Calentamiento y enfriamiento global en códigos de barras

Benito Fuentes López (@metbeni)
Físico por la Universidad de Granada y meteorólogo de AEMET

NOTA PRELIMINAR: El presente artículo es un resumen del trabajo original que, bajo el título #ShowAllYourStripes, *el autor publicó en cuatro entregas, en mayo de 2020, en el portal de divulgación científica NAUKAS (https://naukas.com/).*

La mayoría de nosotros ya nos hemos familiarizado con conceptos como el calentamiento global, cambio climático o efecto invernadero. Aunque no los entendamos del todo ni sepamos qué los diferencia, sabemos que implican un incremento de la temperatura media del planeta. Todo el mundo ha visualizado alguna vez una gráfica o una animación en la que se muestra cómo la superficie del planeta está incrementando su temperatura media desde hace más de un siglo. En mayo de 2018, se ideó una forma muy original de representar este calentamiento por medio de los *stripes* o *códigos de barras*. Cada línea vertical del código de barras caracteriza un año concreto y representa la diferencia entre la temperatura media de ese año y la temperatura media de un periodo de referencia de 30 años. Si el año particular resulta más frío que el periodo se dibuja con un color azul (más azulado cuanto más frío) y si resulta más cálido se dibuja con un color rojo (más rojizo cuanto más cálido). El patrón típico de calentamiento en superficie es el de la siguiente figura: las líneas pasan de los tonos azulados a los tonos rojizos.

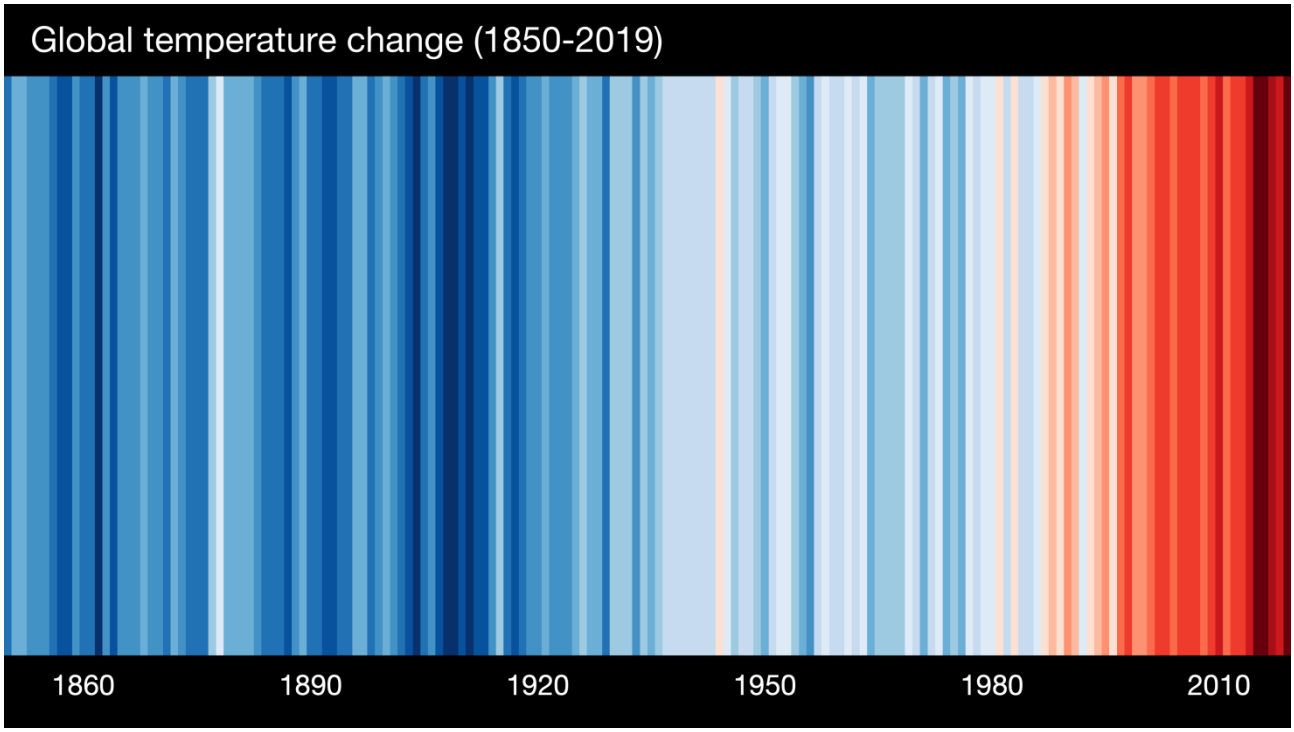

Figura 1.- Stripes o código de barras de la superficie del planeta (1850-2019). El rango de colores abarca ±1.35 ºC. Fuente: Ed Hawkins (University of Reading), Climate Lab Book [1].

La imagen anterior es muy descriptiva pero solamente ofrece información sobre la superficie del planeta. ¿Qué ocurre en el resto de la atmósfera? ¿Ha sufrido un comportamiento similar? ¿Es posible dibujar códigos de barras en cada nivel? Las respuestas a estas preguntas se resumen en la siguiente imagen.

