0,7	2,1	3,3	4,4	
Entre 50° y 60° Clima de taiga en las plataformas continentales	Continuada parte del año	-4	-2,0	-0,2	1,3	2,7	3,8	4,8	Ocasional
		-3	-1,1	0,6	2,0	3,2	4,3	5,3	
		-2	-0,2	1,3	2,6	3,8	4,8	5,7	
		-1	0,6	2,1	3,3	4,4	5,3	6,1	
Entre 40° y 50° Climas continentales moderados a templados y continentales mediterráneos	Habituales en Invierno y primavera	0	1,5	2,8	4,0	4,9	5,8	6,5	Ocasional
		1	2,4	3,6	4,6	5,5	6,3	7,0	
		2	3,2	4,3	5,3	6,1	6,8	7,4	
		3	4,1	5,1	5,9	6,6	7,3	7,8	
	Ocasional	4	5,0	5,8	6,6	7,2	7,8	8,2	
		5	5,8	6,6	7,2	7,8	8,3	8,7	
		6	6,7	7,3	7,9	8,3	8,7	9,1	
		7	7,6	8,1	8,5	8,9	9,2	9,5	
8	8,5	8,8	9,2	9,5	9,7	10,0			
ppm CO₂ esperadas según año		395	432	469	506	543	580	612	Final reservas
AÑO		2012	2024	2032	2042	2059	2074	2082	C. fósiles 2005

Elaboración propia. ([Ver Cálculos completos en anexo en Excel](#))

Hipótesis de los cambios térmicos climáticos según el Cuadro 7

La recta de regresión estima el cambio térmico en periodos de 37 ppm CO₂ de aumento en el aire atmosférico, que se corresponde con el aumento de las ppm de CO₂ en los 20 años del periodo 1993-2012.

Los intervalos de años se adecuan al incremento de 37 ppm CO₂

El valor de la *recta de regresión* se aplica al valor temperatura mínima anual de cada periodo (cuanto mayor es el valor menor es la variación térmica)

A partir del año 2042 con el agotamiento de las reservas probadas del 2005 de petróleo y gas natural, las emisiones descienden y, con ello, el incremento de las ppm CO₂ se moderan (ver estudio: [El porvenir del Sistema Energético Mundial](#))

En los ámbitos climáticos *continentales moderados a templados y mediterráneos continentales* con promedios de temperatura mínima anual entre 8 °C y 1 °C; correspondientes a una latitud entre los 40° y 50°, el promedio de 8 °C en el periodo 1993-2012 pasaría a ser en el periodo 2075-2082 de 10 °C, y el promedio de 1 °C a 7 °C. El régimen de heladas pasaría de ser *habituales en invierno primavera*, a ser *ocasionales*.

