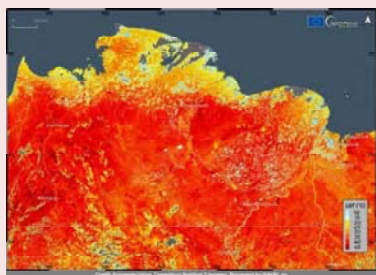


# LA AMPLIFICACIÓN ÁRTICA, SU CONEXIÓN CON LOS FENÓMENOS DE LATITUDES MEDIAS Y LA OLA DE CALOR DE 2020 EN SIBERIA

Peio Oria Iriarte

Meteorólogo, delegado territorial de AEMET en Navarra

(publicado en el blog de AEMET  
el 29 de junio de 2021)



*En esta contribución analizamos algunos procesos físicos que se suponen relacionados con la amplificación ártica o polar, fenómeno por el cual **las latitudes altas de nuestro hemisferio se están calentando entre 2 y 3 veces más que el resto del planeta**. Paralelamente se ha observado un aumento en la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos en latitudes medias, lo que ha conducido a numerosos investigadores a plantear una relación causal. Por otro lado, se considera el papel del calentamiento global y determinadas configuraciones atmosféricas en la **excepcional y prolongada ola de calor acontecida en Siberia entre enero y junio de 2020** y que culminó con el mediático [récord de 38 °C en la ciudad rusa de Verkhoyansk](#).*

## Introducción

El 19 de mayo de 2021 se celebró la segunda cumbre meteorológica del Ártico, auspiciada por el Servicio Meteorológico Islandés, como país que ha ostentado la presidencia bienal del Consejo Ártico. Con participación de los máximos representantes de organismos supranacionales como la Organización Meteorológica Mundial (OMM), EUMETNET, EUMETSAT, ECMWF, YOPP y Servicios Meteorológicos Nacionales de los países árticos, la cumbre sirvió para poner de relevancia el acentuado cambio climático que lleva experimentando esta región del planeta en las últimas décadas. Paralelamente, el Programa AMAP, de Monitorización y Evaluación del Ártico, y perteneciente al Consejo Ártico, lanzó el [resumen para responsables de políticas sobre la actualización del informe de cambio climático en el Ártico](#). En este informe se recogen diversos hallazgos científicos relacionados con las alteraciones recientes del clima y sus consecuencias observadas en los

últimos años. Además del cambio en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, del impacto en las comunidades y ecosistemas árticos y de las retroalimentaciones potenciales en los gases de efecto invernadero, quizá el mensaje más llamativo es el de que **el calentamiento en el Ártico ha sido tres veces más veloz que en el resto del planeta durante el periodo 1971-2019**, lo que se conoce como *amplificación ártica* (figura 1).

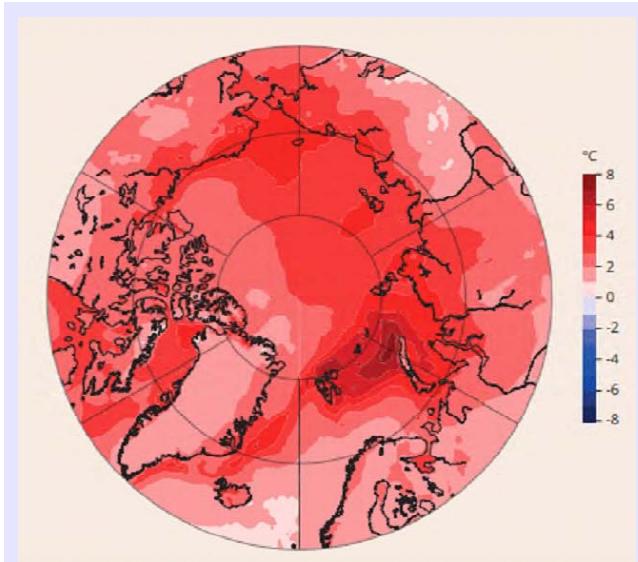


Figura 1. Tendencia de la temperatura media anual de la superficie del Ártico en el periodo 1971-2019 construida con datos de observación y modelos climáticos. Tomado de AMAP Assessment 2021: Arctic Climate Change Update 2021, Key Trends and Impacts.