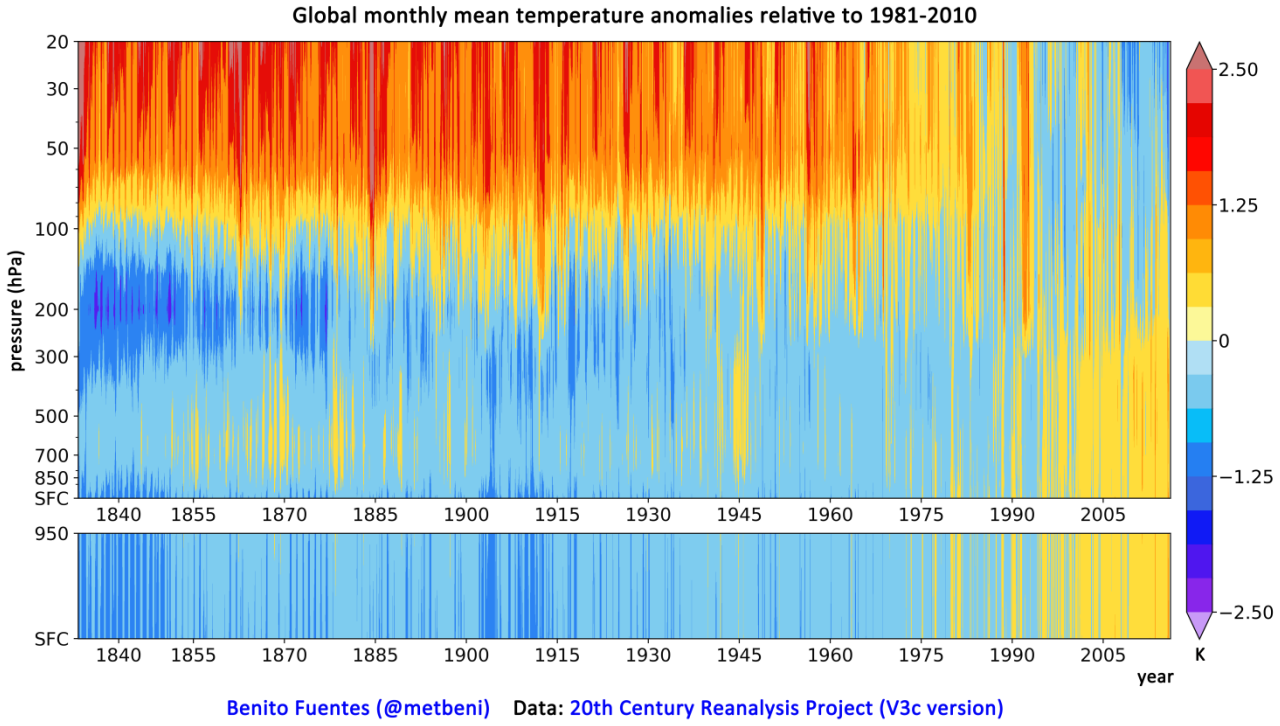

Figura 2. Stripes en todos los niveles para el conjunto del planeta. Para la realización de esta gráfica y las siguientes se emplearon más de 40 GB de datos y varias horas de computación.

La gráfica resume los 181 años que van desde 1836 hasta 2015 y es el eje central de este artículo. Bajo su apariencia colorida y estriada se esconde muchísima información y procesos físicos que se expondrán a continuación. Pero antes vale la pena explicar cómo se debe interpretar la figura.

Cómo se construyó la imagen

El laboratorio de Ciencias Físicas de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, EEUU) ha sido capaz de reconstruir de manera fidedigna las condiciones meteorológicas cada tres horas desde 1836 hasta 2015. En concreto, ha dividido la atmósfera en 29 niveles (desde superficie hasta el nivel de presión de 1 hPa, hectopascal), todos los datos están abiertos al público y pueden consultarse en su web [2]. Para la realización de la figura se calculó previamente la temperatura media de referencia (periodo 1981-2010) de cada mes y en cada nivel. A continuación se comparó cada uno de los 62.988 puntos (2.172 meses x 29 niveles) con su mes y su nivel de referencia asignando un tono más azulado o más rojizo según la diferencia fuera negativa o positiva. Los niveles que abarcan desde 20 hPa hasta 1 hPa no han sido dibujados para dejar más espacio en la figura a la zona baja. Además, se ha añadido una segunda gráfica debajo de la principal con objeto de mostrar con más detalle lo que acontece en capas bajas (desde superficie hasta 950 hPa, aproximadamente 500 metros).

Cada línea o *stripe* no tiene un único color porque la anomalía de temperatura no es la misma en todos los niveles. Por ejemplo, puede ser que un mes concreto experimente una fuerte anomalía positiva en la estratosfera (tonos rojizos), más leve en la troposfera media (tonos amarillos) y una anomalía fría en superficie (tonos azules). Si las anomalías son muy marcadas y cambian rápidamente de un mes a otro se observarán multitud de líneas y colores. En ese caso la variabilidad es alta. Si las anomalías no cambian de un mes a otro se observarán áreas del mismo color.

En resumen, la gráfica muestra 2.172 *stripes* o líneas verticales con una tendencia muy fácil de identificar e interpretar. A medida que avanzan los años, la parte inferior de las líneas pasa de los colores azules a los amarillos y la parte superior pasa de los tonos rojos a los azules. La zona baja de la atmósfera se está calentando pero la zona alta se está enfriando.

Calentamiento de la troposfera como consecuencia del incremento invernadero

La troposfera es la capa más baja de la atmósfera y se extiende desde la superficie hasta los 10 ó 15 kilómetros de altitud o aproximadamente hasta los 100 hPa en unidades de presión. Representa alrededor del 90% de la masa total de la atmósfera y su temperatura disminuye a medida que aumenta la altitud hasta alcanzar valores inferiores a -60 ºC o -80 ºC. En la figura 2 la troposfera va pasando gradualmente de los tonos azulados a los amarillentos a medida que transcurren los años. La causa de este calentamiento es bien conocida: el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero.

Sin entrar en detalles técnicos, cualquier sistema físico emite energía. La emisión es proporcional a la temperatura o, dicho de otra manera, un objeto muy cálido emite o pierde más energía que uno frío. Por otro lado, cualquier sistema también absorbe energía. Si la absorción es mayor (menor) que la emisión su temperatura aumenta (disminuye). Si emite lo mismo que absorbe su temperatura se mantiene constante. El sistema Tierra-atmósfera no es ajeno a este hecho, emite lo mismo que absorbe y presenta un equilibrio que debería fijar su temperatura media en los -18 ºC. Entonces, ¿por qué no vivimos en un mundo helado?

Porque parte de la energía que emite no se escapa instantáneamente sino que tarda un tiempo en hacerlo y, mientras tanto, contribuye a calentar el planeta hasta los 16 ºC de media. Este sobrecalentamiento de 34 grados es la explicación sencilla del efecto invernadero. No consiste en que una proporción de la energía sea "atrapada para siempre en la atmósfera" sino que se retrasa su devolución al exterior. (Puedes leer más en el artículo "Un viaje en autobús" del blog de la Agencia Estatal de Meteorología [3]).