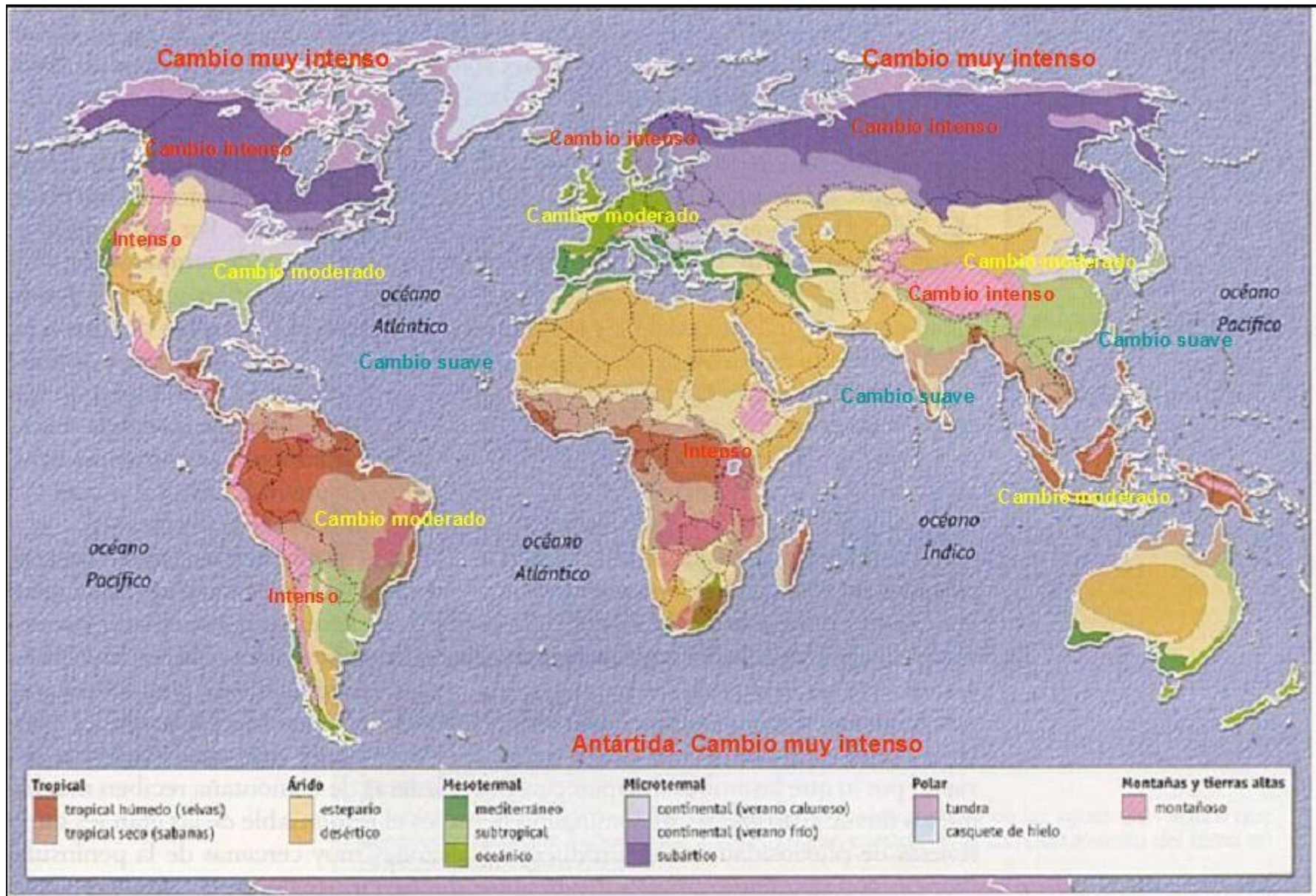
En los ámbitos climáticos de *taiga* con promedios anuales de temperatura mínima de 0 °C a -3 °C, correspondientes a una latitud entre los 50° y 60°, el promedio de 0 °C en el periodo 1993-2012 pasaría a ser en el periodo 2075-2082 de 6,5 °C, y el promedio de -3 °C a 6,5 °C. El régimen de heladas pasaría de ser *continuada parte del año*, a *habituales en invierno primavera y ocasionales*.

En los ámbitos climáticos de *taiga y tundra* con promedios anuales de temperatura mínima de -4 °C a -8 °C, correspondientes a una latitud entre los 60° y 70°, ¹⁰ el promedio de -4 °C en el periodo 1993-2012 pasaría a ser en el periodo 2075-2082 de 4,8 °C, y el promedio de -8 °C a 3,1 °C. El régimen de heladas pasaría de ser *continuada gran parte del año*, a *habituales en invierno primavera*. La incidencia del cambio térmico climático en el nivel crítico de *deshielo permanente*, comenzaría a tener importancia en el periodo 2033-2042, y rebasaría ese umbral a partir del 2060-2074.

En las regiones polares con clima de tipo glacial con promedios anuales de temperatura mínima de -9 °C a -15 °C, correspondientes a una latitud entre los 70° y 90°, el promedio de -9 °C en el periodo 1993-2012 pasaría a ser en el periodo 2075-2082 de 2,7 °C, y el promedio de -15 °C a 0,1 °C. El régimen de heladas pasaría de ser *continuada a continuada parte del año*. La incidencia del cambio térmico climático en el nivel crítico de *deshielo permanente*, comenzaría a tener importancia en el periodo 2060-2074, y rebasaría parcialmente ese umbral en el periodo 2075-2082.

