



Declaración científica sobre la criósfera Llamamiento de París por los glaciares y los polos

8-10 de noviembre de 2023

INTRODUCCIÓN

La criósfera de las regiones polares y montañosas reviste una importancia capital en lo que se refiere al balance energético del planeta, el ciclo del agua, las retroalimentaciones climáticas, la biodiversidad y las sociedades humanas. Pero con el calentamiento global continuado derivado de la actividad humana, las capas de hielo y los glaciares merman, el nivel del mar aumenta, el permafrost se funde, la capa de hielo se reduce, el hielo marino se derrite y los océanos polares se calientan. Dos mil millones de personas y dos tercios de la agricultura de regadío dependen de la contribución de la escorrentía procedente de las montañas, que a menudo halla su origen en los glaciares. En 2050, mil millones de personas residentes en las zonas costeras bajas quedarán expuestas a las consecuencias de la subida del nivel del mar, en gran parte derivada de la fusión de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida.

Los últimos informes del IPCC y los consiguientes estudios científicos recalcan las reacciones rápidas y lentas de la criósfera, en parte irreversibles, ante el calentamiento global. Existen lagunas sustanciales en las evaluaciones de riesgo, al igual que en la mitigación y la adaptación a escala global y local, en particular en la gestión del agua. La pérdida de componentes de la criósfera va acompañada de peligros a escala local y fenómenos extremos más agudos a escala regional y mundial. Las consecuencias son determinantes en lo que se refiere al coste social de las emisiones de carbono y a la asegurabilidad. Resulta imprescindible identificar y, en la medida de lo posible, prevenir procesos acumulativos con repercusiones en cadena que no pueden detenerse o revertirse de forma eficaz.

Por ello, los científicos especialistas en la criósfera llaman a una administración internacional de la gestión del riesgo. Se refieren a coaliciones internacionales comprometidas, ambiciosas y de largo plazo que trabajen para paliar los riesgos derivados del deshielo. En 2023 se ha registrado una cobertura especialmente baja de hielo marino alrededor de la Antártida (un 17 % menor que la media en junio de 2023). La reproducción de los pingüinos emperadores fracasó. Las alteraciones relacionadas con los incendios forestales en el Ártico son actualmente mayores que a mediados del siglo XX. En 2021-2022, a partir de la observación de 37 glaciares de referencia, se registró una

pérdida de masa glaciar un 20 % superior a la media de la última década, con valores máximos en los Alpes europeos, las regiones de alta altitud de Asia, Norteamérica occidental, Sudamérica y algunas partes del Ártico. Nuevos estudios revelan que el calentamiento actual de 1,2 °C podría desencadenar la pérdida de parte de la capa de hielo de la Antártida occidental, incluso sin que siguieran aumentando las temperaturas actuales. Estas observaciones exigen actuaciones y coaliciones inmediatas para limitar la pérdida de hielo, para mantenerse en espacios manejables en el planeta.

Las siguientes declaraciones sobre glaciares, hielo marino, océanos polares y permafrost sintetizan las perspectivas de la ciencia internacional tal y como se debatieron en la cumbre One Planet – Polar (8 y 9 de noviembre de 2023). Los científicos llaman a una actuación política y socioeconómica urgente, y a la adopción de enfoques internacionales e interdisciplinarios nuevos y ambiciosos para reducir la incertidumbre y abordar las incógnitas sobre los mecanismos de retroalimentación entre criósfera y salud del planeta:

o Capas de hielo, glaciares, ciclo del agua y nivel del mar

Con la pérdida de masa glaciar en los continentes, resultará inevitable que el nivel del mar siga subiendo a escala global, a un ritmo que dependerá especialmente de procesos en torno al deshielo en Groenlandia y, en particular, en la superficie de contacto entre el océano Austral y las gigantescas plataformas de hielo que flotan en él. Estos dos procesos deben llegar a comprenderse. Los glaciares de montaña son destacadas fuentes de agua en regiones situadas río abajo. Al perderlos, miles de millones de personas se enfrentan al riesgo de escasez en recursos hídricos para la agricultura en la estación seca, con el riesgo de que se acentúen las tensiones y los conflictos.

o Océanos, hielo marino, vida y atmósfera

Los océanos polares, al ser el mayor sumidero de carbono y de calor del mundo, desempeñan un papel vital para los ciclos biogeoquímicos de la Tierra, los ecosistemas y la subsistencia de millones de personas. La pérdida de hielo marino tiene un gran impacto en el balance energético entre la Tierra y el espacio exterior, puesto que reduce su efecto de termostato e intensifica el calentamiento actual. También repercute en los ecosistemas polares únicos (sumándose a otros factores de estrés como la pesca, el ruido y las sustancias químicas permanentes), suponiendo en particular una amenaza para la existencia de muchas comunidades indígenas en el norte y una pérdida de biodiversidad irreversible. La vida terrestre en las zonas polares de montaña se encuentra en una situación límite, sin ningún lugar al que migrar a medida que progresa el calentamiento, por lo que se enfrenta a la extinción.

o Permafrost y riesgos geológicos

El permafrost ártico y boreal contiene alrededor del doble de carbono que la atmósfera actual. Se tiene poca seguridad acerca de los tiempos, la cantidad, la tendencia y la repartición de los flujos de los gases de efecto invernadero CO₂ o CH₄ derivados de su futuro deshielo, en un contexto de intensificación de las

altercaciones provocadas por los incendios forestales. El deshielo del permafrost en entornos polares y de alta altitud plantea riesgos geológicos y biológicos crecientes que afectan a las infraestructuras, la población, los lugares de interés patrimonial y la vida silvestre.