El efecto invernadero es una buena noticia porque nos permite habitar un mundo templado gracias a los gases invernadero, que son los encargados de realizar este proceso. Si la concentración de gases invernadero es mayor, el sistema Tierra-atmósfera fija un equilibrio a una temperatura mayor. La noticia no tan buena estriba en que estamos aumentando continuamente la concentración de estos gases y, por tanto, el sistema Tierra-atmósfera está buscando continuamente el equilibrio a una temperatura que no deja de subir.

Enfriamiento de la estratosfera como consecuencia del incremento invernadero

La estratosfera es la siguiente capa y se extiende aproximadamente desde los 10 ó 15 kilómetros de altitud hasta los 50 (en unidades de presión, aproximadamente desde 100 hPa hasta 1 hPa). En ella la temperatura aumenta a medida que ascendemos verticalmente hasta alcanzar aproximadamente 0

ºC. En la figura 2, la estratosfera va pasando gradualmente de los tonos rojizos a los azulados a medida que transcurren los años. Paradójicamente, las principales causas de este "enfriamiento estratosférico global" también son humanas.

- La primera es la disminución del contenido de ozono. Este gas absorbe radiación ultravioleta procedente del sol y calienta la estratosfera. La destrucción de una proporción de ozono desde la segunda mitad del siglo XX implicó una reducción de la energía absorbida y el consecuente enfriamiento. La recuperación del ozono en los últimos 20-30 años ha suavizado el descenso pero sin llegar a revertirlo.

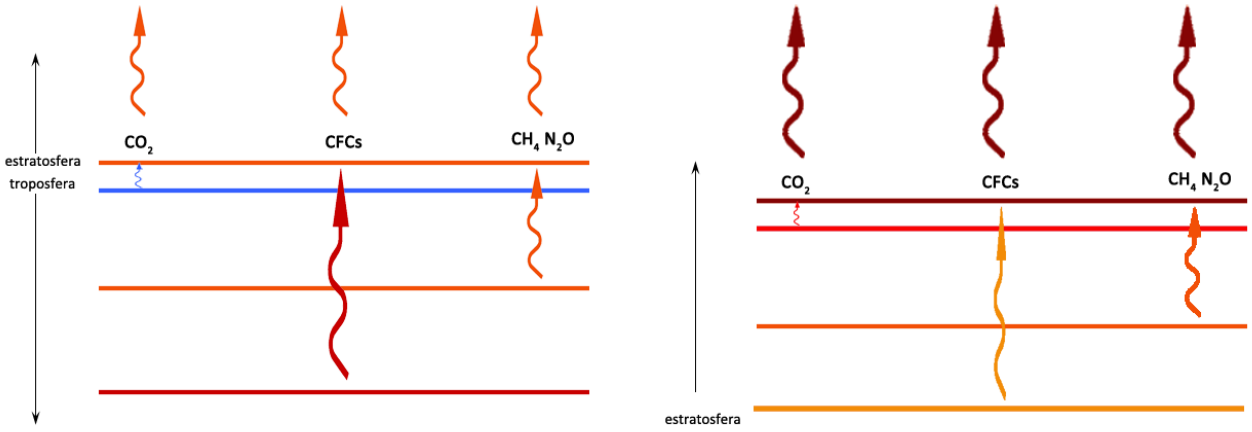

Figura 3.- Balance radiativo en la estratosfera. Los colores oscuros indican una emisión alta y los claros una emisión baja. Izquierda: en la baja estratosfera, el CO_2 absorbe menos energía de la que emite porque la recibe del nivel inmediatamente inferior, muy frío y de muy baja emisión. Los CFCs absorben más energía de la que emiten porque la reciben de niveles muy bajos, muy cálidos y de muy alta emisión. El metano y el N_2O absorben la misma energía que emiten al recibirla de niveles intermedios a su misma temperatura. Derecha: en la estratosfera alta y media cualquier gas de efecto invernadero emite más energía de la que absorbe porque la recibe de niveles inferiores, menos cálidos y de menor emisión.

- La segunda es que los gases de efecto invernadero tarde o temprano alcanzan la estratosfera mediante la circulación Brewer-Dobson. Su fuente de energía no es radiación ultravioleta procedente del sol, sino radiación infrarroja emitida desde la troposfera. Tampoco absorben todas las frecuencias o longitudes de onda larga, sino algunas de ellas.
  En el caso del CO_2, la absorción se produce principalmente en la banda de las 15 micras y esa radiación recorre poca distancia antes de ser absorbida. El CO_2 de la baja estratosfera absorbe la escasa energía emitida en el tope de la troposfera, muy frío; por otro lado está obligado a emitir mucha más energía al tener mayor temperatura. Para cuadrar el déficit energético toma energía de la baja estratosfera, la cual se enfría.
  El caso de los CFCs es opuesto: absorben energía de bandas entre 8 y 13 micras, capaz de recorrer grandes distancias, generada en zonas cercanas a la superficie y muy cálidas, mucho más que la estratosfera baja. Absorben más de lo que emiten y para cuadrar el superávit energético ceden energía a la baja estratosfera, la cual se calienta.
  El metano y el N_2O presentan un caso intermedio: absorben energía proveniente de niveles que se encuentran a su misma temperatura y por tanto absorben lo mismo que emiten.
  El predominio de CO_2 respecto a los otros gases genera un efecto neto de enfriamiento en la baja estratosfera. El resto de la estratosfera también se enfría porque los gases de efecto invernadero en cada nivel reciben energía de altitudes inferiores y, por tanto más frías. Haciendo un símil económico, los gases invernadero generan pocos beneficios y muchos gastos haciendo que la estratosfera pierda poder adquisitivo. El enfriamiento causado es alrededor de una cuarta parte del provocado por la disminución de ozono [4].

Junto a estas dos causas antropogénicas principales existen otras dos secundarias de carácter natural que modulan el enfriamiento [5]:

- El primero es la inyección masiva de aerosoles debida a grandes erupciones volcánicas. El efecto es un calentamiento de la baja estratosfera muy acusado y de corta duración (uno a tres años a lo sumo). Muy pocas erupciones son capaces de lograrlo. En la figura 2 se distinguen, entre otras, las líneas del calentamiento transitorio provocado por el Pinatubo (1991), El Chinchón (1982), Novarupta (1912) y Krakatoa (1883). (En el artículo "¿Cómo influyen los volcanes en el clima terrestre?" publicado en Naukas, puedes leer un sencillo estudio sobre la relación entre la temperatura media global del planeta y grandes erupciones desde 1400 [6]).