El prolongado periodo de altas temperaturas (respecto a lo normal) que experimentó prácticamente la totalidad de Siberia durante los primeros meses de 2020 fue también un aspecto comentado. Se hizo hincapié en la persistencia e intensidad de las desviaciones térmicas positivas sobre vastas extensiones del continente asiático, y que llamaron poderosamente la atención de la comunidad científica del clima. No en vano las anomalías sostenidas durante el periodo entre enero y junio alcanzaron en torno a 3-4 °C sobre los millones de kilómetros cuadrados que abarca el conjunto de Siberia, y que localmente llegaron incluso a 5-6 °C. Asimismo se asume que semejantes condiciones, no asociables a un episodio puntual, serían esperables para finales de siglo de acuerdo a deter-

minados escenarios de cambio climático y que su probabilidad sería ínfima en un contexto ajeno al actual calentamiento global.

Los cambios en el clima ártico en las últimas tres décadas son definitivamente sustanciales. Como se ha observado, los aumentos de la temperatura del Ártico desde 1980 han superado a los del promedio del hemisferio norte en un factor comprendido entre dos y tres. Sobre tierra, al norte de 60° N, 17 de los últimos 20 años han exhibido la mayor anomalía de la temperatura media anual del aire desde 1900. La *amplificación ártica* también se manifiesta en la pérdida de hielo marino, glaciares, nieve y permafrost, una temporada de aguas oceánicas abiertas más larga y cambios en los ecosistemas árticos. El hielo marino ha experimentado una disminución sin precedentes en las últimas tres décadas con **una reducción de dos tercios en el volumen total de hielo marino**. Durante mayo y junio se han producido disminuciones comparables en la capa de nieve estacional. La amplificación ártica es más fuerte durante el otoño y el invierno, con los valores más altos en las regiones de pérdida de hielo marino, mientras que las zonas de mayor calentamiento en verano se sitúan sobre Groenlandia y tierras de altas latitudes, donde las tasas de pérdida de nieve primaveral superan incluso a las del hielo marino.

## La amplificación ártica

Desde los años 90 del pasado siglo, las temperaturas invernales en el Ártico han mostrado una tendencia de calentamiento muy sostenida y a un ritmo acelerado respecto al resto del planeta (figura 2). La consecuencia más directa de lo anterior se refleja en el paulatino y veloz retroceso de la extensión de hielo marino ártico en verano y comienzos del otoño en respuesta a varias retroalimentaciones que se comentarán posteriormente. La amplificación no está restringida a las capas más bajas de la troposfera, caracterizadas por la potente inversión térmica cercana al suelo, sino que se propaga hasta la baja estratosfera con un máximo secundario entre 200 y 100 hPa (y no previsto por los modelos, a diferencia del máximo principal de la baja troposfera, situado algo más al sur, figura 3 b y c).

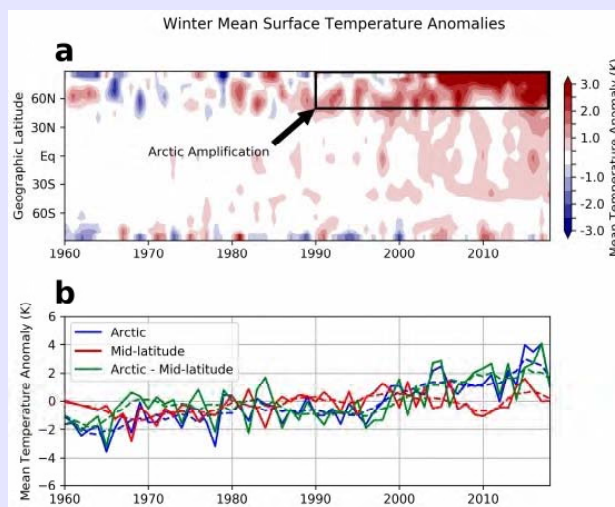


Figura 2. Arriba: anomalía de la temperatura media invernal (diciembre, enero y febrero) entre 1960 y 2019 respecto al periodo de referencia (1951 a 1980). El área dentro de la caja negra muestra el calentamiento amplificado en el Ártico (WENDISCH, M. *et al.* [Understanding causes and effects of rapid warming in the Arctic. Eos 98](#) (2017); datos procedentes del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA). Abajo: media anual (línea gruesa) y media móvil quinquenal (línea discontinua) de la serie

temporal de anomalías de temperatura en los meses invernales. Ártico: 60-90 °N en azul, latitudes medias: 30-60° N en rojo, y la diferencia entre las temperaturas promedio del Ártico y el área de latitudes medias (verde). Datos provenientes del reanálisis de NCEP/NCAR. Extraído de COHEN, J., ZHANG, X., FRANCIS, J. *et al.* [“Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather”](#). *Nat. Clim. Chang.* 10, 20-29 (2020).