¹⁰ La estación meteorológica de la Base Gabriel González Videla (64° 49" Sur) (62° 51" Oeste) en la Antártica Chilena, presenta los siguientes valores: temperatura máxima media anual, 2,7 °C; temperatura mínima media anual, -6,0 °C; temperatura media anual, -3,3 °C; precipitaciones anuales, 660 Mm. (50%) sólida.

Intensidad de los cambios térmicos según regiones del mundo



2.4 La subida del nivel de los océanos por la desglaciación

Para una evaluación teórica de la posible subida del nivel de los océanos, hay que tener en cuenta que el posible deshielo de las capas permanentes heladas marítimas, no afectan al nivel del mar, pues se produce una compensación entre el volumen que ocupan debajo de la superficie con su deshielo,¹¹ por ello la evaluación de agua en forma líquida que podría aportar el deshielo a la subida del nivel de los océanos, solamente debe tener en cuenta las plataformas continentales, es decir, el continente Antártico y Groenlandia.



¹¹ Para explicar este fenómeno, se suele utilizar el ejemplo del vaso de agua lleno hasta el borde y que contiene trozos de hielo, cuando el hielo se convierte en agua, el nivel del vaso no solo no sube sino que baja pues el agua en estado sólido ocupa más lugar que en estado líquido.

Masa de hielo continental trasformada en agua (Considerando la Antártida y Groenlandia) para la subida de un cm del nivel de los océanos

(ST) = Superficie de la Tierra Km ²	510.065.285	100%
(SE) = Superficie de las Tierras emergidas Km ²	149.365.285	29%
(ST) - (SE) = Superficie de lo Océanos (km ² (SO))	360.700.000	71%
(A1) = Antártida: capa de hielo continental (km ²)	13.176.727	88%
(A2) = Groenlandia: capa de hielo continental (Km ²)	1.755.000	12%
(A3) = Total capa de hielo continental (Km ²)	14.931.727	100%
(B1) = Promedio de km de espesor de la capa de hielo continental en la Antártida	2,5	
(B2) = Promedio de km de espesor de la capa de hielo continental en Groenlandia:	1,8	
(A1) x (B1) = Km ³ de agua helada de la Antártida	32.941.818	88%
(A2) x (B2) = Km ³ de agua helada de Groenlandia	3.159.000	8%
(B1+B2) = Total Km ³ de agua helada en la Antártida y Groenlandia (AG)	37.329.318	100%
(AG ¹⁵) / (SO ¹⁰) = Elevación Total en cm, de la Superficie de los Océanos equivalente al volumen de agua helada en la Antártida y Groenlandia (TSO)	10.349	
(AG) / (TSO) = Km ³ de agua necesarios para subir un 1 cm el total de la Superficie Oceánica (1SO)	3.607	
(1SO) / (AG) = Porcentaje de agua deshelada necesaria del total de hielo continental para la subida de 1 cm de la superficie de los océanos		0,0097%

Elaboración propia

La tabla siguiente ofrece el volumen en Km³, y el porcentaje de hielo transformado en agua de forma permanente de las plataformas continentales: Centro y Norte de Groenlandia, y el Continente Antártico, que sería necesario para que el nivel de los océanos subiera un metro.

Subida del nivel de los océanos, según km³, y porcentaje de masa de hielo continental deshelada (Considerando la Antártida y Groenlandia) ¹²

Total km ³ de agua deshelados	Porcentaje de masa de hielo continental transformada en agua	Subida nivel de los océanos en metros
36.070	0,10%	0,1
72.140	0,19%	0,2
108.210	0,29%	0,3
144.280	0,39%	0,4
180.350	0,48%	0,5
216.420	0,58%	0,6
252.490	0,68%	0,7
288.560	0,77%	0,8
324.630	0,87%	0,9
360.700	0,97%	1
Según estos cálculos el deshielo total de las plataformas continentales haría subir el nivel de los océanos en unos 100 metros.		
37.329.318	100,00%	103,5 metros

Elaboración propia. (Ver anexo 2 al final)

