



## La amplificación ártica y el verano 2019

JOSÉ MARÍA SÁNCHEZ-LAULHÉ

Una señal importante del calentamiento global antropogénico es la subida de las temperaturas en la superficie en el Ártico a un ritmo entre dos y cuatro veces mayor que el del resto del mundo, fenómeno conocido como amplificación ártica, AA. Hemos tratado en otras ocasiones la influencia de la AA en la circulación en las latitudes medias en invierno. En esta entrega de *Mirando un mapa* intentaremos dar una idea de su importancia en la circulación del verano a través de los mapas medios de la altura del geopotencial y sus anomalías en 2019.

La circulación en verano en las latitudes medias es, en comparación con la de invierno, más débil y más barotrópica y las corrientes en chorro climatológicas de la alta troposfera están orientadas más zonalmente. Esta orientación del chorro promueve la formación de trenes de onda que circundan el planeta, que pueden originar ondas estacionarias de gran amplitud, que es un marco propicio para la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extre-

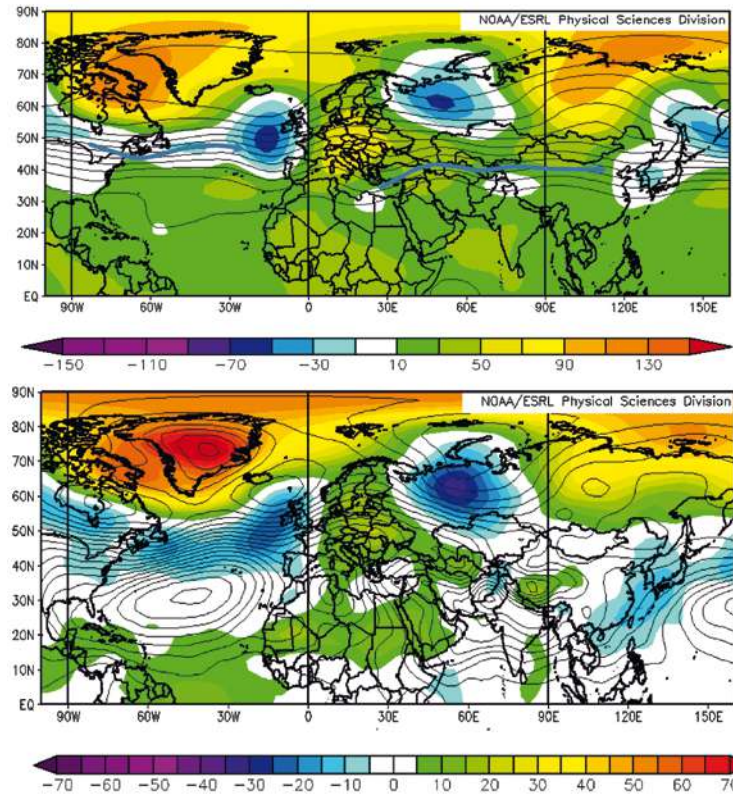


Figura 1. Promedios de la altura del geopotencial y sus anomalías para los meses JJA; arriba: en 300 hPa; abajo en 850 hPa.

mos. Una de las causas de esta disposición geográfica de los chorros es la escasa influencia en latitudes medias de la variabilidad de la temperatura superficial del mar (TSM) tropical en verano (ver el recuadro final). Por el contrario, la circulación atmosférica es muy sensible durante esta estación a retro-interacciones tierra-atmósfera en los que interviene principalmente la humedad del suelo.

La figura 1 muestra - para los meses de verano, JJA, de 2019 - el campo de la altura del geopotencial medio en 300 hPa, Z300, (contornos) y sus anomalías medias (en color) respecto al periodo de referencia 1981-2010. Las anomalías positivas (cálidas) y negativas (frías) tienen una correspondencia grande con las temperaturas medias en superficie sobre tierra en estos meses (figura 2).

Como consecuencia del cambio climático, hay un predominio de las anomalías positivas (cálidas), siendo este año particularmente intensas en el Ártico, heredadas de la primavera<sup>1</sup>. Esto se traduce en que tanto la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) como la Oscilación Ártica (AO) de verano hayan estado predominantemente en fase negativa (figura 3).