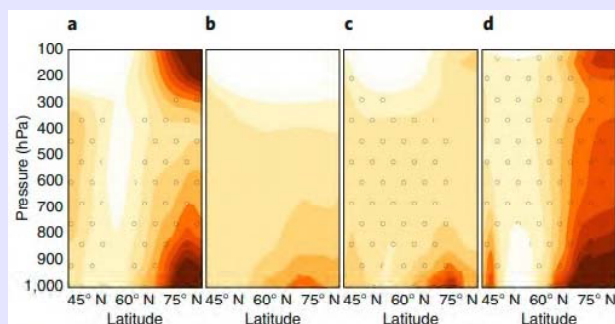


Figura 3. Tendencias en las temperaturas invernales (D-E-F) promediadas zonalmente en el periodo 1980-2019. a) Promedio de los productos de reanálisis MERRA-2, ERA5, JRA-55 y CFSR. b) Media del ensemble multimodelo empleado en CMIP5 (quinto proyecto de intercomparación de modelos climáticos). c) Media del multimodelo AMIP (proyecto de intercomparación de modelos atmosféricos). d) Lo mismo que c) para el miembro del *ensemble* que muestra una mayor correlación con la media del reanálisis a).

Extraído de Cohen, J., Zhang, X., Francis, J. *et al.* [“Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather”](#). *Nat. Clim. Chang.* 10, 20-29 (2020).

### **Las retroalimentaciones o feedbacks**

El concepto de *amplificación ártica* está inevitablemente ligado al de *retroalimentación o feedback*. El calentamiento no uniforme espacial ni estacionalmente se ve influido por una multitud de procesos que afectan a las distintas componentes y escalas del sistema climático. El estudio de las retroalimentaciones que afectan al clima del Ártico normalmente se basa en dos agrupaciones principales. Por un lado, desde un enfoque orientado a si los procesos son forzados local o remotamente y por otro en base al origen del mecanismo físico. En el primer caso, los **forzamientos locales** incluyen la nieve, el albedo del hielo marino (sobre todo en verano), los flujos turbulentos en capas superficiales, el almacenamiento de calor por el océano, la modificación de la capa de mezcla oceánica, la nubosidad y las componentes radiativas y el aislamiento térmico del hielo (en invierno) mientras que los **remotos** involucran sobre todo a los transportes atmosférico y oceánico de calor y humedad a gran escala (desde los trópicos o latitudes medias al Ártico). Recientemente se ha postulado además que ambos tipos de mecanismos pueden interactuar y amplificarse mutuamente.

En cuanto a la diferenciación del origen del proceso físico que produce la retroalimentación, se distingue entre aquellos en los que la temperatura juega un papel principal y en los que las componentes radiativas del vapor de agua y la nubosidad parecen más relevantes.

Entre los procesos en los que la **temperatura** desempeña un rol principal, debemos advertir que no se considera únicamente el estado de la superficie, sino un perfil vertical de temperatura a lo largo de toda la [troposfera](#). A medida que la superficie se calienta, se irradia más energía al espacio en latitudes bajas, en comparación con el Ártico. Este efecto se puede atribuir, por un lado, a un menor aumento en la emisión de radiación de cuerpo negro ( $R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ ) por unidad de calentamiento a temperaturas más frías (por ejemplo, a 30 °C un forzamiento externo de 1 W m<sup>-2</sup> puede ser equilibrado por un calentamiento de 0,16 °C, mientras que a -30 °C se requiere un calentamiento de 0,31 °C (el doble) para equilibrar el mismo forzamiento) y, por otro, a la diferente estructura vertical del calentamiento en latitudes altas y bajas: un típico perfil de temperaturas en los trópicos muestra un acople entre los niveles bajos y altos de la troposfera, de tal manera que la liberación de calor latente en nubes convectivas profundas se convierte en un efectivo mecanismo de transporte de energía. En un clima cálido, las porciones de aire liberan más calor latente, aumentando así el gradiente adiabático húmedo y causando un mayor calentamiento en la troposfera superior que en la superficie. La clave es que se requiere un menor aumento en las temperaturas de la superficie para compensar el desequilibrio radiativo en el tope de la atmósfera. En el Ártico, el aire frío y denso cerca de la superficie apenas se mezcla con el aire de capas superiores pasando a ser la radiación el mecanismo de acoplamiento primario. Debido a ello el calentamiento de la superficie permanece confinado a las partes más bajas de la atmósfera. De acuerdo a este perfil térmico vertical, se requiere un mayor aumento de las temperaturas de la superficie para equilibrar el balance energético en el tope de la atmósfera.