Aunque, se desconoce la repercusión que el incremento de temperaturas mínimas, pueda tener en este enorme volumen de agua concentradas en forma de hielo en estas plataformas continentales, hay que pensar, que en el clima polar de tipo glaciar que reina en las regiones constantemente recubiertas de hielo (Centro y Norte de Groenlandia, y el Continente Antártico), el incremento térmico no llegue a alcanzar el límite crítico del deshielo permanente, por lo que estos espacios geográficos, aunque experimenten una atenuación de sus temperaturas, mantengan el grueso del hielo intacto; no obstante, existen riesgos importantes, que no se conocerán hasta pasadas unas décadas, pero si es evidente que en la periferia de estas plataformas y mares de estas regiones polares, la masa de hielo puede verse seriamente afectada.¹³

¹² Los hielos que cubren ambas zonas polares tienen una naturaleza radicalmente distinta. El Océano Ártico está cubierto por una capa de hielo marino en movimiento, de espesor típico medio, al final de invierno, entre 3 y 4 m, y que alcanza una extensión entre 5 (en verano) y 15 (en invierno) millones de km². En el polo opuesto se encuentra la Antártida, que es un amplio continente, de 14 millones de km², recubierto por una gruesa capa de hielo, con espesor medio de 2,5 km (pero que alcanza en ocasiones más de 4 km). La banquisa (hielo marino) que rodea a la Antártida alcanza un tamaño análogo al del continente a finales del invierno. No obstante, también en la zona boreal existen masas de hielo continental, la mayor de las cuales – con gran diferencia– es Groenlandia, que tiene una extensión de 1,75 millones de km² y un espesor medio de hielo de 1,8 km (pero que alcanza en amplias zonas los 3 km).

Francisco Navarro Valero: Universidad Politécnica de Madrid

¹³ La estación de Little América, en el Antártico registra una media de -39° en el mes más frío y de -7° en el más cálido. El invierno térmico es perpetuo. Las precipitaciones son muy escasas y el viento, a menudo huracanado, esparce una nieve polvorienta, a través de la cual el sol brilla en ocasiones.

2.3 El incremento térmico climático y su influencia en la circulación general atmosférica

En el estudio de elaboración propia [El Cambio Climático visto desde un estudio local \(Navarra\)](#) se analiza la evolución de las temperaturas y de las precipitaciones en estaciones meteorológicas de diferente climatología.

En la investigación se constata empíricamente, además del aumento térmico, la progresiva disminución de las precipitaciones en las series de datos de sesenta años utilizadas al respecto, con registros diarios completos del periodo 1953-2012. Las diferentes estaciones meteorológicas de estudio acusan un descenso de las precipitaciones entre el 6% y el 12% según los casos.

El incremento térmico y la disminución de las precipitaciones no guardan físicamente una relación directa, pero en el área de estudio de la investigación se evidencia que existe una relación indirecta entre el incremento térmico y una mayor influencia del anticiclón de las Azores que ocasiona la disminución progresiva de las precipitaciones y el aumento de los años secos y la disminución de los pluviosos en las décadas más recientes respecto de las precedentes.

Esta relación indirecta entre incremento térmico por el efecto invernadero y la mayor presencia del anticiclón de las Azores, cabe explicarla por la influencia del ascenso de las temperaturas en la conformación de las *masas térmicas de aire que regulan la circulación atmosférica*.

En el caso del anticiclón de las Azores la tendencia es que está ampliando su área de influencia tanto espacialmente como en su persistencia a lo largo del año desplazando en latitud norte a los frentes atlánticos.