La figura 2 muestra - para los meses de verano, JJA, de 2019 - el campo de la altura del geopotencial medio en 300 hPa, Z300, (contornos) y sus anomalías medias (en color) respecto al periodo de referencia 1981-2010. Las anomalías positivas (cálidas) y negativas (frías) tienen una correspondencia grande con las temperaturas medias en superficie sobre tierra en estos meses (figura 2).

### La NAO de verano

En comparación con la de invierno, la NAO de verano no es tan robusta, sus centros de acción se encuentran desplazados hacia el norte (figura 4b), tienen un área geográfica de acción menor, y el patrón del dipolo es más débil.

A partir de 2007 los veranos han ido derivando hacia fases de la NAO cada vez más negativas,

Surface air temperature anomaly for June 2019 to August 2019 relative to 1981-2010

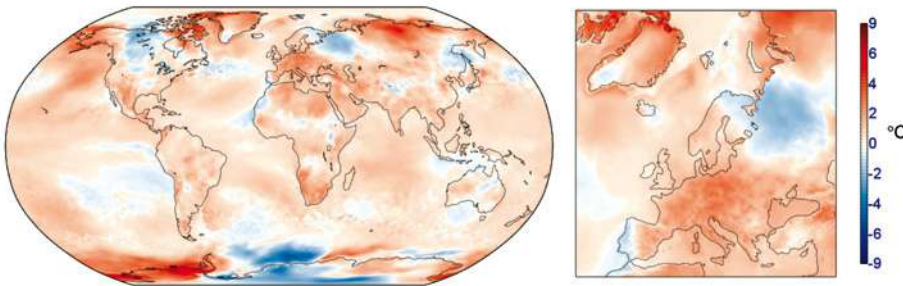


Figura 2. Anomalía media de la temperatura del aire en superficie para los meses de verano JJA respecto a 1981-2010

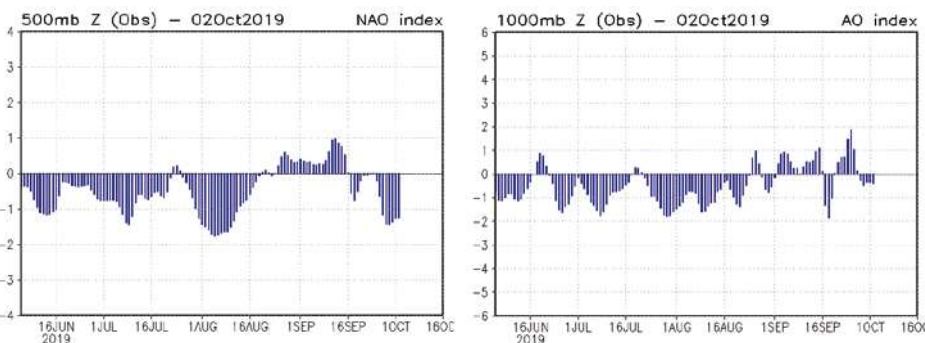


Figura 3. Índice NAO e índice AO; fuente: NWS de NOAA

<sup>1</sup> Mirando un mapa "Primavera de 2019 y calentamiento final de la Estratosfera" Tiempo y Clima Vol. 5, 65, julio de 2009

caracterizadas por una anomalía anticiclónica sobre Groenlandia y una anomalía ciclónica sobre el NO de Europa. Las proyecciones de los modelos climáticos apuntan a una NAO cada vez más negativa con el calentamiento antropogénico. Este patrón cada vez más predominante ha causado rápidos derretimientos de la capa de hielo de Groenlandia y veranos muy húmedos al NO de Europa. Los días 29 y 30 de julio de este año, Groenlandia fue alcanzada por una ola de calor procedente de Europa que, según el NSIDC<sup>2</sup>, estableció un récord de temperatura en la estación Summit y provocó que entre el 30 de julio y el 3 de agosto se derritiera alrededor del 90 por ciento de la capa de hielo superficial. La escorrentía de la fusión de hielo se estimó en 55 mil millones de toneladas durante esos días, lo que supone unos 40 mil millones de toneladas más que el promedio de 1981 a 2010 para el mismo período de tiempo. En agosto de 2019, la extensión del hielo marino fue aproximadamente un 35 % menor que el promedio de 1981-2010, y el más bajo desde 2012.

una AO positiva, que fue la fase que predominó en el verano de 2018. La fase positiva está asociada a una disposición media zonal opuesta de las anomalías, con predominio anticiclónico en las latitudes medias, y a un importante chorro polar en el Ártico, que con el chorro subtropical crea una situación de doble chorro que favorece la formación de altas de bloqueo entre ambos.