El *feedback* hielo marino-albedo es probablemente el proceso más fácilmente entendible desde un punto de vista físico. La nieve acumulada sobre el hielo marino posee una reflectancia en las longitudes de onda de la luz solar que alcanza un 80 % mientras que en las

áreas abiertas libres de hielo es solo del 7 %. La reducción del hielo marino ha disminuido el poder de albedo en el conjunto del Ártico del 52 % al 48 % desde el año 1979 contribuyendo a una mayor absorción de calor por parte del sistema climático del Ártico. En general, se asume que este no es el principal proceso de retroalimentación y que el papel del vapor de agua es seguramente más importante. De hecho, la amplificación ártica se produce también en modelos climáticos sin variaciones en la cobertura nivosa y de hielo.

Durante el verano y principios de otoño, una mayor pérdida de hielo marino en los mares árticos hace que se acumule calor en la capa de mezcla oceánica, debido básicamente al *feedback* hielo marino-albedo. En consecuencia, la absorción de energía potencia un ciclo de evaporación más activo y, sobre todo, un exceso de flujo de calor vertical dirigido de abajo a arriba. En la estación invernal, una mayor radiación de onda larga entrante en las capas bajas de la atmósfera da lugar al aumento de temperatura. Los mayores incrementos térmicos promedio debidos a la amplificación ártica se producen precisamente durante el invierno, donde la temperatura ha aumentado ya cerca de 4 °C desde los años 70, e incluso 8 °C en determinadas regiones. Especialmente remarcables son los periodos entre diciembre y marzo de los años 2016 y 2018, y en los que el conjunto del Ártico sufrió anomalías de temperatura próximas a 6 °C.

En todos los procesos anteriormente descritos se asume que una componente importante de forzamiento es local, es decir, en las zonas de mares abiertos con un retroceso de hielo más prominente es donde las retroalimentaciones se potencian y donde, en consecuencia, las anomalías de temperatura se disparan. La costa norte del archipiélago de Nueva Zembla, bañada por el mar de Barents, es un magnífico ejemplo de uno de esos lugares. El calentamiento en los últimos 50 años llega en algunas zonas hasta 8-10 °C convirtiéndose en la zona del planeta en la que la temperatura ha aumentado más aceleradamente. En resumen, entre los *feedbacks* forzados localmente, la transferencia de calor entre el océano y la atmósfera se considera con carácter general el mecanismo fundamental de la amplificación ártica y sus efectos son observables durante el invierno. Por otro lado se reconoce que las nubes y el vapor de agua contribuyen al incremento en el flujo radiativo de longitud de onda larga en la baja troposfera ártica aunque la incertidumbre en el papel de las nubes es alta y de hecho no hay acuerdo en los resultados del CMIP5 acerca de si el papel retroalimentador de las nubes puede suponer un mayor enfriamiento o calentamiento en la baja troposfera ártica a lo largo del conjunto del año.