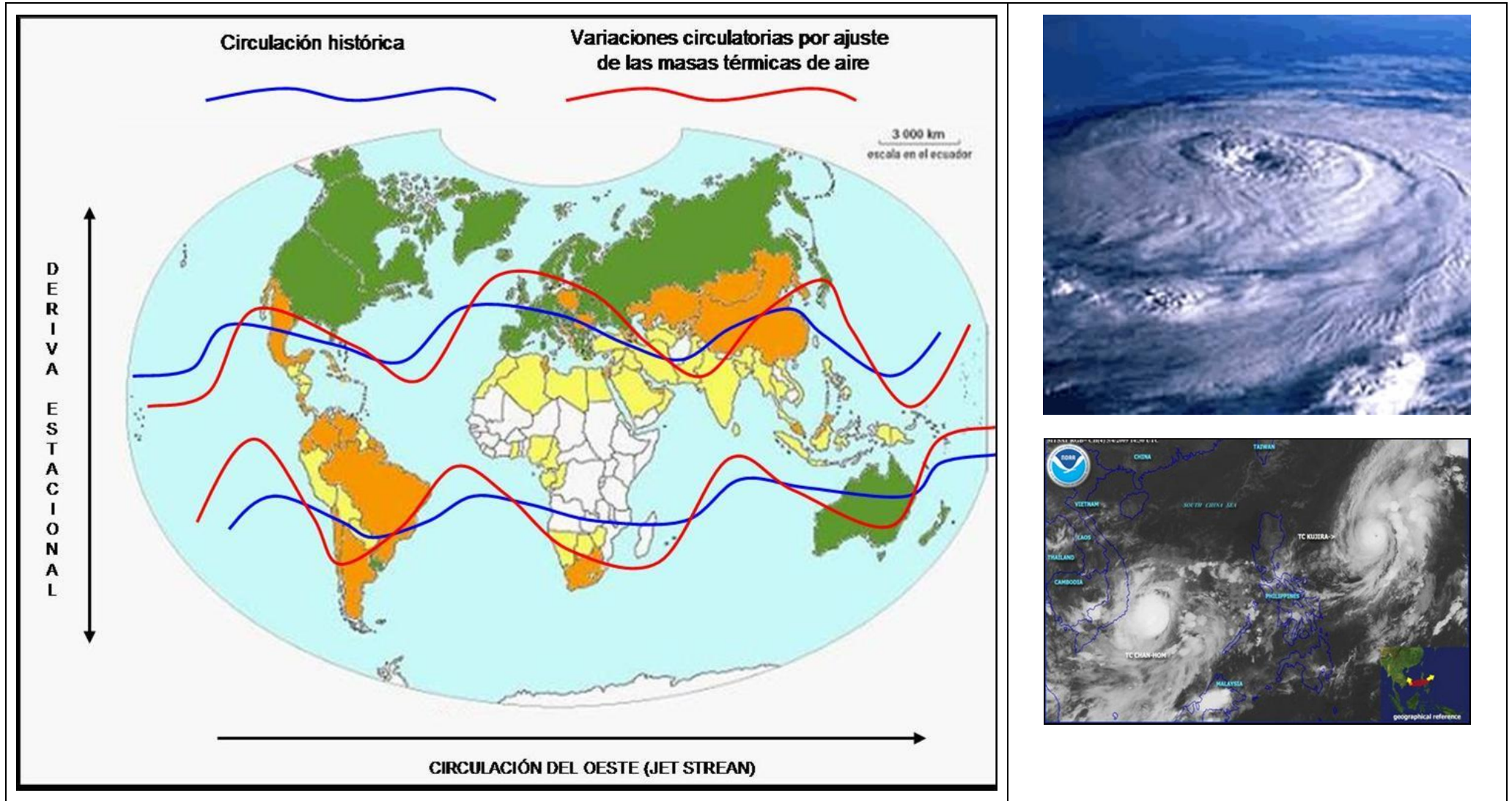
El progresivo aumento de los *años secos* forma parte de la mayor reiteración de los fenómenos climáticos extremos en el área de influencia del anticiclón de las Azores; ello cabe explicarlo en la forma que las *masas térmicas de aire que regulan la circulación atmosférica* están cambiando, haciéndolo de manera convulsa, es decir, con ajustes bruscos que originan fenómenos climáticos extremos en unos años, aunque luego le sigan otros moderados.

La deriva estacional de la *circulación atmosférica* también tiende a realizarse de forma convulsa, siendo en los cambios estacionales de otoño y primavera cuando se manifiestan más acusadamente los meteoros extremos.