Por ello, la ciencia llama a actuar de forma coordinada y sostenida con el fin de evitar el impacto altamente negativo e irreversible de la desaparición de la criósfera:

1. Reducir de forma drástica y urgente las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, eliminar progresivamente las nuevas inversiones en combustibles fósiles, al igual que los desequilibrios, con el fin de alcanzar los objetivos del Acuerdo de París sobre el clima;
2. Avanzar en los conocimientos oportunos para los riesgos graduales y los fenómenos extremos derivados de la pérdida de la criósfera; abordar los mecanismos de retroalimentación de la criósfera en los aspectos físicos, biológicos y sociales críticos que plantean un riesgo para la salud del planeta y los seres humanos. Esto exige un esfuerzo significativo en materia de cooperación dirigido a monitorizar y evaluar los procesos en curso, cuantificarlos y predecirlos, y mantener informados a los responsables de la toma de decisiones. Para ello es necesario garantizar un apoyo a largo plazo;
3. Integrar la dimensión socioeconómica del deshielo para cuantificar y mitigar las pérdidas mediante la gestión de riesgos. Para ello se han de tener en cuenta las perspectivas de las comunidades indígenas y demás comunidades que viven en zonas de alta altitud o latitud. Se necesitan mecanismos de solidaridad para hacer frente al riesgo residual, que provoca pérdidas y daños;
4. Acelerar los procesos políticos que posibilitan la protección de los ecosistemas de la criósfera y reducir la presión en los ecosistemas propios de latitudes altas y de alta montaña y mejorar su resiliencia;
5. Respaldar las iniciativas y las misiones científicas integradoras internacionales para mejorar el conocimiento de la criósfera desarrollado por las comunidades científicas;
6. Mejorar la huella ambiental y la sostenibilidad de las observaciones, las infraestructuras y el intercambio de datos sobre la criósfera, en beneficio de todas las comunidades que trabajan en entornos polares y de alta montaña;

Capas de hielo, glaciares, ciclo del agua y nivel del mar

CONTEXTO

Las regiones polares y las áreas de montaña albergan los mayores campos de hielo de la Tierra, que actualmente están reaccionando a un clima que no deja de calentarse. El calentamiento en las regiones polares, en especial en el Ártico, es cuatro veces mayor que la media, y estas regiones son en la actualidad las que más contribuyen a la subida del nivel del mar. Las capas de hielo antárticas suponen una subida potencial del nivel del mar de cerca de 58 m (la capa de hielo de la Antártida occidental, alrededor de 6 m, y el de la Antártida oriental, alrededor de 52 m), y las capas de hielo de Groenlandia, una subida de alrededor de 7 m.

Las capas de hielo también encierran un gran número de datos climáticos sobre la reacción del hielo a los cambios climáticos de épocas pasadas. Los núcleos de hielo contienen burbujas de aire que brindan un registro único de las fluctuaciones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero de los

últimos 800 000 años. A partir de este registro se ha establecido que, durante los últimos 800 000 años, los niveles de CO₂ no superaron nunca las 280 partes por millón. Desde el siglo XIX, los niveles de dióxido de carbono han aumentado en un 50 % con respecto a los niveles preindustriales, hasta alcanzar el nivel actual, que es de unas 420 partes por millón. Este registro extraordinario brinda información importante sobre los ciclos del comportamiento de la capa de hielo en el pasado y, en particular, sobre los patrones de retroceso de las capas de hielo en periodos cálidos de tiempos pasados.

La observación por satélite indica que las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida están reaccionando tanto al calentamiento atmosférico como al oceánico. Las plataformas de hielo que rodean la Antártida son vulnerables a las aguas oceánicas cálidas que llegan empujadas por fuertes vientos y las derriten desde abajo. La pérdida de las plataformas de hielo, que protegen a los glaciares del océano que los rodea, ya ha empezado a desestabilizar el hielo en la península antártica y en la Antártida occidental y, en caso de que se siga ignorando el calentamiento global, este fenómeno podría conllevar por sí solo una subida del nivel del mar de más de 1 m a escala mundial en 2100. De manera similar, los glaciares de Groenlandia que acaban en el océano Ártico se están viendo afectados por las aguas cálidas del océano Atlántico y la fusión superficial, lo que se suma a la subida del nivel del mar. En total, el ritmo al que se va perdiendo hielo en la Antártida y en Groenlandia es más de cuatro veces mayor que en los años noventa.

La pérdida de capas de hielo de Groenlandia y de la Antártida occidental

conlleva cambios irreversibles y autosostenidos que podrían perdurar durante varias generaciones, incluso en caso de que se logre detener o revertir el calentamiento global. Aunque se creía que se mantendría estable durante muchos años, se ha observado un adelgazamiento y un retroceso de algunos glaciares en la inmensa capa de hielo de la Antártida oriental. Investigaciones recientes sobre determinación de umbrales exponen otros riesgos fundamentales de una pérdida acelerada de masa glaciar.

El deshielo de los enormes mantos en las regiones polares está provocando una subida del nivel del mar a escala global que afectará a miles de millones de personas que viven en las regiones costeras en todo el planeta. Con cada centímetro de subida, sufren inundaciones anuales de dos a tres millones de personas más. Resulta crucial rebajar la incertidumbre de las proyecciones sobre el ritmo y el alcance de la subida del nivel del mar a escala mundial con el fin de evaluar el riesgo y llevar a cabo acciones para proteger a las personas y sus formas de subsistencia, a las principales ciudades y las cadenas de suministro industrial, muchas de ellas situadas en regiones costeras. Resulta necesario entender mejor los procesos relacionados con la inestabilidad de la capa de hielo de la Antártida para predecir con mayor precisión la subida del nivel del mar; algunos modelos prevén una subida del nivel del mar de hasta 2 m para 2100.