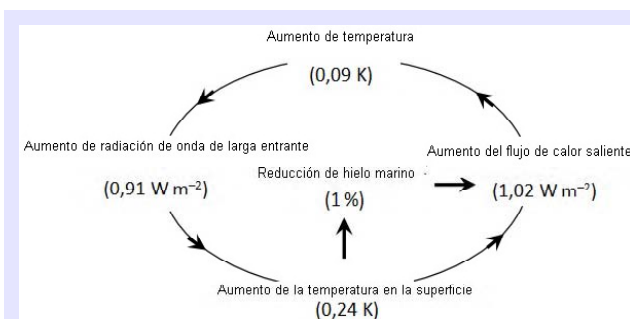
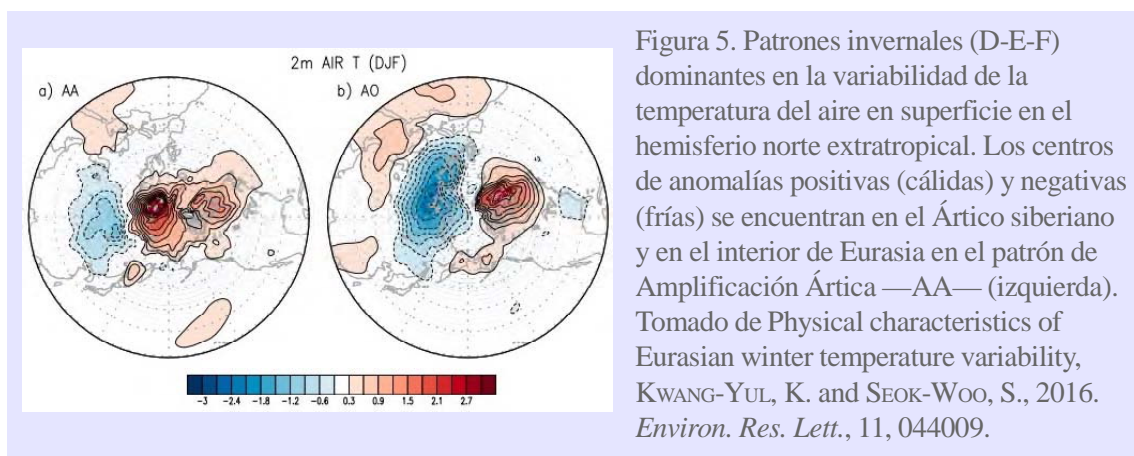


Figura 4. Mecanismo propuesto de amplificación polar. El aumento neto del flujo de energía saliente incrementa la temperatura del aire. Como resultado, aumenta la radiación de onda larga descendente, lo que a su vez se traduce en una temperatura más cálida en superficie y una fusión acelerada del hielo marino. Cálculos

teóricos conducen a que este bucle puede estar amplificándose en un 9 % anual. Adaptado de KIM, K.-Y., KIM, J., YEO, S., NA, H., HAMLINGTON, B. D. and LEBEN, R. R.: [Understanding the Mechanism of Arctic Amplification and Sea Ice Loss, The Cryosphere Discuss](#) [preprint].

### Conexión con patrones atmosféricos de latitudes medias. Ártico cálido, continentes fríos

Si bien en el periodo 1971-2020 se ha observado una clara amplificación polar invernal en el Ártico central, las temperaturas en el este de los continentes asiático y norteamericano no han sufrido cambios o incluso han disminuido, destacando muy especialmente el enfriamiento invernal del continente euroasiático en el periodo 2000-2015. De hecho, cada vez un mayor número de estudios apuntan a que la reducción de hielo marino en los mares de Kara y Barents tiene potenciales implicaciones en los extremos de frío invernal de las latitudes continentales más meridionales. Otra línea de investigación considera algunas posibles cadenas causales que conducen al retroceso de hielo partiendo de que la Oscilación Multidecadal Atlántica (AMO) y la variabilidad de la temperatura superficial marina en la región septentrional de la Corriente del Golfo guardan una posible relación con cambios en la circulación atmosférica en el sector atlántico norte-Escandinavia. La generación de ondas de Rossby y la persistencia anticiclónica en el interior del continente asiático potencian una marcada advección de aire más cálido y húmedo hacia el Ártico siberiano. Analizando la variabilidad de la temperatura del aire en superficie durante el invierno en el conjunto de las latitudes subtropicales, medias y árticas mediante técnicas estadísticas, se encuentra que el modo predominante de variabilidad en el hemisferio norte extratropical reproduce el patrón Ártico cálido-continentes fríos (denominado AA, figura 5 izquierda). La amplitud de la diferencia de anomalías muestra una clara tendencia en aumento desde los años 90. El dipolo no se presenta en otras estaciones del año.



El segundo modo de variabilidad exhibe las características de la *Oscilación Ártica* (AO) negativa (figura 5, derecha), que es muy similar a la [NAO](#).

