



y el cuarto desde 1965. En particular, ha sido extremadamente húmedo en el sudeste peninsular. El lector interesado puede encontrar más detalles en la sección *Crónicas del Tiempo*.

Las predicciones para el verano

Cuando escribo esta colaboración a finales de junio persiste la anomalía positiva (cálida) de geopotenciales en el casquete polar y no parece fácil que desaparezca en el verano. Además la pérdida de cubierta nivosa en latitudes altas y de mar de hielo en el Ártico actuaría como retroalimentación positiva para el mantenimiento de la anomalía. De hecho las predicciones estacionales de los modelos EUROSIP mantienen la anomalía en promedio para los trimestres junio-agosto y julio-septiembre (figura 3).

Como consecuencia de los meses de predominio de El Niño, la zona tropical en todo el globo permanece con una fuerte anomalía cálida, y en el Pacífico y NO del Atlántico aparecen máximos y mínimos asociados a un tren de onda estacionario que emana del Pacífico.

La zona de la Península y el Mediterráneo, aunque presenta un mínimo relativo en anomalías Z500, es también una zona de anomalías positivas, y podría estar asociada al paso de perturbaciones ciclónicas (danas) atrapadas en un chorro subtropical quizá más intenso de lo normal.

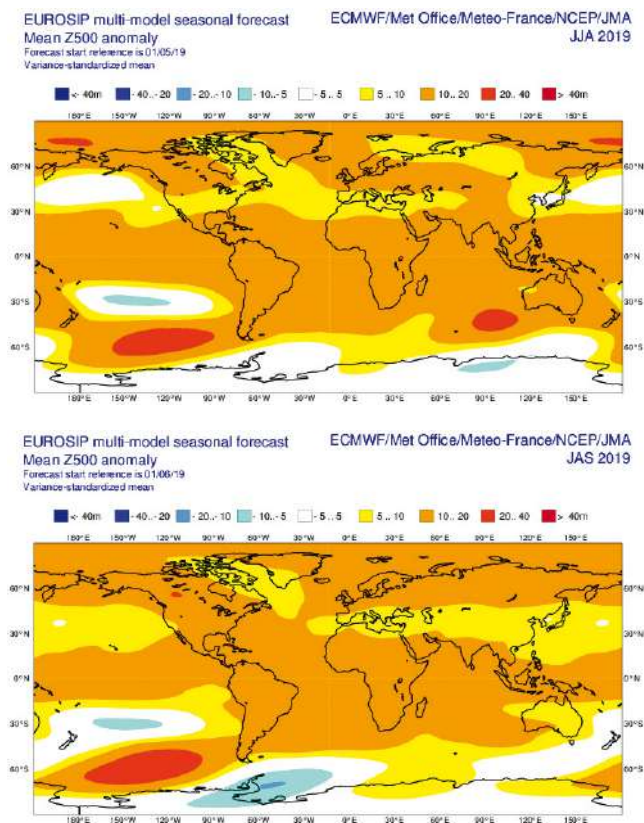


Figura 3. Mapas de anomalías de la altura del geopotencial en 500 hPa previstos por los modelos EUROSIP para los trimestres junio-agosto (arriba) y julio-septiembre (abajo). Fuente ECMWF.

Opinión



Azares del Clima

POR JOSÉ ANTONIO LÓPEZ DÍAZ

LAS CUENTAS ENERGÉTICAS DE LA PRECIPITACIÓN GLOBAL

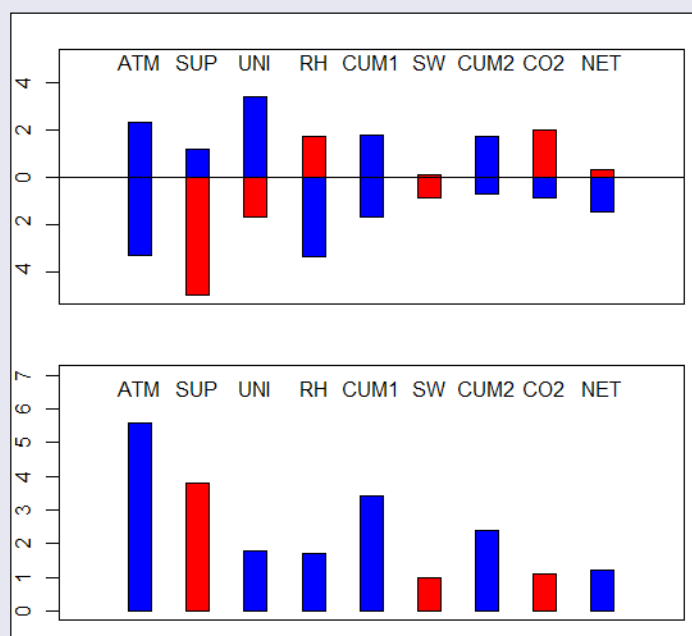
En principio, si aumenta la temperatura media de la atmósfera cabe esperar que también aumente el vapor de agua contenido en ella, de acuerdo con la ecuación de Clausius-Clapeyron. Ésta establece un aumento exponencial de la proporción de vapor saturante (es decir, aquella que como máximo puede contener la atmósfera antes de empezar la condensación en agua líquida) con la temperatura del aire. En concreto la proporción saturante (en g de vapor de agua por cada kg de aire por ejemplo) aumenta un 7 % aproximadamente con cada grado de aumento de la temperatura. A su vez si aumenta el vapor de agua en la atmósfera cabe esperar un aumento correlativo de la precipitación. Pero según indican los modelos climáticos más recientes, el aumento relativo de precipitación con la temperatura es mucho menor de lo permitido por la ecuación de Clausius-Clapeyron, tan solo entre un 1 % y un 3 % de aumento de precipitación por grado de temperatura según el modelo climático, como se ve con importante incertidumbre.