### Tren de ondas circumpolar

Aunque el predominio en las latitudes medias de un tipo de anomalías venga asociado a la fase de la AO, la distribución de las anomalías de la altura del geopotencial en estas latitudes está determinada por las teleconexiones debidas al efecto guía de ondas, o sea, a los efectos de encauzamiento de las ondas troposféricas de baja frecuencia por las corrientes en chorro del verano, que hace que puedan propagarse a gran distancia sin disiparse. Así en este año de AO negativa, se aprecia en la figura 1 un tren de ondas estacionario cuyas principales anomalías en Eurasia son: las anomalías positivas (o cálidas) de Europa y de Siberia central, y las anomalías negativas (o frías) del oeste de Siberia y del Atlántico oriental, que es el centro de acción de la NAO de latitudes medias (figura 4b). Este patrón no es exclusivo de este verano, sino que es una tendencia observada de los últimos años.

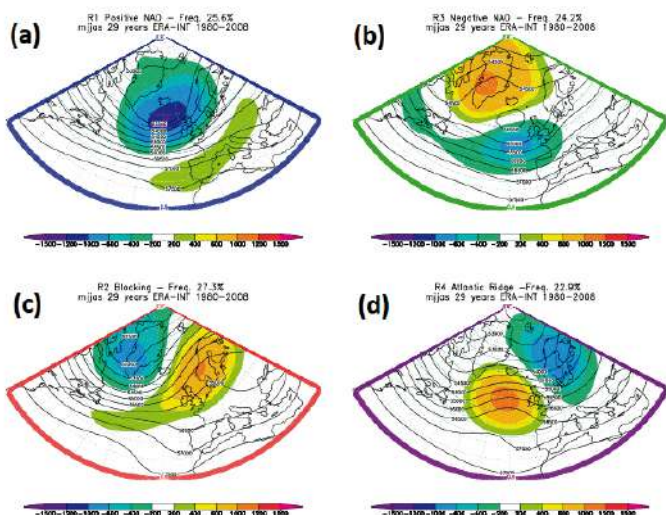


Figura 4. Regímenes de tiempo del sector Europa-Atlántico norte, para los meses de abril a septiembre, calculados por Laura Ferranti a partir de los reanálisis ERA40 (ECMWF)

### La AO en verano

La fase negativa de la AO, que ha predominado este verano de 2019, está asociada a anomalías positivas de altura del geopotencial sobre Groenlandia y el océano Ártico, y a una banda donde predominan las anomalías negativas entre 40° y 60° N. Una AO negativa favorece menos las condiciones cálidas en Europa que

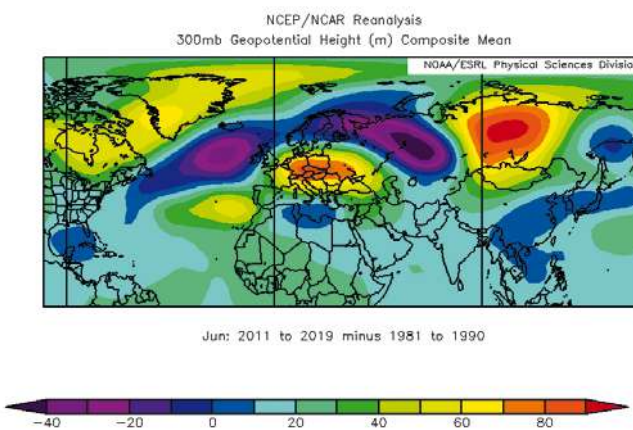


Figura 6. Tendencia de la altura del geopotencial en 300 hPa, en metros, entre la década de 1980 y la de 2010

En la figura 6, donde se muestra la diferencia de Z300 media entre los nueve últimos años y la década de los 80, se puede apreciar esta tendencia. Aparte de una tendencia de aumento de Z300 casi general sobre Eurasia, achacable al cambio climático global, hay un particular aumento de Z300 tanto en Siberia central - Mongolia como en las llanuras europeas, áreas donde se han producido estos últimos años olas de calor en verano e incendios forestales con mayor frecuencia que en las áreas circundantes. Por el contrario hay una disminución de Z300 en el oeste de Siberia.