Algunos estudios sostienen que ambos patrones, el de la Amplificación y la Oscilación Ártica, pueden de hecho estar correlacionados temporalmente. Incluso se ha argumentado que el retroceso de hielo marino a finales de verano y el aumento de la cobertura nivosa en Siberia durante el otoño fuerzan una circulación atmosférica a gran escala que reproduce una NAO/AO negativa en invierno, dando lugar a anomalías frías en los continentes. La conclusión es que no está suficientemente claro si es la AA, la AO o el retroceso de hielo marino lo que predominantemente actúa sobre la circulación atmosférica a gran escala conduciendo al frío continental.

Por otro lado, el debate en la comunidad científica de climatólogos acerca del papel de la reducción de hielo marino en el ártico y su relación con una *jet stream* más débil o más ondulada se ha caracterizado por ser especialmente controvertido en los últimos años. Por un lado ciertas observaciones apoyan la teoría de que algunos patrones atmosféricos son más persistentes favoreciendo una meridionalización de la circulación troposférica y un mayor número de extremos meteorológicos y climáticos tanto en el Ártico como en latitudes medias. En general hay una mayor evidencia sobre el aumento de amplitud de las ondulaciones que sobre su ralentización. Tampoco está claro qué parte es resultado de la variabilidad interna inherente al clima y qué parte puede atribuirse al calentamiento y la pérdida de hielo. Además, en el marco del Proyecto de Intercomparación de Modelos orientados a la Amplificación Polar (PAMIP) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas de la OMM, no se encuentra un reflejo de las observaciones en los resultados de los modelos. Probablemente, como algunos han señalado, es peligroso establecer una única métrica o focalizar únicamente en una región o estación del año.

### La ola de calor de Siberia

Durante el primer semestre de 2020 Siberia sufrió anomalías positivas de temperatura nunca antes observadas en el pasado reciente (al menos desde 1950, figura 6). La temporada de incendios forestales fue especialmente activa aunque se han reportado también daños en la salud de las personas y un marcado derretimiento del permafrost cuyos impactos se asocian a problemas medioambientales graves. La ola de calor de Siberia se considera un ejemplo de un evento meteorológico que seguramente dependa de la suma de la amplificación ártica y la dinámica interna atmosférica, en este caso, fundamentalmente de la advección zonal de temperatura originada por la variabilidad de los patrones sinópticos subárticos resultantes de la posición del *jet stream*, de la persistencia del patrón escandinavo y del vórtice polar estratosférico. Una NAO/AO con valores positivos muy altos en el periodo enero-abril (en 2020 prácticamente batiendo récords desde 1950) favorece temperaturas por encima de lo normal en el conjunto de Siberia. Parece además que la temprana fusión estacional del manto de nieve en mayo pudo retroalimentar las altas temperaturas de junio a través de una mayor absorción de radiación solar. De hecho, en la ciudad de Verkhoyansk se registraron 38 °C a finales de junio, lo que probablemente supone la mayor temperatura medida al norte del Círculo Polar Ártico.

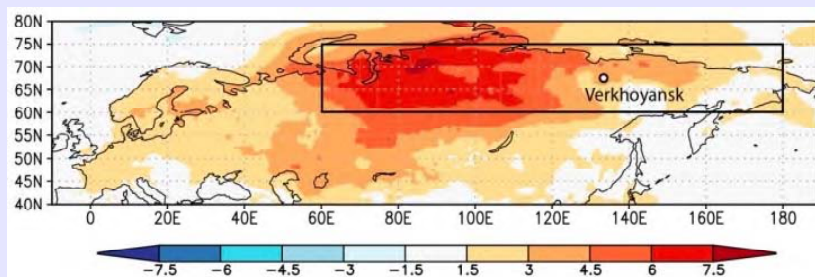


Figura 6. Anomalías de temperaturas promedio de enero a junio de 2020 respecto a las normales de referencia (1981-2010) en la región de Siberia utilizada en el estudio de atribución (recuadro), y la ubicación de la ciudad de Verkhoyansk que experimentó la temperatura diaria récord. Reanálisis ERA5 de ECMWF. Extraído de <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/WWA-Prolonged-heat-Siberia-2020.pdf>.