El razonamiento anterior pasa por alto que la evaporación de agua de la superficie terrestre consume mucha energía, unos 2500 J/g, y esa energía pasa a la atmósfera para acabar siendo devuelta cuando el vapor condensa en el equilibrio a largo plazo. Así pues el balance energético de los modelos en la atmósfera debe contener claves de este proceso. Si aumenta la precipitación se libera más calor latente de condensación en la atmósfera, y por tanto debe aumentar el enfriamiento radiativo de la atmósfera que compense el calentamiento de la condensación para mantener el equilibrio térmico a largo plazo. Utilizando modelos radiativos simplificados de la atmósfera se puede desglosar el cambio de balance radiativo provocado por procesos simples, manteniendo el resto de las variables constantes. En la figura 1 se resume el resultado de uno de estos estudios (ver referencia); en la mitad superior de la figura se representa el balance energético de la atmósfera desglosado en el límite superior y en la superficie, y en la mitad inferior el balance total (suma de los anteriores). El color azul indica enfriamiento de la atmósfera consistente por tanto con aumento de precipitación, y el rojo calentamiento.

El proceso ATM corresponde a un calentamiento uniforme de la atmósfera de 1 °C; tanto en el límite superior como en el inferior de la atmósfera hay balance negativo con tendencia al enfriamiento, básicamente aumenta la ra-

diación de onda larga que emite la atmósfera (crece con T^4 según la ecuación de Stefan-Boltzmann), la tendencia neta por este proceso es de más de $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ de enfriamiento. El proceso SUP consiste en un aumento de la temperatura de la superficie terrestre de $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Vemos que en el límite inferior de la atmósfera el aumento de radiación entrante de onda larga provoca una tendencia al calentamiento, compensado con algo de balance negativo en el límite superior (debido a que el calentamiento de la atmósfera provoca que aumente su emisión de onda larga al espacio), resultando un balance neto de calentamiento de más de $3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. El proceso UNI consiste en combinar los dos cam-

por tanto la menor cantidad de radiación emitida hace que la atmósfera tienda a calentarse. El efecto neto es de enfriamiento de alrededor de $1.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Si se combinan todos los cambios anteriores ATM+SUP+RH se obtiene el proceso CUM1, con un balance neto de enfriamiento de la atmósfera de más de $3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Si se compara este enfriamiento con el final NET que es el que aproxima lo que dan los modelos climáticos vemos que es mucho mayor el enfriamiento de CUM1 que NET (casi tres veces mayor), por tanto de actuar solo estos procesos considerados hasta ahora la precipitación prevista por los modelos ante un aumento de temperatura sería mucho mayor.



Balances radiativos ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) en la atmósfera para distintos supuestos (descritos a lo largo del texto), azul indica enfriamiento, rojo calentamiento. Arriba desglose en límites superior e inferior de la atmósfera, abajo el neto. En el balance de arriba, límite superior por encima de 0, límite superficie terrestre por debajo de 0.

bios anteriores SUP y ATM, aumento de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ tanto de la superficie como de la atmósfera.

El supuesto RH analiza el efecto radiativo del vapor de agua, postula un aumento del vapor de agua de la atmósfera tal que mantendría la humedad relativa constante si se aumentara la temperatura de la atmósfera un grado uniformemente como en UNI. El vapor de agua absorbe y emite eficientemente la radiación de onda larga (es el principal gas de efecto invernadero). El aumento de la concentración de vapor de agua en toda la atmósfera hace que la temperatura efectiva de emisión hacia la superficie aumente (por tanto más próxima a la superficie) y por tanto tienda a enfriar la atmósfera; por el límite superior la temperatura de emisión efectiva hacia el espacio disminuye (más alto), y

Los procesos que faltan son dos y ambos provocan calentamiento de la atmósfera. El primero da cuenta del efecto del vapor de agua sobre la radiación solar incidente, pues el vapor de agua también absorbe algo de la radiación de onda corta (visible y próxima); como muestra SW este efecto provoca un calentamiento neto de la atmósfera del orden de $1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. El último proceso que debemos considerar es el aumento de la concentración de CO_2 , responsable del cambio climático considerado. En contraste con el proceso RH del vapor de agua, que enfría más por debajo de lo que calentaba por arriba la atmósfera, el CO_2 reduce mucho más la radiación saliente por el límite superior que por el límite inferior de la atmósfera, con un calentamiento neto del orden de $1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. La razón del distinto comportamiento de estos dos gases de efecto invernadero estriba en su distinta distribución con la altura: el vapor de agua se concentra en capas bajas, y esto hace que la temperatura de emisión efectiva hacia abajo esté próxima al suelo, con lo que la emisión hacia la Tierra es

alta. El CO_2 se distribuye uniformemente con la altura en concentración y por ello la temperatura de emisión efectiva hacia abajo corresponde a capas más altas de la atmósfera, más frías, y emite relativamente mucho menos hacia abajo que el vapor de agua.

El efecto neto de todos los procesos, reflejado en NET, es un enfriamiento de aproximadamente $1.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Estudios como el analizado permiten vislumbrar el complejo entramado de relaciones que participan en la generación de la precipitación, un elemento del clima, por otra parte, absolutamente vital para el ser humano y la biosfera en general. Por desgracia, se puede ver que las incertidumbres en la precipitación, incluso la global, son significativamente mayores que para la temperatura, con lo que esto conlleva a la hora de valorar los impactos del cambio climático provocado por el aumento de gases de efecto invernadero.

REFERENCIAS

Pendergrass, A. G., and D. L. Hartmann, 2014: The atmospheric energy constraint on global-mean precipitation change. *J. Climate*, 27, 757-768, doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00163.1>.