La acumulación de CO₂ en el pasado ya conlleva una subida del nivel del mar de 30 a 60 centímetros. Mientras prosiga el calentamiento y siga afectando a la estabilidad de las capas de hielo en el futuro, el nivel del mar seguirá subiendo con rapidez. Con el nivel medio mundial

del mar, los fenómenos meteorológicos extremos serán más frecuentes y causarán mayores daños y costes en las zonas costeras y las áreas pobladas: mayor erosión en el litoral, corrimiento de tierras, inundación de las aguas subterráneas, intrusión de agua salada y contaminación de acuíferos.

Algunas áreas montañosas como los Alpes, los Andes, el Himalaya o las Montañas Rocosas están perdiendo su capa de hielo. Los glaciares y las nevadas proporcionan agua de deshielo durante las estaciones secas y sustentan a una sexta parte de la población mundial y una cuarta parte del PIB. Dos tercios de la agricultura de regadío depende de la escorrentía procedente de estas masas de hielo. Se prevé que estas cordilleras pierdan del 10 al 40 % de su nieve en los próximos 30 años, lo que equivale a un suministro de agua de cientos de kilómetros cúbicos. A finales de siglo, la pérdida de hielo de los glaciares de montaña será del 20 % al 60 %.

Este fenómeno supone una amenaza global para la seguridad hídrica, alimentaria, energética y de subsistencia de cientos de millones de personas. Sin embargo, la cantidad de agua que proporciona la criósfera de montaña y la manera en que cambiará su papel siguen siendo extremadamente inciertas. Y aunque se considere un problema de capital importancia (Llamado a la Acción de la Cumbre de la OMM sobre las regiones de alta montaña, 2019), todavía no existe una iniciativa mundial para medir los recursos hídricos de las montañas.

Se están reduciendo las áreas cubiertas por hielo en las dos regiones polares y en las zonas de alta montaña, dejando al descubierto tierras que están colonizando

especies vegetales, y las tasas de crecimiento están aumentando incluso en zonas terrestres de la Antártida. Los fenómenos meteorológicos extremos, la intensificación de la sequía y el calentamiento están provocando la sustitución de especies vegetales como los musgos y los líquenes. En ambas regiones polares, las zonas sin hielo también están siendo cada vez más colonizadas por las focas y las aves marinas. Especies no autóctonas se han establecido en áreas recientemente expuestas en las regiones frías, aunque se necesitan estudios mucho más amplios para comprender plenamente los cambios que se producen en los sistemas terrestres a medida que retroceden los paisajes glaciares. ¿Estamos perdiendo microbiomas glaciares de los que aún sabemos poco?

Los glaciares de montaña y la capa de nieve estacional que los rodea son lugares de interés patrimonial de una belleza paisajística incomparable, áreas con una intensa actividad turística que se usan para practicar deportes de invierno, que garantizan recursos económicos y sirven para mantener el modo de vida de la población local. Estos activos ya están sufriendo el impacto del deshielo de los glaciares y su retirada hacia altitudes más elevadas.

PRIORIDADES

1. **Proyecciones sobre el nivel del mar.** La mayor amenaza que supone la fusión de las capas de hielo es la subida del nivel del mar a escala mundial y el impacto en la población y las infraestructuras costeras. Resulta crucial y urgente frenar estas amenazas y mejorar las proyecciones a este respecto, tanto en

términos temporales como cuantitativos. Para alcanzar este objetivo, hay que apoyar los esfuerzos internacionales de modelización en lo que se refiere a infraestructuras computacionales, desarrollo de modelos y recursos humanos. La gestión de los impactos y los riesgos que conlleva la subida del nivel del mar para las comunidades costeras requiere actualizaciones periódicas. Resulta fundamental actuar para hacer frente a los problemas derivados de la migración de la población desplazada de las regiones bajas inundadas.

2. **Interacciones hielo-océano.** Para mejorar las futuras proyecciones sobre la pérdida de hielo de Groenlandia y la Antártida, es necesario comprender mejor las interacciones entre los océanos y el hielo, la circulación oceánica y el correspondiente ritmo de fusión bajo las plataformas de hielo, las dinámicas de hielo en las zonas ancladas a la tierra y la inestabilidad de las capas de hielo marinos. Esto requiere una mejor labor de observación, con tecnología innovadora para monitorizar y medir los cambios *in situ* y una observación por satélite sostenida y mejorada, así como mejorar la física hielo-océano, combinada con modelos numéricos y de inteligencia artificial para proporcionar actualizaciones sobre la futura subida del nivel del mar a los responsables de formular políticas y a los profesionales.
3. **Clima en el pasado.** Las capas de hielo, los glaciares y los sedimentos son un importante archivo de los climas del pasado. Se necesita seguir observando los registros paleoclimáticos (núcleos de hielo y de sedimentos) urgentemente para ayudar a entender si, en el pasado, el retroceso de las capas de hielo fue un proceso gradual o si se caracterizaba por episodios repentinos e intermitentes. Esto es necesario para mejorar la física de la dinámica de las capas de hielo, las interacciones entre estos y la atmósfera,

y entre estos y el océano, al igual que las inestabilidades de las capas de hielo en los modelos utilizados para las futuras proyecciones.