- La variación de la intensidad solar en el ultravioleta también influye aunque es el menor de los cuatro factores explicados: la estratosfera se calienta si la intensidad aumenta y se enfría si disminuye. El efecto es más evidente en la estratosfera alta de zonas intertropicales y despreciable en latitudes polares. El efecto en la troposfera es nulo.

El hecho de que la troposfera se caliente y la estratosfera se enfríe pone de manifiesto el papel de la acción humana en el proceso. Si las causas residieran únicamente en los ciclos de Milankovitch, la actividad solar, las corrientes oceánicas, los rayos cósmicos o el cambio en la cobertura nubosa, tendría lugar un enfriamiento o calentamiento de una sola capa o de ambas a la vez pero nunca dos efectos opuestos, que es precisamente lo observado. El negacionismo es muy hábil sembrando dudas, llamando a la precaución o abogando por más investigación pero es incapaz de explicar por qué una se calienta y otra se enfría, así como de hacer una predicción del comportamiento futuro de estas capas.

Un viaje por diferentes zonas del planeta

El calentamiento troposférico y el enfriamiento estratosférico observados a nivel global también se aprecian a escalas menores y de forma simultánea. Esta sincronía espacial y temporal no tiene precedentes en los últimos dos mil años como mínimo [7]. El Óptimo Climático Medieval, por ejemplo, acaeció en unas áreas concretas del planeta y no todas se calentaron a la vez (unas lo hicieron décadas o siglos más tarde que otras). Lo mismo sucedió con el Periodo Cálido Romano, el Periodo Frío de la Baja Edad Media o la Pequeña Edad de Hielo. Sin embargo, el calentamiento troposférico observado desde el siglo XX afecta al 90% del planeta, es simultáneo y muy rápido en términos climáticos, lo cual escapa a la propia variabilidad natural. Además, si en primera aproximación se estudia el sistema climático como un todo (englobando todas las regiones y subsistemas) de esa enorme simplicidad emerge una consecuencia muy interesante: el sistema climático ha absorbido energía neta en las últimas décadas y esa energía no encaja si no se tienen en cuenta los gases de efecto invernadero emitidos por la humanidad [8].

La figura 4 muestra los *stripes* en la zona intertropical, situada entre los trópicos de Cáncer y Capricornio. En la troposfera las líneas son poco evidentes y más bien se debería hablar de áreas o décadas en las cuales las anomalías de temperatura permanecen constantes y son muy pequeñas. En efecto, en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC [9] se señala que esta región es, en conjunto, la que menos ascenso de temperatura en superficie ha experimentado desde comienzos del siglo XX. La sucesión de líneas en la estratosfera es la señal térmica de la Oscilación Cuasibienal o QBO. Es un cambio en el régimen de vientos que tiene lugar aproximadamente cada dos años en esta capa entre las latitudes 10 ºN y 10 ºS. Su equivalente térmico es una sucesión de anomalías positivas con

un máximo en la estratosfera baja (entre 2 y 4 ºC) y otro máximo secundario en la estratosfera alta [4].

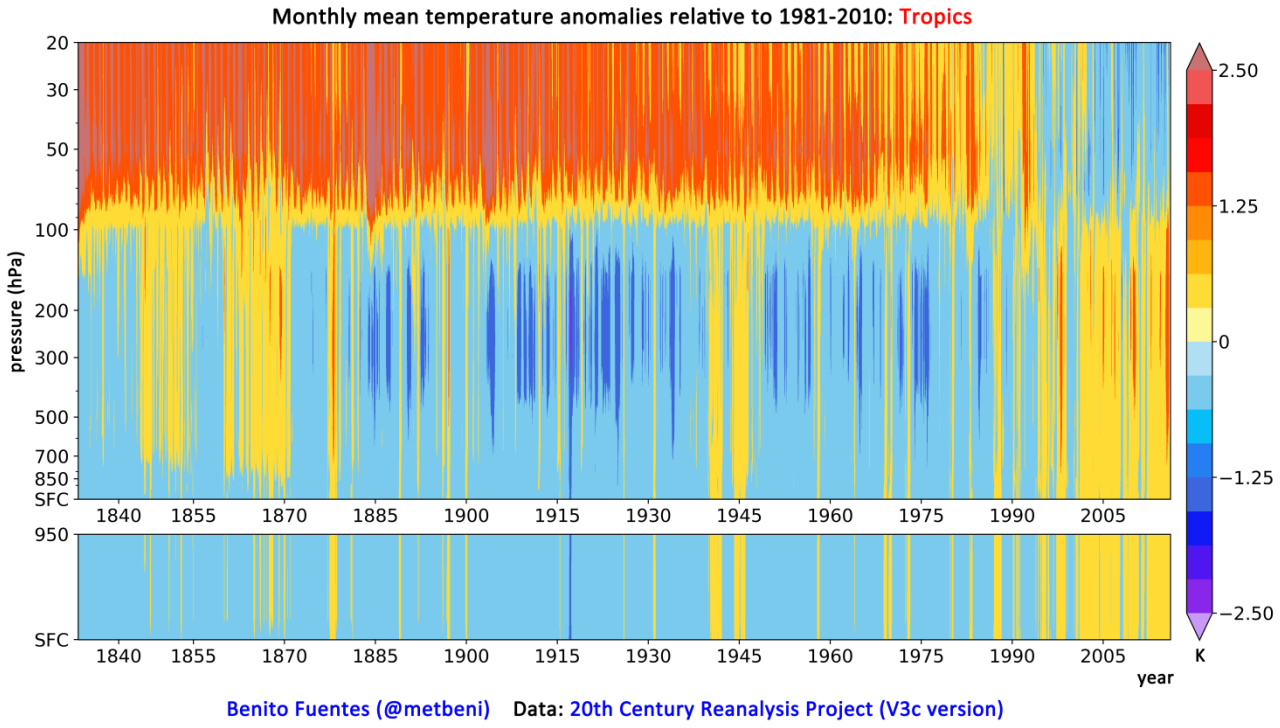

Figura 4.- Stripes en zonas intertropicales.

