





# Impactos del calentamiento global sobre los ecosistemas polares



# Impactos del calentamiento global sobre los ecosistemas polares

Carlos M. Duarte (ed.)

Fundación **BBVA**

La decisión de la Fundación BBVA de publicar el presente libro no implica responsabilidad alguna sobre su contenido ni sobre la inclusión, dentro de esta obra, de documentos o información complementaria facilitada por los autores.

No se permite la reproducción total o parcial de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión por cualquier forma o medio, sea electrónico, mecánico, reprográfico, fotoquímico, óptico, de grabación u otro sin permiso previo y por escrito del titular del *copyright*.

DATOS INTERNACIONALES DE CATALOGACIÓN

Impactos del calentamiento global sobre los ecosistemas polares / Carlos M. Duarte (ed.). — Bilbao : Fundación BBVA, 2007.

190 p. ; 18 x 26 cm

ISBN: 978-84-96515-55-0

1. Cambio climático 2. Impacto ambiental 3. Ártico  
4. Antártida I. Duarte, Carlos M. II. Fundación BBVA, ed.  
551.581.21

*Impactos del calentamiento global sobre los ecosistemas polares*

EDITA:

© Fundación BBVA, 2007

Plaza de San Nicolás, 4. 48005 Bilbao

DISEÑO Y REALIZACIÓN EDITORIAL:

José Manuel Reyero / Comunicación y Gestión Ambiental ALAIRE, S.L.

EDICIÓN DE TEXTOS: M.<sup>a</sup> Paz Santos

IMPRESIÓN: V.A. Impresores, S.A.

ENCUADERNACIÓN: Ramos

ISBN: 978-84-96515-55-0

DEPÓSITO LEGAL: M-47876-2007

Impreso en España - *Printed in Spain*

Este libro está elaborado con papel totalmente libre de cloro (Totally Chlorine Free-TCF), cumpliendo los estándares medioambientales exigidos por la actual legislación.

## ÍNDICE

<b>Introducción: calentamiento global y ecosistemas polares</b> <i>Carlos M. Duarte</i> .....	13
<b>1. Aumento de la radiación ultravioleta: impacto sobre los océanos polares</b> <i>Susana Agustí</i> .....	23
1.1. La radiación ultravioleta y la capa de ozono terrestre .....	25
1.2. La contaminación atmosférica y el declive del ozono .....	26
1.2.1. Un agujero de ozono sobre la Antártida .....	28
1.2.2. La situación actual: las predicciones y el calentamiento global ..	29
1.3. Aumento de la radiación UV sobre las áreas polares .....	32
1.4. Daño inducido por la radiación UV y mecanismos de protección ....	34
1.4.1. Cómo evitar la exposición a la radiación UV: las migraciones del plancton .....	35
1.4.2. Sistemas de protección y reparación .....	36
1.4.2.1. Estructuras celulares protectoras o «sombrillas» .....	36
1.4.2.2. Producción de «filtros solares» .....	37
1.4.2.3. Antioxidantes .....	38
1.4.2.4. Sistemas de reparación .....	38
1.5. Impacto del aumento de la radiación UV sobre los océanos polares ..	39
Bibliografía .....	43
<b>2. ¿Es el declive del krill antártico resultado del calentamiento global o del exterminio de las ballenas?</b> <i>Victor Smetacek</i> .....	45
2.1. Introducción .....	48
2.2. Efecto limitante del hierro en la productividad .....	50
2.3. Diatomeas, eufasiáceos y ballenas azules .....	53
2.3.1. Diatomeas .....	53
2.3.2. Krill antártico .....	55
2.3.3. Ballenas azules .....	58
2.4. Distribución de <i>Euphasia superba</i> .....	60
2.5. Tamaño del <i>stock</i> de krill .....	61
2.6. Pruebas de la reducción de la biomasa de krill .....	66
2.7. Condicionamiento del ecosistema por la cadena alimentaria de los gigantes .....	72