### La vaguada del oeste de Siberia y la dorsal europea

La tendencia negativa de Z300 en Siberia occidental ha sido relacionada por Sato and Nakamura<sup>3</sup> a pro-

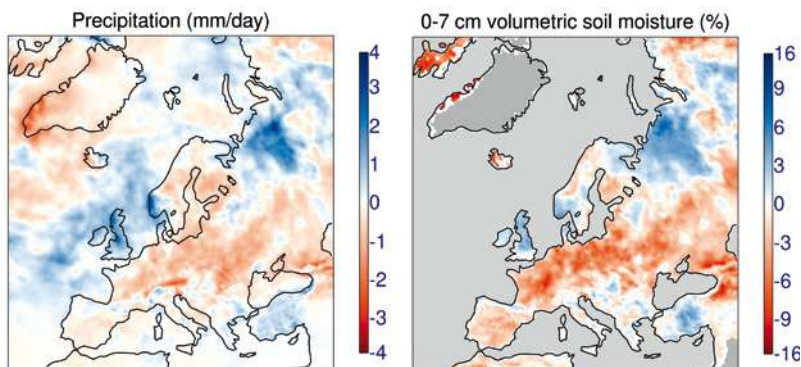


Figura 5. Anomalía media de la precipitación y de la humedad del suelo para los meses de verano JJA respecto a 1981-2010

<sup>2</sup> <https://nsidc.org/greenland-today/>



cesos dinámicos internos del sistema acoplado tierra-atmósfera relacionados con la AA: como consecuencia de la AA se ha producido en los últimos años un aumento de las precipitaciones de nieve en las llanuras de Siberia occidental en el invierno, que, con la fusión de la nieve en primavera, suministra grandes cantidades de agua al suelo. En mayo, al desaparecer la nieve, emergen al exterior suelos cargados de humedad en latitudes medias (figura 5), que enfrían por evaporación las primeras capas de la atmósfera. Este enfriamiento desarrolla una vaguada en niveles medios y altos de la troposfera. Entre atmósfera y suelo se produce una retroacción positiva, pues las bajas presiones de la troposfera realimentan la humedad del suelo, que se mantiene anómalamente húmedo durante el verano (figura 5), y que a su vez mantiene la vaguada.

Una consecuencia de la presencia de la vaguada en el oeste de Siberia es la formación de dorsales estacionarias, corriente arriba en Europa, afectando al este de España, y corriente abajo en Siberia central. Estas dorsales también se realimentan por procesos internos del sistema tierra-atmósfera: la disminución progresiva de la humedad en los suelos subyacentes por falta de precipitaciones bajo las anomalías positivas (suelos anómalamente secos, figura 5) origina una disminución del transporte de calor latente hacia las capas más bajas de la troposfera y un aumento del transporte calor sensible, que a su vez intensifica las dorsales.

## La vaguada del NO del Atlántico y la temperatura del agua del mar

La tendencia negativa de Z300 en el Atlántico (figura 6) se debe en parte al predominio de la NAO negativa en los últimos años, a lo que no es ajeno la desaceleración sin precedentes que está experimentando la circulación meridional del Atlántico (AMOC)<sup>4</sup>, que realiza el transporte de norte a sur a gran escala en el océano Atlántico, probablemente causada por el aumento de la fusión en Groenlandia.