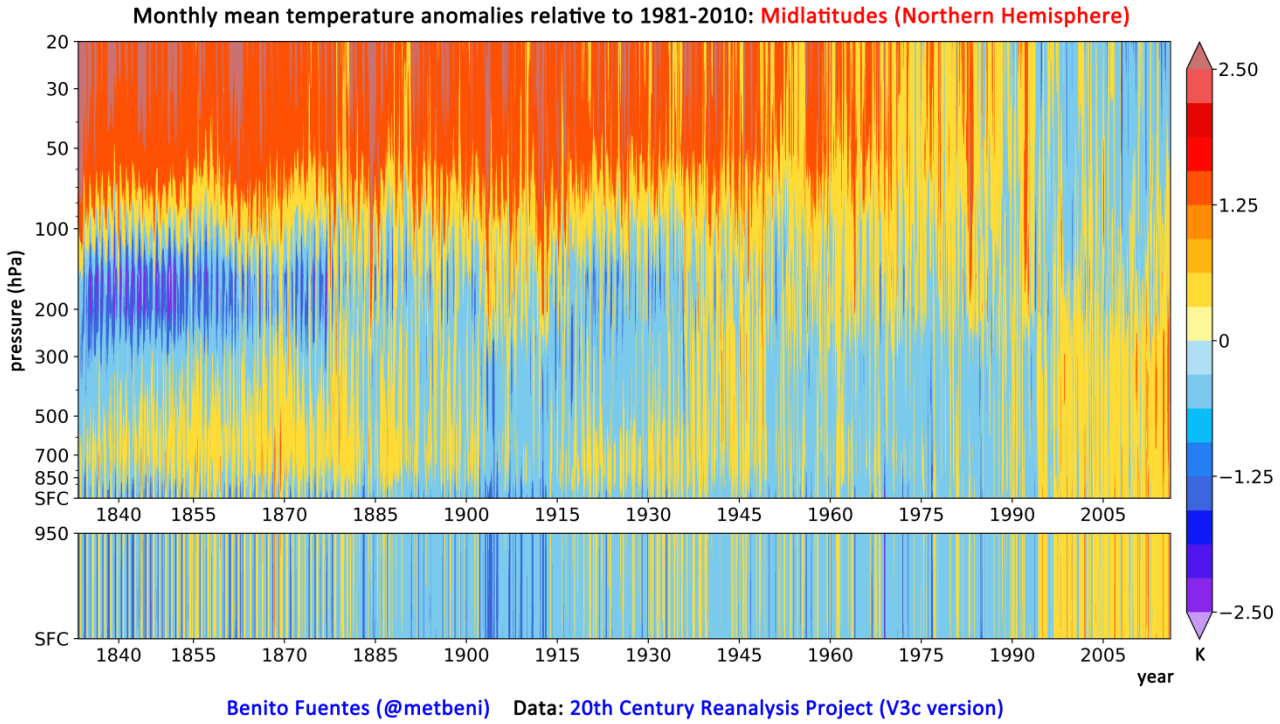

Figura 5.- Stripes en la zona templada del hemisferio norte.

La figura 5 muestra los *stripes* de la zona templada del hemisferio norte entre las latitudes 30 y 60 (norte y sur). Tanto las anomalías como la variabilidad en superficie es mayor que en los dos casos

anteriores. En la estratosfera también puede distinguirse una señal débil de la QBO. Aunque la alternancia del régimen de vientos afecta solamente a una estrecha franja alrededor del ecuador, térmicamente existe una componente en latitudes medias que no está en fase con la ecuatorial pero sí está sincronizada con el invierno y la primavera de cada hemisferio. El enfriamiento en la baja estratosfera es mayor en los meses de verano (0.5 ºC por década): de junio a octubre en el hemisferio norte y desde mediados de octubre hasta abril en el sur [4].

A escala continental el calentamiento troposférico y enfriamiento estratosférico siguen siendo palpables. La variabilidad en niveles bajos es mayor que a escala global porque las irrupciones de aire muy frío o muy cálido sobre el área provocan que un mes concreto quede muy por debajo o muy por encima de la media. A escala global, sin embargo, esa entrada fría (cálida) por lo general está compensada por una entrada cálida (fría) en otras zonas del mundo y en conjunto ese mes no muestra una anomalía de temperatura tan acusada. Eso significa que las líneas cálidas son más cálidas y las frías son más frías, obligando a elevar el rango de temperatura a ±4.5 ºC si queremos que la figura sea más legible.