4. **Recursos hídricos.** Se necesita tener un mayor conocimiento de los recursos en agua proporcionados por el hielo y la nieve en las zonas de montaña, lo que exige una mayor labor de monitorización, investigación de campo, observación por satélite y una modelización mejorada. Resulta fundamental llevarlo a cabo en colaboración con las comunidades locales, los profesionales y los responsables de formular políticas para garantizar que los futuros cambios en los recursos hídricos se integren en las estrategias de gestión de riesgos y adaptación.
5. **Riesgos.** Resulta fundamental monitorizar y evaluar el riesgo de que se produzcan desastres naturales derivados del deshielo de los glaciares de montaña, como rupturas de lagos glaciares, desprendimientos de rocas o corrimientos de tierras.
6. **Ecosistemas.** Todavía quedan incógnitas en cuanto al impacto de la pérdida de hielo en los ecosistemas tanto en las zonas de alta montaña como en las regiones costeras y los océanos. Las zonas que quedan expuestas por el deshielo deben monitorizarse para evaluar qué ecosistemas se desarrollan en ellas y cómo lo hacen; dichas zonas necesitan además una gestión especial y protección frente a las especies invasoras.
7. **Cooperación.** Trabajar en regiones polares y de alta montaña remotas para llevar a cabo esta labor de observación resulta caro y dificultoso, además de requerir mucho tiempo y energía. La investigación gana en eficiencia, eficacia y seguridad si la llevan a cabo grandes equipos de investigación multidisciplinares que compartan gastos e infraestructuras.
8. **Acción.** La acción internacional es clave a la hora de hacer frente a estos inmensos desafíos. Su carácter urgente exige un trabajo conjunto de grandes equipos con conocimientos complementarios que recaben nuevos datos desde grandes infraestructuras compartidas. Antarctica InSync es una nueva propuesta que reunirá a la comunidad polar para planificar y llevar a cabo un programa de mediciones sincrónicas de muchos aspectos del entorno antártico para entender cómo el continente y su océano se están viendo afectados por el cambio climático y realizar mejores predicciones en beneficio de todo el planeta. En el Ártico se están planificando programas de interacciones entre la tierra y el océano a gran escala. El desarrollo de capacidades internacionales necesita un mayor apoyo para crear la próxima generación de científicos internacionales especializados en la criósfera.

Océanos, hielo marino, vida y atmósfera

CONTEXTO

El hielo marino es una parte fundamental de los océanos situados en latitudes altas y un indicador clave del cambio climático en el sistema terrestre. El hielo marino es agua de mar congelada, se expande durante el invierno de cada hemisferio, y se funde en verano. Su superficie blanca refleja la energía solar (albedo), enfriando el planeta. El hielo marino influye en gran medida en el intercambio de energía, calor y gases entre el océano y el aire. Al derretirse, el océano más oscuro absorbe más calor, intensificando así el ciclo de fusión del hielo marino. Éste también es el hábitat de una inmensa diversidad de formas de vida, muchas de ellas endémicas, que van desde los microbios hasta las ballenas, pasando por una enorme variedad de aves. La pérdida de hielo marino, especialmente de hielo de varios años y hielo marino costero, está poniendo en peligro la vida en los polos. El hielo marino transporta materia, crea una barrera frente a la pérdida de hielo glaciar y protege los litorales de las olas y la erosión. Soporta la movilidad humana y ha ayudado en la expansión y la cultura de los

homínidos incluso antes de que apareciera el *Homo sapiens*, y a día de hoy sigue siendo un elemento clave de las culturas y los medios de subsistencia humanos.

Los océanos polares dirigen la cinta transportadora oceánica. El océano Austral es un sumidero global de calor y de CO₂ crucial. Al hundirse, las aguas frías polares transportan a las aguas profundas oxígeno y materia orgánica disuelta, pero también contaminantes. Están aumentando los flujos de calor por radiación y de agua dulce procedente del incremento de las precipitaciones, la escorrentía y la fusión del hielo marino y las capas de hielo, incrementado a su vez la estratificación de la superficie. El calentamiento de los océanos tiene consecuencias climáticas de gran alcance en el deshielo de los glaciares de Groenlandia que desembocan en los mares y en el de las plataformas y capas de hielo del Antártico, por lo que la subida del nivel del mar se intensificará y posiblemente la circulación oceánica se dará en latitudes más bajas. Entre los procesos complejos que todavía no se entienden bien figuran los remolinos oceánicos, las interacciones trópicos-polos, el calentamiento interno y los cambios en la estratificación, al igual que la futura capacidad de captación de CO₂ por la bomba de carbono física y biológica.

El hielo marino, que en otros momentos de la historia del planeta tuvo presencia en latitudes mucho más bajas, es posiblemente un lugar clave para la evolución de los microorganismos en la Tierra, y puede ser que albergue vida en mundos oceánicos extraterrestres. Todavía queda por entender el papel del hielo marino como bioma destacado en la Tierra y como parte integrante del

funcionamiento de los ecosistemas polares. Establecer el estado de los ecosistemas relacionados con el hielo marino es una carrera contrarreloj dada la velocidad con la que se transforma el hielo marino polar, en especial el más antiguo. La pérdida de hielo marino antiguo en el Ártico puede significar la pérdida de nuestra mejor analogía con las condiciones imperantes en las glaciaciones del pasado y en otros mundos oceánicos.