Sin embargo este año las anomalías de la TSM al oeste de las islas Británicas han sido cálidas mientras que en el SO de la Península han sido frías. Estas anomalías se pueden explicar por el desplazamiento de la corriente en chorro a latitudes más bajas que intensificó las corrientes oceánicas atlánticas en las proximidades de la Península (figura 7). La corriente Europea del Sur, dirigida hacia el polo, mantuvo el Atlántico oriental, al norte de la Península, más cálido de lo normal; mientras que las corrientes de Madeira y de las Azores, mantuvieron las aguas de Portugal, del Golfo de Cádiz y del noroeste de África más frías de lo normal. Las anomalías frías costeras de la Península y el predominio de la componente oeste

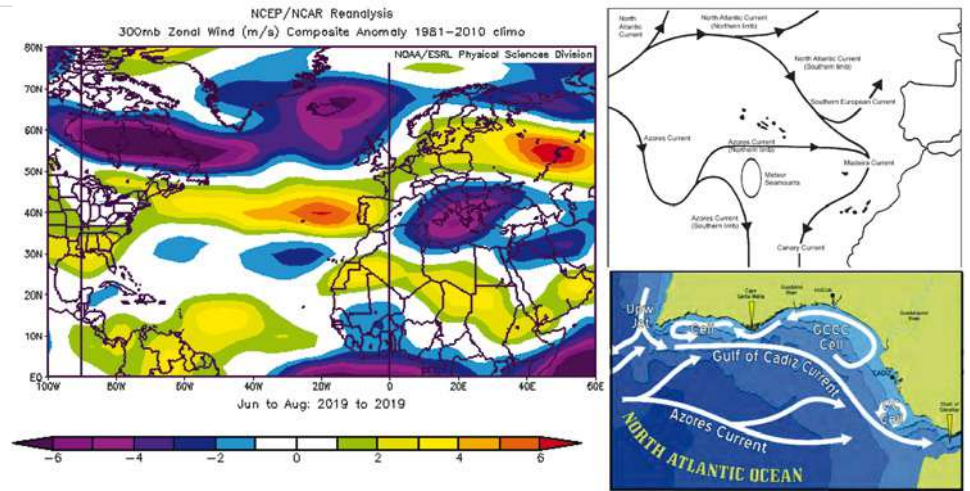


Figura 7. Izquierda: anomalías del viento zonal en 300 hPa para el verano (JJA). Derecha: representación esquemática de los principales corrientes oceánicas superficiales en el entorno de las islas Azores (fuente: Mironov 2006<sup>5</sup>) y en el golfo de Cádiz (fuente: MITECO)

del flujo atmosférico (figura 1) hicieron que, en promedio, hubiera temperaturas relativamente más frescas en la franja oeste-sudoeste de la Península (figura 2).

## ¿Está el desplazamiento hacia el sur de la corriente en chorro relacionado con la AA?

Algunos estudios sugieren que la AA reduce el gradiente de temperatura del ecuador al polo en superficie y que esta reducción ya ha causado que los oestes de latitudes medias se hayan desacelerado y que la corriente en chorro haya perdido intensidad y se haya desplazado hacia el ecuador (condiciones congruentes con la tendencia a AO y NAO negativas). Sin embargo las proyecciones para fin de siglo de los modelos climáticos indican un desplazamiento hacia el polo de los chorros, y concretamente en verano del chorro sobre el Atlántico norte, lo que significa que en la posición del chorro intervendrán, a la larga, mecanismos más influyentes que la AA.

## Ciclones tropicales y la DANA de septiembre

A finales de agosto la AO y la NAO dejaron de ser claramente negativas. La influencia de los huracanes Dorian y Gabrielle (figura 8), en sus incursiones hacia latitudes medias transformó profundamente la circulación. La figura 9 muestra los campos medio Z300 y sus anomalías para los periodos 24-31 de agosto, 1-8 de septiembre y 9-16 de septiembre. Al final de agosto se formó una dorsal sobre la península del Labrador a causa del calentamiento generado por la liberación de calor latente en Dorian, que generó un tren de ondas de Rossby con anomalía anticiclónica al SO de Groenlandia y un anticiclón de bloqueo sobre el norte de Europa (régimen de bloqueo; figura 4c). En la primera semana de septiembre las anomalías se desplazaron hacia el oeste, forzadas por la presencia de la tormenta tropical Gabrielle que generó una gran dorsal en el

<sup>3</sup> Sato T, Nakamura T (2019). Intensification of hot Eurasian summers by climate change and land-atmosphere interactions. Scientific Reports 10866 9 1

<sup>4</sup> Rahmstorf, S. et al. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. Nat. Clim. Chang. 5, 475-480 (2015).