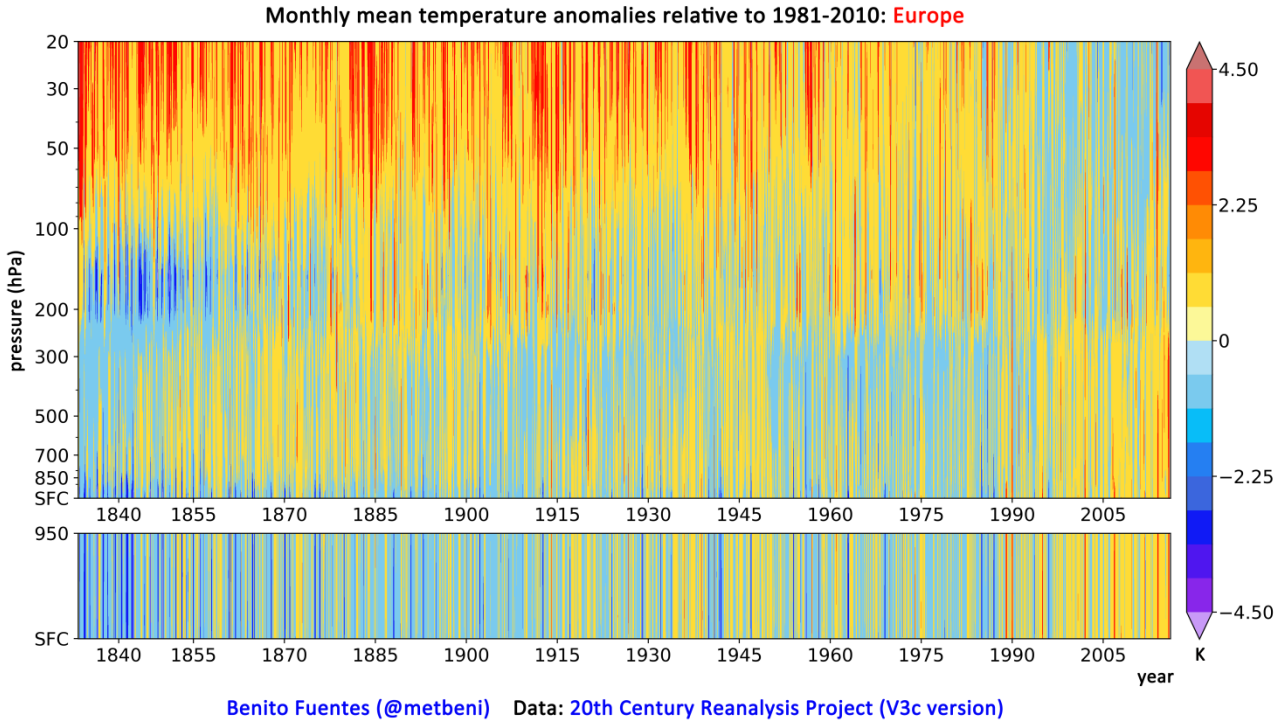

Figura 6.- Stripes en Europa.

A escala regional y local se pierde cierta señal climática: un episodio muy frío o muy cálido puede provocar que un mes concreto registre una elevada anomalía positiva o negativa. Esto se traduce en la aparición de multitud de líneas o *stripes* de diferentes tonos que no están presentes cuando se representa todo el planeta. Pese a todo, se distingue perfectamente el paso del predominio de colores fríos a cálidos en la troposfera y de colores cálidos a fríos en la estratosfera.

Las anomalías en las regiones polares son más acentuadas que en el resto del planeta. La escala de colores tuvo que ser ampliada (rango de ±8 ºC) porque las gráficas resultantes únicamente mostraban tonos muy rojizos o muy azulados, sin término medio, perdiendo información y riqueza visuales.

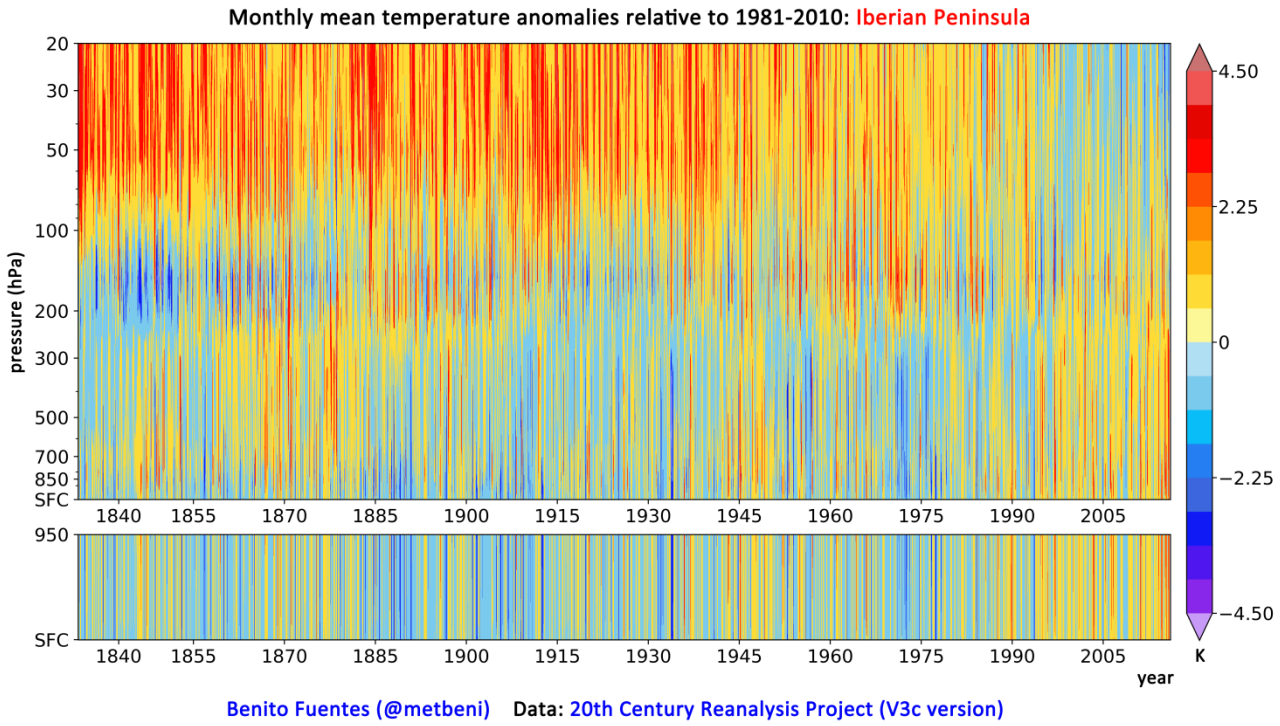

Figura 7.- Stripes en la península Ibérica.