2.8. Verificación de la hipótesis .....	76
2.9. Conclusión .....	77
Agradecimientos .....	79
Bibliografía .....	79
<b>3. El cambio climático y sus repercusiones para la megafauna antártica</b>	
<i>Jaume Forcada</i> .....	83
3.1. Introducción .....	85
3.2. El ecosistema marino antártico y la importancia del krill para la megafauna .....	88
3.3. Megafauna antártica: biología, adaptación al hielo y hábitats críticos ...	91
3.3.1. Variabilidad biológica y adaptación al hielo .....	93
3.3.1.1. Aves marinas .....	93
3.3.1.2. Mamíferos marinos .....	96
3.3.2. Adaptación al hielo y hábitats críticos .....	104
3.4. Resultado de las interacciones entre efectos antropogénicos sobre la megafauna antártica .....	106
3.5. ¿Es el calentamiento global un problema real para la megafauna antártica? .....	107
3.6. ¿Es posible predecir el futuro? .....	108
Bibliografía .....	109
<b>4. Implicaciones del cambio climático en los procesos y ecosistemas pelágicos del Ártico</b>	
<i>Paul Wassmann</i> .....	111
4.1. Introducción .....	114
4.2. Algunos datos sobre la última <i>terra incognita</i> del mundo: el océano Glacial Ártico .....	116
4.3. Producción primaria y balance de carbono en el océano Glacial Ártico .....	119
4.4. Rodeando el océano Glacial Ártico: zonas de hielo marginal y polinias de canales grietados .....	124
4.5. Acoplamiento y ajuste escalonado de los sistemas pelágico-bentónico en el complejo «aguas libres-zhe-hielo de varios años»: algunas consideraciones fundamentales .....	126
4.6. Forzamiento físico-biológico de las plataformas árticas: pasado, presente y futuro .....	132
4.7. Investigación marina en el Ártico: la necesidad fundamental de cooperación internacional .....	135
Agradecimientos .....	136
Bibliografía .....	136



<b>5. Efectos del calentamiento global en el bentos ártico y consecuencias en la cadena trófica</b>	
<i>Paul E. Renaud, Michael L. Carroll y William G. Ambrose Jr.</i> .....	139
5.1. Introducción .....	141
5.2. ¿Por qué estudiar el bentos? .....	141
5.3. Alcance de este artículo .....	145
5.4. Cambio climático y variabilidad climática en el Ártico .....	145
5.4.1. Un periodo de cambio climático .....	145
5.4.2. Patrones temporales de variabilidad medioambiental .....	147
5.4.3. Patrones espaciales de variabilidad medioambiental .....	148
5.5. Perspectivas desde la paleoceanografía y estudios de casos históricos ...	149
5.5.1. Primer caso: estudios sobre indicadores del cambio climático a lo largo de los últimos 3 millones de años .....	150
5.5.2. Segundo caso: impactos humanos y estructura de los ecosistemas .....	151
5.5.3. Tercer caso: el periodo de calentamiento de las décadas de 1920 y 1930 .....	152
5.5.4. Cuarto caso: cambio de régimen en el mar de Bering .....	154
5.6. Impactos en la ecología de las comunidades árticas .....	156
5.6.1. Biodiversidad y estructura de la comunidad .....	156
5.6.2. Ciclo del carbono .....	160
5.6.3. Reproducción .....	161
5.6.4. Interacciones tróficas .....	162
5.7. Recomendaciones para la investigación .....	164
5.8. Conclusión .....	166
Agradecimientos .....	168
Bibliografía .....	168
Índice de fotografías .....	179
Índice de ilustraciones .....	181
Índice alfabético .....	183
Nota sobre los autores .....	187







**INTRODUCCIÓN:  
CALENTAMIENTO GLOBAL Y ECOSISTEMAS POLARES**

**Carlos M. Duarte**

Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA)  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)-Universidad de las Islas Baleares (UIB)  
Esporles, Mallorca, España



**LAS REGIONES POLARES** son las áreas más remotas del planeta, exploradas por primera vez hace menos de un siglo, con la llegada a los polos geográficos de las expediciones lideradas por el noruego Roald Amundsen (Polo Sur, 1911; Polo Norte, 1926), lo que no ha sido óbice para que hoy día se encuentren entre las zonas más amenazadas por la actividad humana.

Los peligros que se ciernen sobre los ambientes polares son particularmente preocupantes, pues estas regiones poseen una importancia fundamental en el sistema Tierra, ya que intervienen en la circulación de la atmósfera y el océano, participan en la regulación del clima del planeta y tienen un elevado valor ecológico.