En cuanto a la productividad de los océanos polares, la falta de series temporales con una resolución estacional y regional adecuada ha limitado nuestra comprensión de la repercusión del calentamiento. La observación por satélite muestra sobre todo un aumento de la biomasa de fitoplancton en los océanos Ártico y Austral en los últimos 20 años debido a la mayor penetración lumínica derivada de la reducción del hielo marino. Sin embargo, en la estratificación concurrente se producen cambios, como el aumento de la transferencia dinámica entre el aire y el mar que intensifica la mezcla de los océanos, y el suministro de nutrientes se ve afectado, por lo que las proyecciones futuras son muy inciertas.

Las diatomeas, principales impulsoras de la productividad polar, se ven sustituidas por algas más pequeñas como consecuencia del calentamiento de los océanos, lo que modifica la red trófica y puede reducir el bombeo de carbono. La pérdida de hielo marino pone en peligro al krill, los peces, los mamíferos y las aves marinas, ya que en él encuentran a sus presas y se reproducen, lo que ha desembocado en un alarmante fracaso reproductivo masivo de las colonias de pingüinos emperador y Adelia. La pérdida de hielo marino también afecta a la vida microbiana y, por consiguiente, a

toda la red trófica. Si bien la expansión hacia el norte de nuevas especies hacia el océano Ártico desde el Pacífico y el Atlántico ha sido documentada en todos los niveles tróficos, siguen quedando incógnitas acerca de las causas actuales (cambios en la distribución de las masas de agua, corrientes, propiedades del agua de mar, dinámicas del hielo marino, etc.), por lo que nuestra capacidad para realizar cualquier predicción sobre los ecosistemas marinos se ve limitada.

Con el nivel actual de calentamiento global de 0,2 °C por década, la pérdida de hielo marino en el Ártico observada desde 1978 es del 3 % por década en invierno y del 13 % en verano. La mayor parte del hielo marino de varios años ha sido sustituido por hielo marino anual, más fino y dinámico. Existe una estrecha relación entre los cambios en el hielo marino estival del Ártico, las emisiones acumuladas de CO₂ y la temperatura mundial de la superficie, lo que se traduce en una pérdida de unos 3 m² cuadrados de hielo marino ártico por cada tonelada de CO₂ emitida. En la Antártida, de 1979 a 2020 no se ha podido detectar una tendencia significativa en el hielo marino ni en verano ni en invierno, debido a la gran variabilidad interna y al contraste entre las tendencias regionales. En cualquier caso, la cobertura del hielo marino lleva dos años siendo excepcionalmente baja (en junio de 2023 era un 17 % menor que la media).

La actividad humana es la principal causa del retroceso del hielo marino en el Ártico. A medida que han ido aumentando las emisiones de gases de efecto invernadero y sus concentraciones en la atmósfera, la Tierra ha ido calentándose. El 91 % de este exceso de calor se acumula en el océano, y la mitad de éste acaba hundiéndose en el

océano Austral. El 3% corresponde al deshielo de la criósfera, el 5% al calentamiento de la tierra y el 1% al calentamiento de la baja atmósfera. Por ello, el calentamiento del océano supone una amenaza creciente para el futuro del hielo marino. Varios bucles adicionales de retroalimentación amplificadora actúan sobre el hielo marino e implican el albedo de la superficie, el vapor de agua, las nubes, las nevadas, los flujos entre el aire y el mar, que, todos juntos, acarrearán una amplificación polar. Sin embargo, no se sabe con exactitud en qué medida los bucles de retroalimentación estabilizadora provocados por procesos físicos y biológicos pueden atenuar la amplificación, lo que aumenta la incertidumbre. Por ejemplo, se ha propuesto la producción de gases que actúan sobre el clima, como el sulfuro de dimetilo, o de partículas microbianas aerosolizadas de nucleación del hielo, ya que ambos favorecen la producción de nubes en zonas recientemente libres de hielo. Los contaminantes de largo alcance, en particular el carbono negro transportado desde regiones industriales cada vez más industrializadas ubicadas en latitudes menores, contribuyen a reducir el albedo del hielo marino y, por tanto, al deshielo. Este fenómeno se observa especialmente en el Ártico.

En los últimos 40 años, la velocidad con la que se ha ido calentando el Ártico ha sido 4 veces mayor que la media global. En los escenarios y trayectorias evaluados en el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2021), es posible que en 2030-2035 se dé un primer verano sin hielo (<15% de cobertura de hielo) en el océano Ártico, y al menos una vez antes de 2050, vinculado a unas emisiones acumuladas de CO₂ que alcancen las 1000 gigatoneladas. Las

últimas variaciones están relacionadas con los patrones de circulación atmosférica, con consecuencias persistentes debido a que el océano es más cálido y, posiblemente, el estado del hielo marino antártico, distinto. La captación de calor en el océano Austral representa más del 50% de la captación mundial de calor de los océanos.