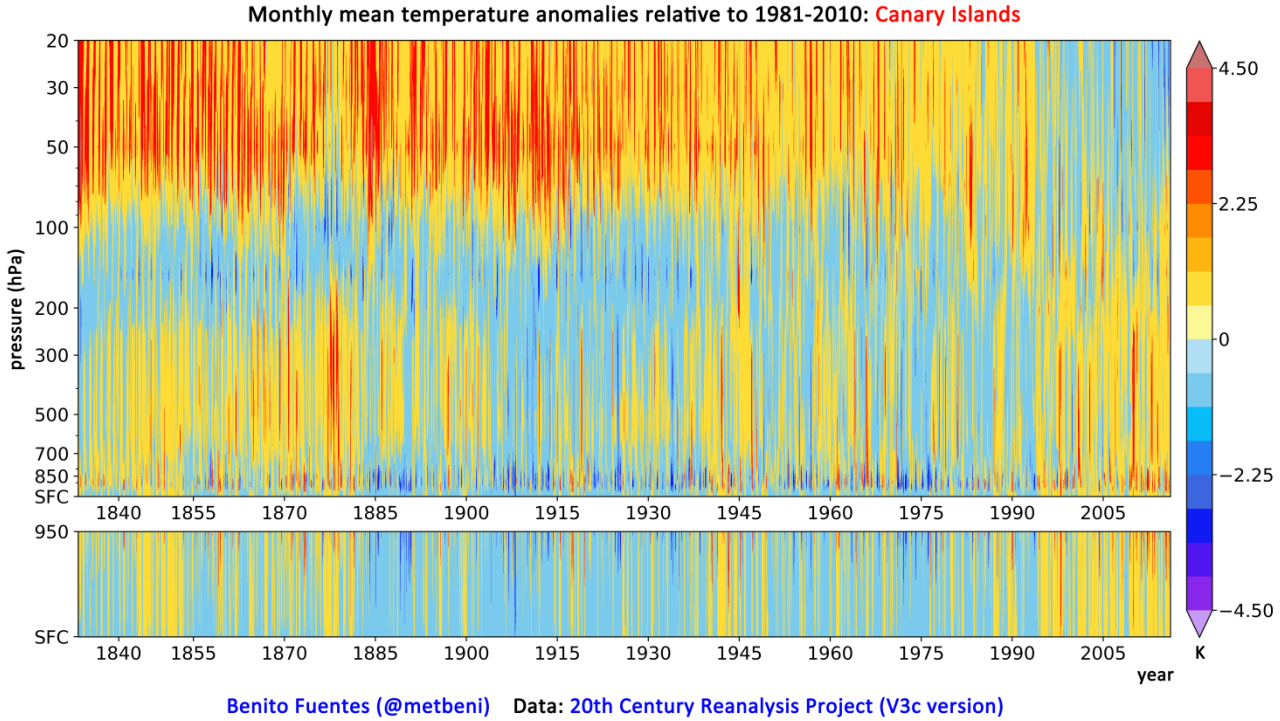

Figura 8.- Stripes en las islas Canarias.

Existe controversia acerca de si el continente antártico se está calentando o enfriando. La mayoría de las observaciones y reanálisis apuntan a ambas cosas: la península Antártica y el área que apunta hacia el Pacífico se están calentando aceleradamente mientras que el Polo Sur y el área que apunta a

África y Asia se están enfriando. Las observaciones presentadas en el Quinto Informe del IPCC indican que, en el periodo 1979-2011, la extensión del hielo marino creció casi medio millón de km^2 y, a su vez, el casquete polar perdió más de 3.500 gigatoneladas de hielo, es decir, ha habido una absorción neta de energía. La figura 9 representa un promedio de todos los puntos antárticos y todas sus anomalías asociadas según este reanálisis particular. En la estratosfera el pico del enfriamiento se alcanza durante la primavera (4-5 ºC por década) y está estrechamente vinculado a la disminución en la concentración de ozono [4].

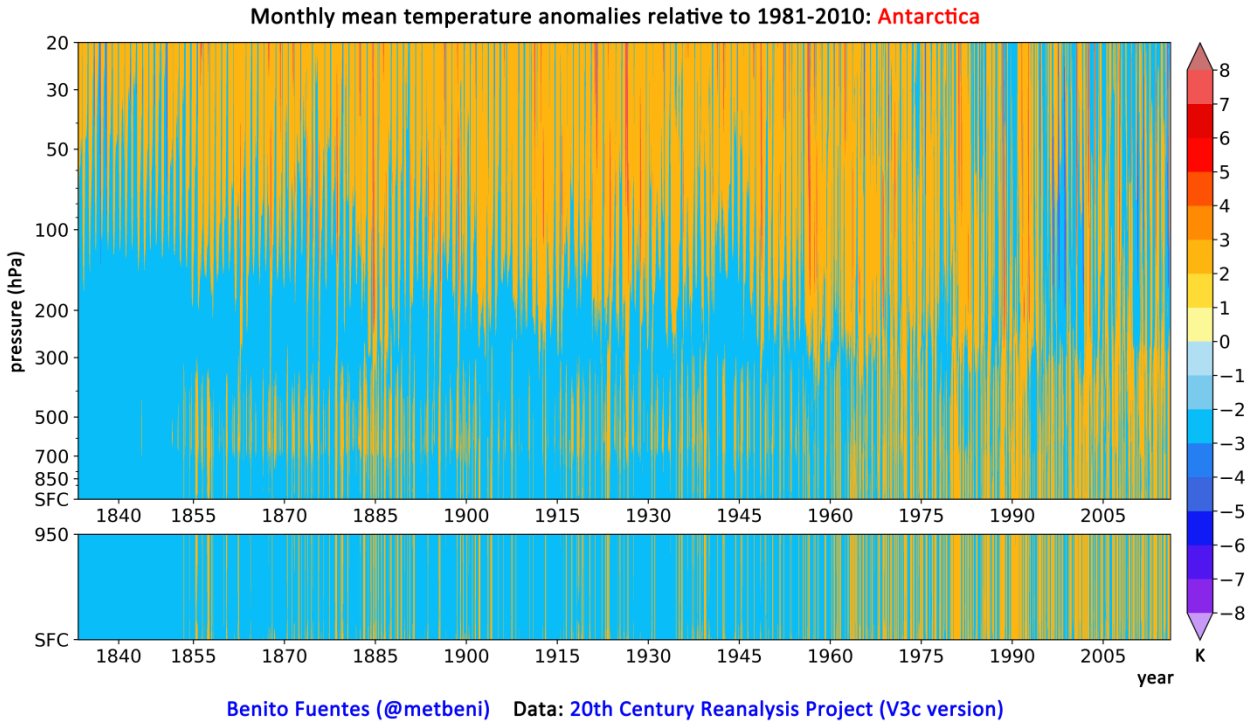

Figura 9.- Stripes en el continente antártico.