Pese al papel de la persistente dinámica atmosférica y las posibles retroalimentaciones, de acuerdo al [estudio de atribución](#) llevado a cabo para este evento, las anomalías de temperatura observadas serían 600 veces menos probables en ausencia de calentamiento global. En el estudio también se afirma que, de producirse el mismo evento prolongado a principios del siglo XX, las desviaciones registradas de temperatura media hubieran sido 2 °C inferiores en el mismo periodo.

## **Una reflexión hacia el futuro**

---

En la última década, el Ártico se ha calentado 0,75 °C, superando con creces el promedio mundial. **A medida que el conjunto de la Tierra se acerque a un calentamiento anual medio de 2 °C, el Ártico puede alcanzar los 4 °C, e incluso 7 °C en el trimestre de invierno.** Las **consecuencias esperadas** del aumento del calentamiento del Ártico incluyen la pérdida continua de hielo terrestre y marino, amenazas para los ecosistemas y los medios de vida humanos tradicionales, un aumento de las emisiones de metano y un clima más extremo en latitudes más bajas. La pérdida de hielo terrestre en el Ártico, sumada a la de la Antártida, contribuirá sustancialmente al aumento global del nivel del mar, con una posible subida de hasta 3 m si se atraviesan ciertos umbrales. Los **esfuerzos de mitigación** pueden ralentizar o reducir el calentamiento, pero sin ellos, el calentamiento de las latitudes altas del norte puede acelerarse aún más de aquí a 2050 y es muy probable que episodios prolongados como el del primer semestre de 2020 en Siberia aumenten considerablemente su probabilidad de ocurrencia.

Los estudios recientes centrados en las conexiones entre las alteraciones en el Ártico y el clima y fenómenos de latitudes medias han puesto el foco en efectos directamente atribuibles a cambios específicos en el Ártico, como la reducción del hielo marino y la extensión de la cobertura nivosa estacional. Se ha llegado a conclusiones dispares, a menudo contradictorias, debido sobre todo al uso de diferentes conjuntos de datos, modelos, enfoques, métricas o interpretaciones. La baja relación señal/ruido y la naturaleza regional, episódica y dependiente del estado de las conexiones complican aún más los análisis y las conclusiones. Aun con ello, debido sobre todo al incremento de los estudios e investigaciones en la última década, se ha progresado en la comprensión de las conexiones y en el desciframiento de sus características regionales y matices estacionales. Sin embargo, las limitaciones para determinar la causa y el efecto se derivan tanto de la itinerancia de los patrones como de los distintos forzamientos externos, a menudo coincidentes en el espacio o simultáneos en el tiempo, y que pueden dar lugar a retroalimentaciones en los distintos subsistemas. Se debe aceptar que *la componente caótica juega un rol indiscutible en las conexiones entre un Ártico que se calienta rápidamente y la circulación atmosférica de latitudes medias* y que, en última instancia, impide llegar a conclusiones simples.

La cooperación internacional es fundamental para prever y adaptarse a los cambios esperados. Desde el punto de vista de los análisis climáticos todavía hay que ahondar en la mejora de los datos, diagnósticos y modelos, para lo que la colaboración científica internacional en la coordinación de los programas de investigación resulta crucial. El uso de la modelización por conjuntos es esencial así como mejorar el realismo y la autoconsistencia de los procesos físicos en modelos numéricos de alta resolución que incorporan simultáneamente múltiples procesos e inestabilidades internas. Por otro lado, se ha de avanzar



hacia el consenso de la comunidad científica en la comprensión de las conexiones y en una mejor comunicación de los conocimientos y las incógnitas al público y a los responsables de políticas.

Los periodos de frío invernal, las olas de calor del verano, las sequías y las inundaciones, y sus conexiones con la variabilidad natural y el calentamiento global serán sin duda temas de investigación activa durante los próximos años. Comprender y, en última instancia, anticipar el papel del rápido calentamiento del Ártico en los patrones climáticos cambiantes de latitudes medias es un gran desafío científico, pero los posibles beneficios sociales y económicos pueden llegar a ser enormes.