Las lagunas en los conocimientos científicos afectan sobre todo a las interacciones tierra-océano, hielo-atmósfera-océano, océano-glaciares y mar-hielo-vida. Resulta importante comprender mejor los futuros cambios en las precipitaciones en un mundo que se calienta, cambios asociados a una intensificación del ciclo del agua y su variabilidad, nieve incluida, y a cambios en la dinámica de la circulación atmosférica y los vientos. Los cambios en la distribución de la masa de agua a gran escala, en particular entre los océanos Atlántico y Ártico; en la conexión entre las aguas superficiales dulces y frías y las aguas profundas cálidas y saladas, incluida la mezcla oceánica; y en el ciclo y la dinámica de crecimiento y fusión del hielo marino (advección, acordonamiento, canales, estanques de fusión) complican aún más el impacto del calentamiento global sobre el hielo polar. La falta de series temporales a largo plazo con una resolución regional adecuada para realizar evaluaciones circumpolares del cambio es crucial a la hora de ganar en seguridad en las proyecciones. Las predicciones del papel de la dinámica decadal y las teleconexiones entre fenómenos como El Niño y la oscilación del Atlántico norte, y de la estabilidad de la circulación meridional de retorno del Atlántico, la corriente circumpolar antártica y sus vínculos con el hielo marino son

necesidades clave. El destino del hielo marino afecta directa e indirectamente a las redes tróficas y a las interacciones biológicas, desde la vida microbiana hasta el krill, los peces, las ballenas y las aves, así como a la vida bentónica, incluyendo las profundidades marinas. Sigue habiendo grandes lagunas en los conocimientos sobre la diversidad total de la vida polar y sus dinámicas, sus interacciones con la química oceánica, es decir, la formación de aerosoles, la disolución de la materia, los flujos de partículas, y sus implicaciones en lo que respecta al desarrollo económico, la salud humana y el bienestar.

IMPACTO Y RIESGO

→ Los océanos polares están sufriendo impactos de grandes magnitudes debido al cambio climático y en 2050 serán extremadamente distintos.

→ Los efectos de la reducción del hielo marino polar pueden sentirse a escala global, incluso en las pautas meteorológicas.

→ La pérdida de hielo marino, el calentamiento y la acidificación de los océanos reducen los hábitats disponibles para muchas especies polares marinas como son los mariscos y los crustáceos, algunas especies de peces y los mamíferos marinos, al tiempo que allanan el camino a especies invasivas boreales. Su exposición a factores de estrés tanto antiguos (pesca) como nuevos (plásticos, ruido y sustancias químicas permanentes) podría empeorar los efectos negativos en las especies polares marinas.

→ El declive del hielo marino trae consigo un mayor número de oportunidades, pero también riesgos crecientes derivados de la expansión y la intensificación de la navegación, la pesca, el turismo, el desarrollo de recursos y otras industrias, incluida la intensificación de las tensiones geopolíticas.

→ La pérdida de hielo marino y los fenómenos extremos resultantes del calentamiento global afectan a la vida y los medios de subsistencia de las comunidades del Ártico. La amplificación de los cambios climáticos amenaza cada vez más muchos aspectos de la forma de vida ártica (cultura, patrimonio, identidad, salud, salud mental y seguridad), en particular en lo que respecta a los pueblos indígenas.

PRIORIDADES DE GOBERNANZA

1. La ciencia reclama una ambición internacional sobre reducción de los gases de efecto invernadero para limitar el calentamiento global a un valor lo más cercano posible a 1,5 °C y alcanzar las cero emisiones netas de CO₂ cuanto antes, limitando al máximo las emisiones acumuladas hasta que se consiga. Es un objetivo fundamental para evitar nuevos grandes declives de las capas de hielo marino y para reducir los fenómenos meteorológicos extremos a escala mundial, evitando así una escalada de pérdidas y daños, y de costes de adaptación y límites de adaptación.
2. La cooperación internacional para proteger los océanos polares (por ejemplo, tal y como se expresó en la Declaración de Helsinki sobre el Cambio Climático y la Antártida en la Reunión Consultiva del Tratado Antártico de 2023) resulta

fundamental para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París y el Marco Mundial de Biodiversidad de Kunming-Montreal.

3. Para rebajar la presión en la vida en los polos derivada de la intensificación y la expansión de la actividad humana, las áreas marinas y terrestres protegidas representan medidas clave y requieren una ambición internacional nueva basada en la ciencia. En su planificación y mantenimiento, resulta importante la colaboración y el respaldo a la autodeterminación de las comunidades indígenas.
4. Resulta importante para la sociedad que se colmen las lagunas en materia de educación, conocimientos, información y predicción relativas a la criósfera. Se necesita apoyo para mejorar la comprensión de los procesos, las herramientas de modelización y la investigación avanzada, incluidas las repercusiones en la habitabilidad, el agua, los alimentos, la seguridad humana, los ecosistemas únicos y la biodiversidad, la equidad y la economía, incluida la asegurabilidad, por ejemplo.
5. La perspectiva de la criósfera debería incluirse en las estimaciones del coste de las emisiones de carbono, los costes de adaptación, los límites de adaptación y la planificación de los fondos de pérdidas y daños.
6. Infraestructuras locales para mejorar la resiliencia ante el cambio climático y la pérdida de hielo marino, en particular incluyendo la autodeterminación de los pueblos indígenas.

PRIORIDADES CIENTÍFICAS

1. Apoyo duradero a los programas internacionales sobre el hielo marino, los océanos, la biosfera y la atmósfera en el Ártico y el Antártico en lo que se refiere a las infraestructuras (como los programas internacionales de boyas de

hielo marino y de flotadores Argo, la flota de investigación polar, aeronaves y estaciones de investigación), así como a las grandes misiones internacionales (Tara Polar Station, Antártica InSync, el Año Polar Internacional), enmarcadas y coordinadas por redes e iniciativas de observación internacionales.