Debido al carácter caótico de la circulación atmosférica, la incidencia concreta que está teniendo la subida de temperaturas en la conformación de las masas térmicas atmosféricas, es impredecible. No obstante, se puede considerar que se está en una situación de tránsito de un modelo de circulación atmosférica a otro diferente y, si bien, la incidencia de esa transición es difícil conocerla, si se puede deducir que la característica que debe acompañar a la misma es la *inestabilidad* y las *convulsiones circulatorias*, provocadas por el reajuste de las masas térmicas de aire que duraran mientras se siga produciendo al aumento de las temperaturas por incremento de los gases de efecto invernadero en el aire atmosférico.

La *inestabilidad* y las *convulsiones circulatorias*, en altura se manifiestan con un reforzamiento de las dorsales y vaguadas y, en superficie, de los anticiclones y áreas de baja presión, que en la práctica se manifiestan en fenómenos meteorológicos extremos, como pueden ser las fuertes sequías en las zonas de los anticiclones subtropicales, y de lluvias, huracanes y tifones de fuerza desconocida, en las zonas del mundo expuestas a estos meteoros.

Hipótesis de las variaciones en la circulación atmosférica por ajuste de las masas térmicas de aire debido al cambio térmico climático

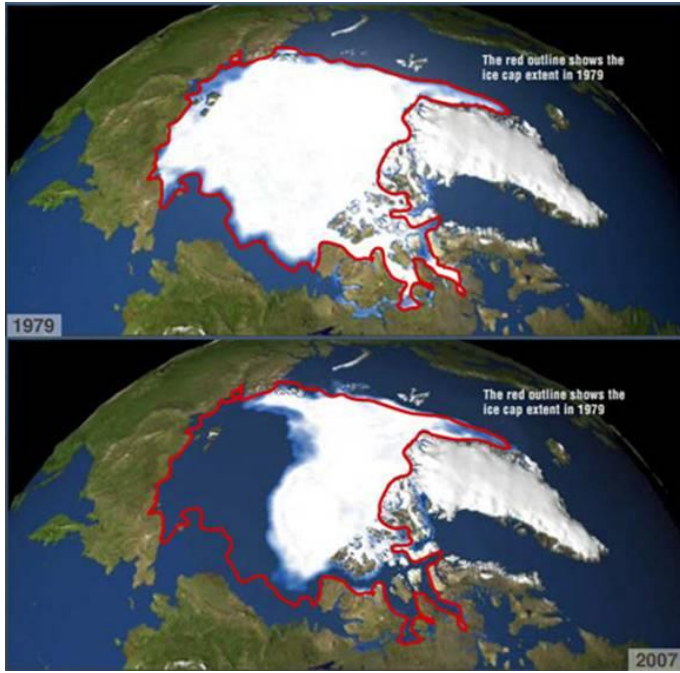


Elaboración propia

Resumen de los probables impactos climáticos, derivado de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero

Consecuencias por el cambio térmico climático

Reducción del hielo en las regiones polares



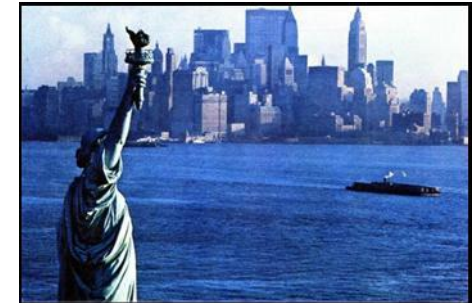
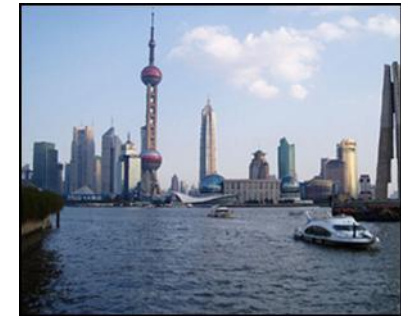
Extinción de los glaciares de Montaña



Cambio del régimen de los ríos pluvionivales



Riesgo de incremento del nivel del mar para finales del siglo XXI



Fenómenos meteorológicos extremos por el ajuste de las masas térmicas que regulan la circulación atmosférica

Inundaciones extremas



Sequías prolongadas



Huracanes de fuerza desconocida



Elaboración propia.