## Referencias

---

- AMAP Assessment, 2021. Arctic Climate Change Update 2021, Key Trends and Impacts.
- COHEN, J., ZHANG, X., FRANCIS, J. *et al.*, 2020. Divergent consensuses on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nat. Clim. Chang.*, 10, 20-29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>.
- STUECKER, M. F., BITZ, C. M., ARMOUR, K. C. *et al.*, 2018. Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks. *Nature Clim. Change*, 8, 1076-1081. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0339-y>.
- PITHAN, F. y MAURITSEN, T., 2014. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geosci.*, 7, 181-184. <https://doi.org/10.1038/ngeo2071>.
- SCREEN, J. y SIMMONDS, I., 2010. Increasing fall-winter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification. *Geophysical Research Letters*, 37.
- DESER, C., THOMAS, R., ALEXANDER, M. y LAWRENCE, D., 2010. The seasonal atmospheric response to projected Arctic sea ice loss in the late twenty-first century. *J. Clim.*, 23, 333-351. <https://doi:10.1175/2009JCLI3053.1>.
- SERREZE, M. C. y BARRY, R. G., 2011. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change*, 77, 1-2, 85-96.
- DAI, A., LUO, D., SONG, M. y LIU, J., 2019. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO<sub>2</sub>. *Nature Communications*, 10, 121. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07954-9>.
- PARK, D.-S. R. *et al.*, 2015. Attribution of the Recent Winter Sea Ice Decline over the Atlantic Sector of the Arctic Ocean. *Journal of Climate*, 28: 4027-4033.
- OVERLAND, J. *et al.*, 2019. The urgency of Arctic change. *Polar Science*, 21: 6-13.
- JUNG, O., SUNG, M.-K., SATO, K., LIM, Y.-K., KIM, S.-J., BAEK, E.-H., JEONG, J.-H. y KIM, B.-M., 2017. How does the SST variability over the western North Atlantic Ocean control Arctic warming over the Barents-Kara Seas. *Environ. Res. Lett.*, 12, 034021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AA5F3B>.
- SATO, K. *et al.*, 2014: Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early Winter. *Environ. Res. Lett.*, 9, 084009.

RUGGIERI, P. *et al.*, 2017. The transient atmospheric response to a reduction of sea-ice cover in the Barents and Kara Seas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143: 1632-1640.

OVERLAND, J. E., WOOD, K. R. y WANG, M., 2011. Warm Arctic—cold continents: climate impacts of the newly open Arctic Sea. *Polar Research*, 30:1, 15787. <https://doi.org/10.3402/polar.v30i0.15787>.

KIM, K.-Y. y SON, S.-W., 2016. Physical characteristics of Eurasian winter temperature variability. *Environ. Res. Lett.*, 11, 044009.

PEINGS, Y. y MAGNUSDOTTIR, G., 2014. Forcing of the wintertime atmospheric circulation by the multidecadal fluctuations of the North Atlantic ocean. *Environ. Res. Lett.*, 9, 034018.

LIU, J. P., CURRY, J. A., WANG, H., SONG, M. y HORTON, R. M., 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 109, 4074-4079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1114910109>.

MARTIN, J. E., 2020. Recent trends in the waviness of the Northern Hemisphere wintertime polar and subtropical jets.

WEGMANN, M. *et al.*, 2018. Warm Arctic-cold Siberia: comparing the recent and the early 20th-century Arctic warmings. *Environmental Research Letters*, 13: 025009.

<https://aviales.ru/popup.aspx?news=6052>.

KRAMER, A. E., 2020. Major Fuel Spill in Russia's North Spreads Toward Arctic Ocean. *The New York Times*, June 9. <https://www.nytimes.com/2020/06/09/world/europe/russia-arctic-oil-spill.html?ref=oembed>.

OVERLAND, J., DETHLOFF, K., FRANCIS, J. *et al.*, 2016. Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic. *Nature Clim. Change*, 6, 992-999. <https://doi.org/10.1038/nclimate3121>.

POST, E., ALLEY, R. B., CHRISTENSEN, T. R., MACIAS-FAURIA, M., FORBES, B. C., GOOSEFF, M. N., ILER, A., KERBY, J. T., LAIDRE, K. L., MANN, M. E., OLOFSSON, J., STROEVE, J. C., ULMER, F., VIRGINIA, R. A. y WANG, M., 2019. The polar regions in a 2 °C warmer world. *Sci Adv.*, 5(12): eaaw9883. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9883>.

OVERLAND, J. E. y WANG, M., 2021. The 2020 Siberian heat wave. *Int. J. Climatol.*, 41 (Suppl. 1): E2341-E2346. <https://doi.org/10.1002/joc.6850>.