2. Una cooperación muy reforzada entre agencias espaciales, oceánicas y polares para lanzar satélites de órbita polar, compartir con coherencia los datos de observación de la Tierra en lo que se refiere a las regiones polares, desarrollar nuevas misiones, productos y algoritmos y llevar a cabo expediciones de campo específicas para la verificación *in situ*. Mejora de la accesibilidad a los datos FAIR.
3. Cooperación regional, redes de biodiversidad y de protección marina multiescala (monitorización y gobernanza), mayores recursos basados en la ciencia para reforzar trayectorias de desarrollo resilientes y sostenibles.
4. Una mayor capacidad de investigación, con conocimientos científicos punteros para explorar la biodiversidad de los hielos marinos.
5. Financiación del desarrollo de capacidades por parte de las comunidades locales y en colaboración con ellas para satisfacer tanto las necesidades científicas locales y globales como para maximizar la cooperación y las actividades regionales en aras de una ciencia polar más sostenible durante todo el año.
6. Transformación de las infraestructuras polares para desarrollar soluciones de menor huella ecológica y de carbono para la investigación, y permitir la transmisión de datos en tiempo casi real.
7. Productos y herramientas de información sobre el hielo marino específicos y accesibles, predicciones y

proyecciones regionales para fundamentar la toma de decisiones.

8. Modelo complejo, interactivo y basado en datos (gemelos digitales) de los mares polares que incluya módulos de gestión de riesgos (respuestas de emergencia y adaptación adecuadas y apropiadas) y estrategias guía de observación.

Permafrost y riesgos geológicos

CONTEXTO

Alrededor de una quinta parte de la superficie terrestre del hemisferio norte está cubierta por permafrost. Éste recubre grandes áreas de Alaska, Canadá, Rusia y la meseta del Tíbet, así como el norte de Escandinavia, la Antártida y zonas de alta montaña en todo el planeta. Las regiones más pobladas y desarrolladas con permafrost se encuentran en los Alpes europeos. Muchas de las regiones con permafrost atesoran valiosos recursos minerales y su población urge a desarrollarlos. La mayor parte del diseño y la construcción de infraestructuras en terrenos con permafrost se basa en que el suelo permanezca helado.

El cambio climático que experimentan los entornos polares es varias veces mayor que

en la mayor parte del planeta. Los cambios se aprecian en la temperatura y empiezan a evidenciarse en las precipitaciones. La velocidad del cambio climático sigue o supera las velocidades más altas que se predijeron hace 20 años. El permafrost es fundamentalmente clima en el suelo, por lo que las temperaturas del permafrost están aumentando en el conjunto de las regiones polares y de alta montaña, y el permafrost cercano a la superficie está derritiéndose.

En la última década, la frecuencia y el riesgo de peligros biológicos y geológicos ha aumentado en las zonas de deshielo: erosión costera, corrimientos de tierra, derrame de petróleo, liberación de desechos industriales enterrados y de contaminantes naturales como el mercurio, virus antiguos y emisiones de metano y dióxido de carbono de materia orgánica que actualmente está encerrada en el permafrost. La magnitud de este tipo de emisiones de carbono regionales tiene consecuencias mundiales. El deshielo ha intensificado los incendios forestales que cubren alrededor de la mitad de los entornos con permafrost, y año tras año se queman áreas cada vez mayores. Las amenazas físicas a los lugares de interés patrimonial y las especies silvestres afectan directamente a los pueblos indígenas del norte, porque el bioma del permafrost alberga una biodiversidad limitada, por lo que los ecosistemas son frágiles cuando se ven alterados. Para los pueblos de las regiones de alta montaña, la pérdida en provisión de agua a medida que el permafrost se va fundiendo y el agua superficial se va infiltrando en el suelo es motivo de gran preocupación.

La ciencia y la ingeniería relativas al permafrost representan todo un reto

debido en parte al alto coste que tiene trabajar en zonas remotas. En el pasado, el papel que desempeñaban en la investigación las personas que vivían en estas regiones era menor. Para que la normativa y las políticas del Ártico se fundamenten plenamente en los avances científicos, se debe hallar un mayor equilibrio en todas las fases del desarrollo de los programas. Los pueblos y los organismos públicos y privados de las regiones con permafrost se enfrentan al deterioro de las infraestructuras construidas y del acceso a la tierra, a riesgos emergentes y a cambios ambientales a un ritmo inhabitual, al igual que a la necesidad de una mitigación y una adaptación basada en el contexto local que promueva el desarrollo económico.

PRIORIDADES

1. Se debe reconocer el carácter inevitable de los ajustes significativos en los entornos con permafrost, al igual que su capacidad para soportar infraestructuras tal y como se diseñan actualmente. Urge avanzar en la adaptación al deshielo del suelo de las técnicas de diseño y construcción de infraestructuras. Garantizar la monitorización del permafrost, el intercambio de datos y la actualización periódica de los informes resulta fundamental si se quiere reducir el riesgo de que se produzcan daños humanos y materiales, en particular en las zonas de alta montaña.
2. El calendario y el ritmo de las emisiones previstas de dióxido de carbono y de metano procedentes del deshielo del permafrost requieren una atención prioritaria por parte de la comunidad científica. Se debe mejorar la modelización dinámica de las emisiones del permafrost bajo una serie de posibles futuras trayectorias climáticas, que incluya necesariamente el papel de la actividad microbiológica. Se deben hallar soluciones geopolíticas para facilitar una evaluación científica completa de este problema existencial para las regiones con permafrost.
3. Los aspectos socioeconómicos de las pérdidas y los daños que se anticipan por el deshielo de la criósfera y los cambios ecológicos asociados, así como la adaptación a este fenómeno, exigen que se intensifique la investigación, en particular la de las consecuencias económicas que tendrá la fusión del permafrost para los organismos públicos, los actuarios y el sector privado. Del mismo modo, los aspectos ambientales que influyen en la salud de los seres humanos y las especies silvestres de las que dependen también son cruciales, en particular la distribución y la densidad de especies clave para la seguridad ecológica y alimentaria.
4. Una mayor implicación de los pueblos indígenas y otros pueblos de las regiones de la criósfera resulta fundamental en todos los planos de investigación y en los debates relativos a la adaptación al impacto del cambio climático y su gestión. Se debe reforzar la educación y la formación para posibilitarla.
5. Las emisiones derivadas de los incendios forestales y otras perturbaciones, incluida la erosión costera, ya son persistentes y están comprometiendo los esfuerzos de la sociedad para alcanzar cero emisiones netas de carbono. La intensificación del deshielo del permafrost derivado de estos fenómenos conlleva una aceleración de las emisiones de carbono de éste durante décadas. Se necesita investigación específica sobre las emisiones de metano y de dióxido de carbono en las áreas incendiadas y en las regiones costeras, incluidas aquellas que sólo son accesibles por teledetección.