<sup>5</sup> La corriente de Azores penetra en el Golfo de Cádiz y acaba alimentando al mar Mediterráneo por el Estrecho de Gibraltar (figura 7).

Atlántico. La presencia de las anomalías estacionarias sobre Eurasia hizo que la vaguada atlántica, al progresar sobre Europa, ganara en amplitud y finalmente se acabara rompiendo y aislando la DANA que produjo catastróficas inundaciones en España en la segunda semana de septiembre (ver *Trazas de la Temperie* en este número de *TyC*).

Según las proyecciones climáticas, los impactos de los fenómenos meteorológicos extremos serán probablemente cada vez mayores en verano. Los cambios en la dinámica de la atmósfera tienen el potencial de causar rápidas transiciones a escala regio-

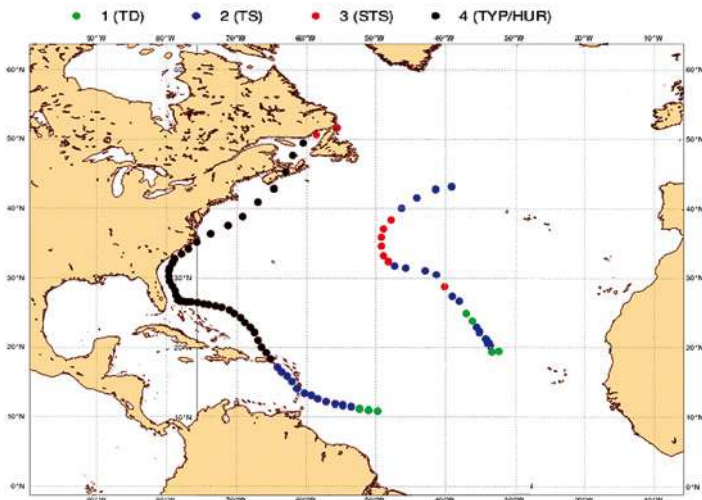


Figura 8. Trayectorias de los ciclones Dorian (trayectoria de la izquierda del 25 de agosto al 9 de septiembre) y Gabrielle (trayectoria de la derecha, del 4 al 10 de septiembre). Fuente: ECMWF

nal, como las ocurridas al final del verano de 2019 y, en esta estación, los efectos sinérgicos entre los mecanismos termodinámicos y dinámicos causantes de tiempo extremo pueden actuar en la misma dirección para causar fenómenos muy extremos.<sup>7</sup> Así la dorsal europea de origen termodinámico y dinámico, que tiene una presencia creciente en los últimos años - achacable al calentamiento global y concretamente a la AA - puede actuar como bloqueo a la propagación de una vaguada anómala forzada desde el Atlántico por las anomalías asociadas a ciclones tropicales. La tendencia a una circulación de oeste más débil en verano, causada por la AA, hace que las perturbaciones de escala sinóptica atrapadas en la guía de ondas asociadas al chorro adquieran gran amplitud y lento movimiento, lo que es imprescindible para que se produzcan fenómenos extremos, ya sean olas de calor o inundaciones. A esto se suma la mayor disponibilidad de agua precipitable sobre los mares por el aumento de la temperatura superficial del agua del mar.

## Diferencias de la circulación atmosférica en verano respecto a la de invierno

En verano, el menor gradiente de temperatura de polo a ecuador (en comparación con el invierno) da lugar a que la corriente de los oeste en niveles altos sea más débil y estrecha, y a que no exista el vórtice estratosférico, por lo que no hay influencia estratosférica sobre la meteorología boreal en verano.