A pesar de ello, nuestros conocimientos sobre cómo opera el clima polar y cómo funcionan sus ecosistemas siguen siendo muy primitivos en muchos aspectos. Para paliar estas lagunas, el Consejo Científico Internacional y la Organización Meteorológica Mundial han promovido la celebración del Año Polar Internacional 2007-2008 (v. [www.ipy.org](http://www.ipy.org)), el cuarto año de este tipo que se declara hasta la fecha, tras los anteriores de 1882-1883, 1932-1933 y 1957-1958, con la peculiaridad de que la iniciativa actual no se lleva a cabo para explorar los sistemas polares, sino por la necesidad de investigar los impactos y rápidos cambios que estos medios están experimentando. Con este propósito, miles de científicos de más de 60 países participarán hasta el 1 de marzo de 2009 en más de 200 proyectos de investigación sobre el Ártico y el Antártico coordinados a nivel internacional. España colabora por vez primera en el Año Polar Internacional, y lo hace con un conjunto de proyectos de investigación financiados por el Plan Nacional de I+D del Ministerio de Educación y Ciencia (v. [www.api-spain.es](http://www.api-spain.es)). Además de la investigación científica, el Año Polar Internacional tiene como dos de sus objetivos principales la formación de una nueva generación de investigadores en ciencia polar y el aumento de la concienciación social en torno a la problemática que aqueja a las áreas polares. Este volumen se plantea como una contribución a estos dos objetivos del Año Polar Internacional.

◀ **Foto 1: Oso polar (*Ursus maritimus*).** El mayor de los carnívoros terrestres captura a las focas, que son sus principales presas, en la banquisa ártica. El avance del deshielo a causa del calentamiento reduce su éxito predador, al desaparecer las masas de hielo desde las que caza, lo que pone en peligro su supervivencia.



**Fotos 2 y 3: Investigadores trabajando en el Ártico durante la campaña de investigación española ATOS-Ártico**

Los ecosistemas polares son los únicos en el océano que continúan estando dominados por la megafauna, diezmada en el resto de los mares del planeta. La prevalencia de estos grandes animales (cetáceos, pinnípedos, aves, etc.) en este tipo de ambientes se explica por varios factores, como la escasa presión del hombre sobre ellos (hace décadas soportaron, sin embargo, una presión importante, como consecuencia de la caza intensiva de ballenas en la Antártida, ahora regulada, y de la captura de focas en el Ártico, que aún continúa), las cortas cadenas tróficas de estos ecosistemas –debido a la presencia de productores primarios y herbívoros planctónicos de tamaño relativamente mayor al que domina en el resto de los océanos–, su elevada producción estival y la presencia de grandes plataformas de hielo utilizadas como hábitat por algunas de las especies que allí viven. En los ecosistemas polares, que pueden considerarse como los desiertos más inhóspitos del planeta, la producción primaria terrestre resulta mínima, lo que ha hecho que estén basados, prácticamente en su totalidad, en producción primaria marina. La estabilidad de estos medios y la supervivencia de su megafauna dependen, en gran medida, de la existencia de amplias placas de hielo, las cuales sirven como zona de cría para organismos clave en el ecosistema (por ejemplo, el krill en la Antártida), o como plataformas de caza, descanso y transporte para pingüinos, lobos de mar y focas leopardo en la Antártida, o para osos, focas, morsas y otros animales, incluido el hombre, en el Ártico.