6. Debe reconocerse el coste de la investigación de campo en áreas remotas y su fundamental papel a la hora de validar los avances teóricos y las teleobservaciones. Algunos costes pueden verse reducidos mediante una mayor implicación de organismos e instituciones ubicados en las regiones con permafrost.
7. Por último, deben apoyarse de forma permanente los esfuerzos internacionales para archivar, gestionar y poner a disposición del público los datos relativos al estado cambiante del permafrost, incluida la gran cantidad de datos obtenidos mediante teledetección.

El contenido de la declaración científica fue elaborado por los siguientes científicos, con el apoyo de los participantes del One Planet – Polar Summit:

Consejo Consultivo Científico

Antje Boetius, copresidenta, investigadora en temas polares y de aguas profundas y directora del Instituto Alfred Wegener, Centro Helmholtz para la Investigación Marina y Polar. Ha dirigido numerosas expediciones polares internacionales, centradas en los efectos del cambio climático en los ecosistemas, y es asesora de políticos y de la sociedad civil en su calidad de miembro de la Academia Nacional de Alemania.

Jérôme Chappellaz, copresidente, glaciólogo, geoquímico y paleoclimatólogo. Es profesor en el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Lausana (EPFL), director de Investigación del Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS), exdirector del Instituto Polar francés Paul-Emile Victor (IPEV) y presidente de la Fundación Ice Memory.

Liss Marie Andreassen, profesor de investigación en glaciología en la Dirección Noruega de Recursos Hídricos y Energía (NVE) y presidente de la Asociación Internacional de Ciencias de la Criósfera (IACS).

Nicole Biebow, presidenta de la Junta Polar Europea (European Polar Board) y directora de la Unidad de Cooperación Internacional en el Instituto Alfred Wegener, Centro Helmholtz para la Investigación Marina y Polar en Alemania. Es, asimismo, coordinadora de EU-PolarNet 2 y del ARICE (Arctic Research Icebreaker Consortium), financiado por la Unión Europea.

Steven Chown, profesor de Ciencias Biológicas en la Universidad Monash, Australia, y expresidente del Comité Científico de Investigaciones Antárticas.

Gwenn Flowers, profesor del Departamento de Ciencias de la Tierra en la Universidad Simon Fraser, Canadá, y presidente de la Sociedad Glaciológica Internacional (IGS).

Yeadong Kim, geofísico y presidente del Comité Científico de Investigaciones Antárticas. Exdirector del Instituto de Investigación Polar de Corea (KOPRI) y presidente del Comité Nacional Coreano de Investigación Polar.

Valérie Masson-Delmotte, paleoclimatóloga y directora de investigación del Laboratorio de Climatología y de Medioambiente (LSCE) y de la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas de Francia (CEA). Exvicepresidenta del Grupo de Trabajo I del IPCC (Sexto Informe de Evaluación).

Thamban Meloth, especializado en criósfera, paleoclimatología y glaciología del Himalaya. Es director del Centro Nacional para la Investigación Polar y Oceánica (NCPOR) de India.

Jennifer Mercer, especializada en ciencias de la tierra, presidenta del Foro de Operadores de Investigación del Ártico (FARO). Jefa de la Sección de Ciencia del Ártico de la Fundación Nacional para las Ciencias de Estados Unidos.

Dahe Qin, especializado en climatología, geografía y criósfera. Es miembro de la Academia de Ciencias de China, presidente del Comité Ejecutivo de la Sociedad Geográfica Asiática y excopresidente del Grupo de Trabajo I del IPCC (Cuarto y Quinto Informe de Evaluación).

Jefferson Simoes, profesor de glaciología y de geografía polar en la Universidad Federal de Río Grande del Sur (UFGRS) y director del Instituto Nacional de Brasil para la Ciencia de la Criósfera. Vicepresidente del Comité Científico de Investigaciones Antárticas.

Moderadores de la sesión:

Además de Antje Boetius, Jefferson Simoes y Nicole Biebow, que también moderaron las sesiones científicas:

Dame Jane Francis, paleoclimatóloga y paleobotanista, directora del British Antarctic Survey, Reino Unido.

Marcel Babin, oceanógrafo, director de Investigación del Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS), director del Laboratorio de Investigación Internacional Takuvik (CNRS / Universidad Laval), Canadá.

Christopher Burn, especialista en permafrost, profesor en la Universidad de Carleton y presidente de la Asociación Internacional del Permafrost, Canadá.

Claire Treat, especialista en permafrost, responsable de un grupo de investigación en el Instituto Alfred Wegener, Centro Helmholtz para la Investigación Marina y Polar, Alemania.