Anexo 1:

Estudio paleoclimático

La revista 'Science', publicó en marzo del 2013, un estudio paleoclimático llevado a cabo en 73 lugares de la Tierra, que ha permitido reconstruir la historia de las temperaturas terrestres tras el fin del periodo glaciario, hace aproximadamente 11.000 años. Según los investigadores del proyecto, los últimos diez años fueron los más calurosos, comparados con el 80% de los 11.300 años anteriores.

El investigador de la Universidad estatal de Oregon y principal autor de este trabajo, Shaun Marcott, afirmó: *"Ya sabíamos que la superficie de la Tierra es más calurosa hoy que durante la mayor parte de los 2.000 últimos años. Ahora sabemos que las temperaturas son actualmente más altas que en la mayor parte de los últimos 11.300 años pasados". "El clima de la Tierra es complejo y responde a múltiples fuerzas, incluyendo la insolación solar y el CO₂"; "Sin embargo, en los últimos 100 años, el aumento del CO₂ a través del incremento de las emisiones procedentes de las actividades humanas ha sido significativo. Es la variable que mejor puede explicar el rápido aumento de las temperaturas globales".*

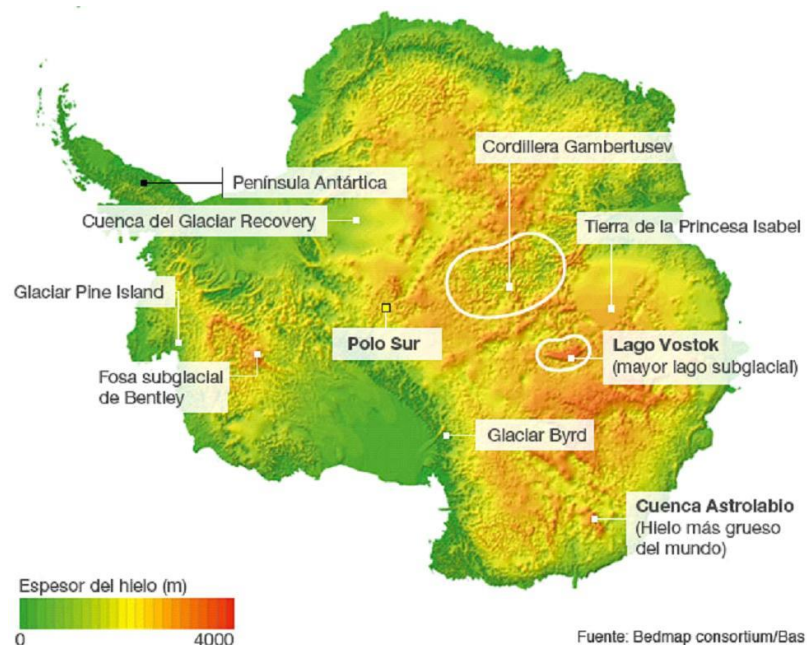
El paleoclimatólogo y coautor del estudio, Peter Clark, indicó que el calentamiento global posiblemente será mayor en las próximas décadas de lo que lo fue en los últimos 11.300 años.

Anexo 2:

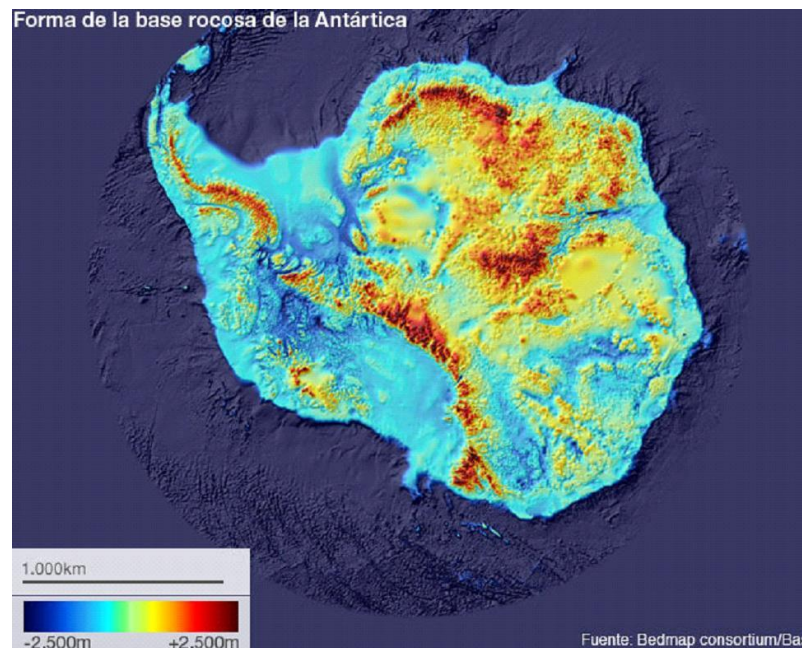
Antártida. Proyecto internacional Bedmap2. Marzo de 2013.

La iniciativa colectiva, que incluyó 60 científicos de 35 instituciones basadas en 14 países, ha aportado nuevos y detallados datos a las estadísticas de la Antártida. El volumen de hielo estimado por Bedmap2 es 4,5% mayor que el que se pensaba anteriormente. El incremento en el nivel del mar no es tan diferente a las pasadas estimaciones. Esto porque el hielo extra estaría ubicado bajo la actual línea de agua, por lo que si se derritiera no aumentaría significativamente el volumen. Una manera de desplegar toda esta información es a través del mapa de espesor mostrado a continuación, que ilustra la enorme escala de la capa de hielo que cubre la Antártida. El punto más grueso se encuentra en un lugar llamado cuenca subglacial Astrolabio. Allí, la columna de hielo es de 4.776 metros de espesor.

Espesor del hielo en la Antártida



Base rocosa en la Antártida



El proyecto Bedmap se encuentra en su segunda etapa, y las cifras sobre el hielo de la Antártida, publicadas en The Cryosphere Journal, son una actualización de los datos que se conocían en 2001. Se trata de información de referencia esencial para cualquier persona que intente responder cómo el

cambio climático afectará al continente blanco en el futuro. En comparación con Bedmap1, el volumen total de hielo calculado para Bedmap2 ha aumentado en 1,2 millones de kilómetros cúbicos, a 26,54 millones de kilómetros cúbicos. Si se incluyen las plataformas de hielo flotante que sobresalen en el océano, el total es de casi 27 millones de kilómetros cúbicos. Sin embargo, a partir de los nuevos datos disponibles de Bedmap2, queda claro ahora que la elevación media de la base rocosa es sustancialmente más baja que lo que se creía previamente: la estimación bajó de 155 a 95 metros sobre el nivel del mar.

Ello explica por qué la mayoría de ese volumen de hielo extra (gran parte en el este de la Antártica) se encuentran bajo el agua. Hoy se sabe que la mayor parte del hielo que se pierde en la Antártica se está derritiendo como resultado de agua más tibia que se come los márgenes del continente. **Esto es consecuencia de los cambios en la circulación del océano causados por las fuerzas atmosféricas.** Un ejemplo evidente es el rápido adelgazamiento observado últimamente en el imponente glaciar Pine Island, en la Antártica Occidental. El proyecto Bedmap2 se ha beneficiado enormemente de la gran cantidad de estudios de radares aerotransportados que han volado en la última década. A diferencia de la roca, el hielo es transparente al radar. Así que disparando pulsos de radio a través de la lámina superpuesta y registrando los ecos de retorno, se pueden trazar tanto la profundidad de la base rocosa como el espesor de la superficie de hielo. Aviones instrumentados, guiados por GPS, van y vienen a través del hielo en las campañas que pueden durar semanas. Tal vez el más conocido de los esfuerzos recientes fue la expedición multinacional en 2007/2008 para mapear las montañas Gamburtsev. La cordillera es del tamaño de los Alpes europeos, con picos que alcanzan los 3.000 m sobre el nivel del mar. Sin embargo, aún están escondidos debajo de más de 1.000 metros de hielo.

Javier Colomo Ugarte

Doctor en Geografía