Mientras en invierno las corrientes en chorro en niveles altos climatológicos del verano están inclinadas de OSO a ENE, en verano están orientados más zonalmente. En parte esto se debe a que en verano las variaciones en las TSM en los trópicos no tienen la influencia sobre la circulación que tienen en invierno. La posición de las anomalías cálidas de TSM en los trópicos determina dónde tiene lugar la convección profunda más intensa, cuya liberación de calor latente en niveles altos puede disparar ondas de Rossby 2D que se propagan hacia el polo e influyen la meteorología de las latitudes medias. Esto ocurre porque El Niño-Oscilación Sur (ENSO), que es el mecanismo dominante de la variabilidad de la TSM en los trópicos, tiende a un máximo en el invierno boreal y es mucho más débil durante el verano boreal, y también porque la capacidad de las ondas de Rossby de propagarse hacia el polo se encuentra limitada por el predominio de los vientos de levante en la troposfera tropical en verano.

Por el contrario, el estado de la criosfera desde el final del invierno hasta el principio del verano puede influir en la intensidad y latitud del chorro en verano. La cubierta de nieve durante la primavera y el verano se ha visto disminuida drásticamente en los últimos años, incluso más rápidamente que el hielo marino ártico. Sin nieve el albedo superficial es más bajo y las áreas de tierra absorben más radiación solar. Además el menguante manto de nieve en primavera acorta el efecto de secado hasta mitad del verano favoreciendo entonces temperaturas más altas por la supresión del enfriamiento por evaporación. Estos procesos termodinámicos en conjunción con la reducción de nieve al principio de la estación puede afectar a la circulación regional y hemisférica.

Consecuencia de la orientación zonal y la menor anchura de los chorros en verano es su relevancia como guía de ondas. (i.e., el encauzamiento de las corrientes en chorro sobre las ondas troposféricas de baja frecuencia). Cualquier calentamiento anómalo genera una secuencia de ondas de similares longitudes de onda corriente abajo en el chorro, formando un tren de onda estacionario que afecta a las condiciones meteorológicas en lugares alejados. Si se genera un tren de ondas circumpolar pueden dar lugar a patrones de tiempo estacionarios en las latitudes medias de una duración más larga que las perturbaciones sinópticas.

Recientes estudios han demostrado que cuando ondas de escala sinóptica (con longitudes de onda 6-8) quedan atrapadas en las proximidades de una guía de onda circumpolar zonal, pueden aumentar mucho sus amplitudes. El mecanismo de resonancia de ondas puede conducir a condiciones meteorológicas muy persistentes y anómalas en todo el hemisferio que pueden originar extremos de gran impacto en verano como olas de calor e inundaciones.

Sin embargo, la orientación zonal del chorro climatológico no significa que el flujo sea menos ondulatorio en verano que en invierno: La ondulación total en los campos de altura del geopotencial en escalas de tiempo subsinóptica a subestacional es tan pronunciada como en invierno, si no más.<sup>7</sup>

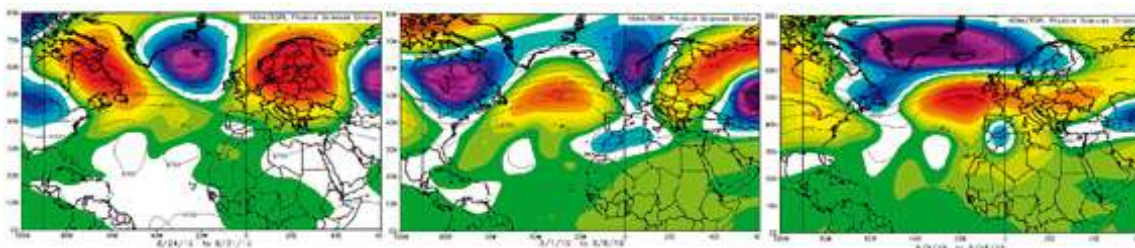


Figura 9. Altura del geopotencial en 300 hPa y anomalías para: 24 a 31 de agosto (izquierda), 1 a 8 de septiembre (centro), y 9 a 16 de septiembre (derecha)

<sup>6</sup> Mironov, 2006. Biogeography of the North Atlantic seamounts origin of the fauna of the Meteor Seamounts, north-eastern Atlantic.  
<sup>7</sup> Coumou D et al. The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. Nat. Commun. 2018, 9 2959