“En términos numéricos el Ártico se ha calentado [en superficie] […] más rápido que el resto del hemisferio norte […]. Ha quedado fuera de la variabilidad natural en los últimos cinco o diez años y ha alcanzado un estado persistente y multianual, suficientemente alejado del estado o tendencia media previos. En ese sentido, en el caso del Ártico ya no se habla tanto de un cambio progresivo sino de un probable salto a un nuevo estado climático del que no se tiene conocimiento previo. Si el establecimiento de un nuevo estado se mantiene en los próximos años o décadas es probable que el aumento de la temperatura media en el Ártico alcance los 4 ºC antes de mediados de siglo resultando en un entorno completamente diferente al conocido hasta ahora.” [10].

En la estratosfera ya no hay señal alguna de la QBO, pero sí pueden distinguirse algunas líneas muy rojizas en torno a 30-50 hPa. Son calentamientos súbitos estratosféricos, en los cuales la temperatura asciende hasta 20-30 ºC por encima de la media. Ocurren en invierno, la duración aproximada es de un mes y los mayores episodios suelen repetirse cada cuatro o cinco años. [Para distinguirlos se necesita ampliar mucho la imagen. Hay que tener en cuenta que cada gráfica consta de 2172 líneas y un calentamiento súbito estratosférico ocupa una línea o dos a lo sumo].

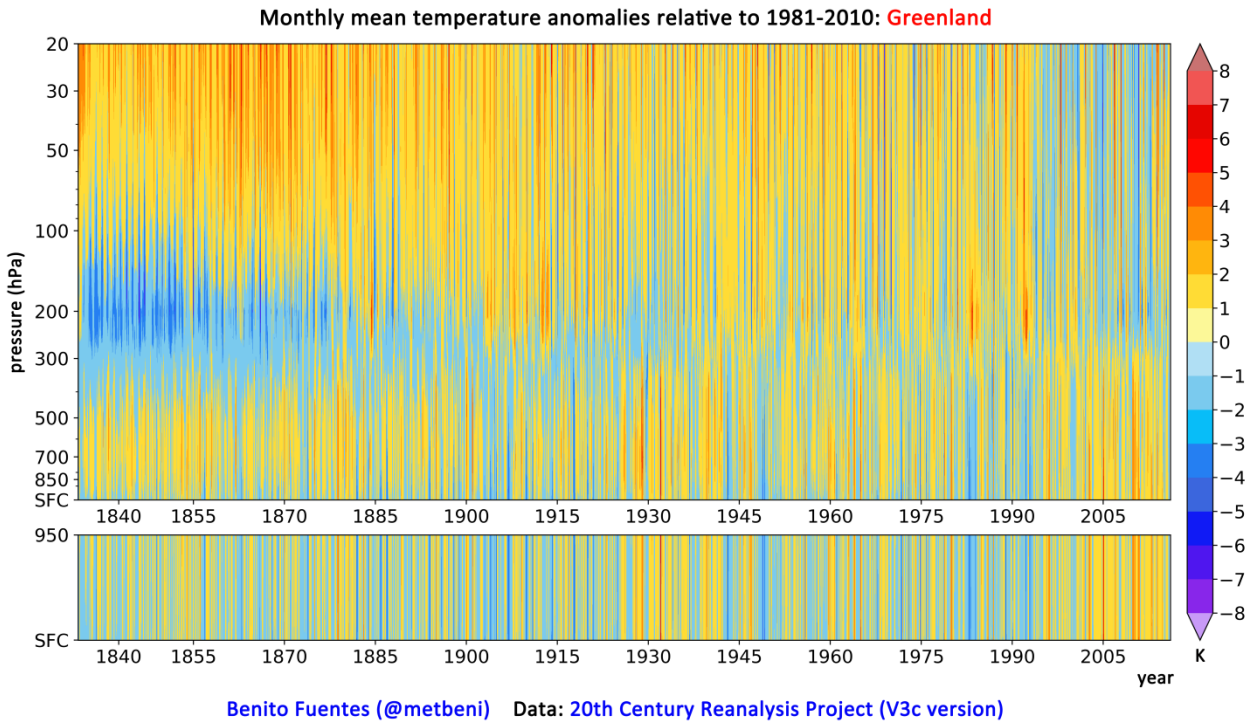

Figura 10.- Stripes en Groenlandia

Referencias

[1] Warming stripes. Climate Lab Book.
http://www.climate-lab-book.ac.uk/2018/warming-stripes/

[2] Twentieth Century Reanalysis Project. National Oceanic and Atmospheric Administration (USA). https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/

[3] Un viaje en autobús. Una manera sencilla de entender el efecto invernadero. Benito Fuentes López. Blog de la Agencia Estatal de Meteorología.
https://aemetblog.es/2016/09/20/un-viaje-en-autobus-una-forma-sencilla-de-entender-el-efecto-invernadero/

[4] Ramaswamy, V., et al. (2001), Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations, *Rev. Geophys.*, 39(1), 71–122. doi: 10.1029/1999RG000065.

[5] Anthropogenic and Natural Influences in the Evolution of Lower Stratospheric Cooling. V. Ramaswamy et al. Science 311, 1138 (2006). doi: 10.1126/science.1122587.

[6] ¿Cómo influyen los volcanes en el clima terrestre? Benito Fuentes. Naukas.
https://naukas.com/2019/07/09/como-influyen-los-volcanes-en-el-clima-terrestre/

[7] Neukom, R., Steiger, N., Gómez-Navarro, J.J. *et al.* No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature* 571, 550–554 (2019). https://doi.org/10.1038/s41586-019-1401-2

[8] El Calentamiento global y la falacia negacionista. (Partes 1, 2 y 3). Benito Fuentes. Naukas
https://naukas.com/2020/02/10/el-calentamiento-global-y-la-falacia-negacionista/
https://naukas.com/2020/02/10/el-calentamiento-global-y-la-falacia-negacionista-parte-2/
https://naukas.com/2020/02/10/el-calentamiento-global-y-la-falacia-negacionista-parte-3/

[9] IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

[10] ¿Un nuevo estado climático en el Ártico? Peio Oria Iriarte. Blog de la Agencia Estatal de Meteorología.
https://aemetblog.es/2018/12/29/un-nuevo-estado-climatico-en-el-artico/