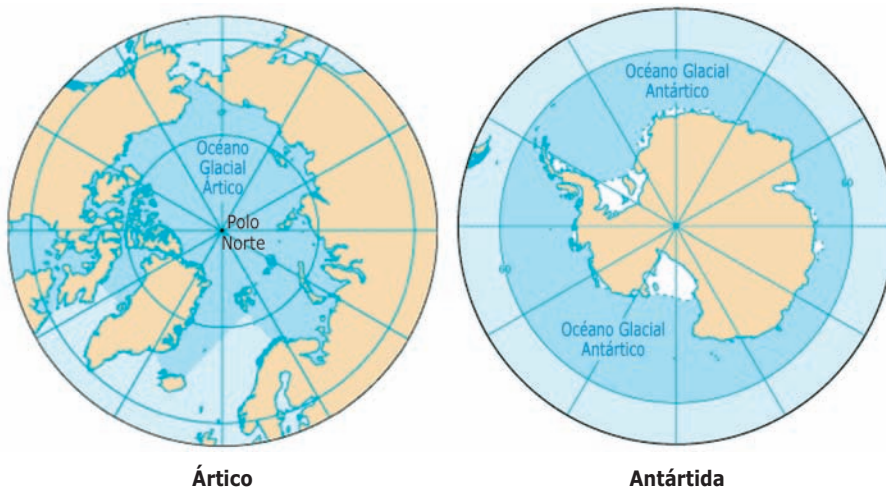


Los ecosistemas ártico y antártico presentan importantes diferencias, derivadas de su configuración geográfica, que imponen fuertes contrastes en su funcionamiento y en su vulnerabilidad frente a impactos de origen humano. El ecosistema antártico se asienta en un continente que ocupa desde el Polo Sur hasta los 60-80° de latitud sur, y que se halla aislado de otros continentes por el océano Glacial Antártico (mapa 1); la Antártida se encuentra, por tanto, muy alejada de los territorios donde se desarrolla una actividad industrial significativa. Por el contrario, el ecosistema ártico se localiza en un océano central, el océano Glacial Ártico, situado entre el Polo Norte y los 70-80° de latitud norte, cubierto en su mayor parte de hielo y rodeado de continentes con extensas plataformas continentales, cercanos a zonas de alta actividad industrial (por ejemplo, Canadá, Estados Unidos, Rusia y Noruega; v. mapa 1).

Así pues, la Antártida se extiende en aguas libres de hielos durante gran parte del verano, mientras que el ecosistema polar ártico se despliega en gran medida bajo una gran plataforma de hielo; asimismo, los periodos de luz y oscuridad de los océanos Ártico y Antártico varían por la diferencia de casi 20° en las franjas latitudinales que ocupan en los correspondientes hemisferios, y su conexión con el océano global también es distinta, pues el océano Antártico colinda con el Pacífico, Atlántico e Índico, en tanto que las aguas del océano Ártico sólo se intercambian de forma significativa con las del Atlántico, con el que se comunican por el estrecho de Fram, ya que el flujo de aguas oceánicas con el Pacífico en el estrecho de Bering se ve entorpecido por plataformas someras (mapa 1).

Por otra parte, en el interior del círculo polar ártico se encuentran numerosas ciudades habitadas y se desarrollan importantes actividades comerciales e industriales, las cuales no existen en el interior del círculo polar antártico; a este respecto,

**Mapa 1: Área ocupada por los océanos polares**



conviene tener en cuenta que la proximidad a continentes habitados y a centros de actividad industrial es muy importante, porque determina la presión que soportan los ambientes polares.

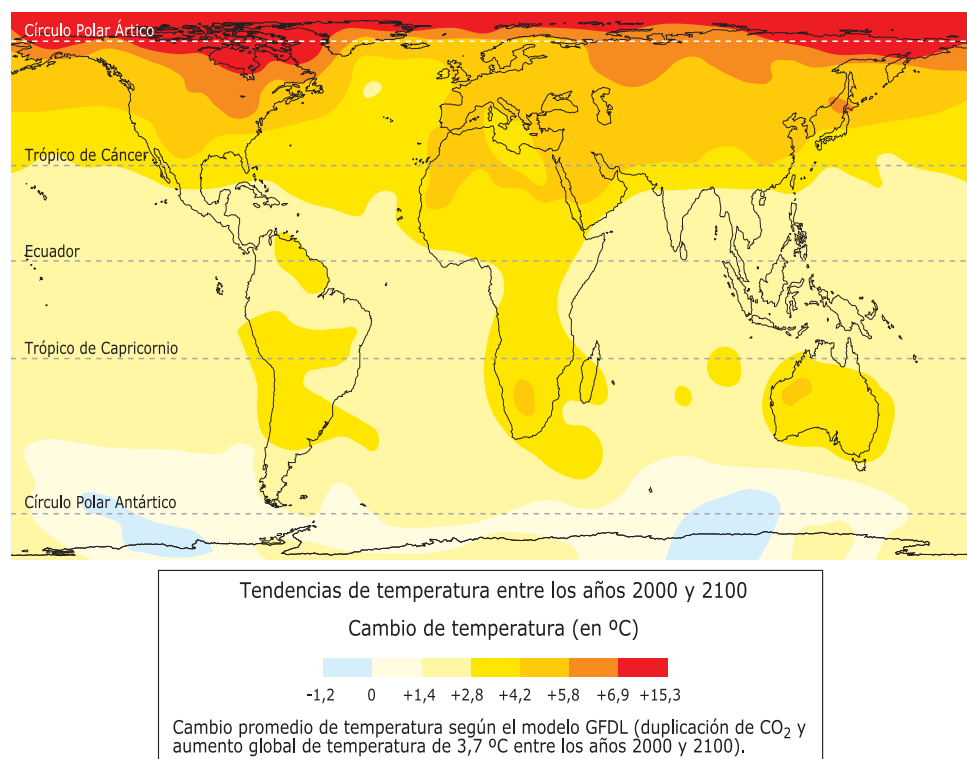
Otro tema fundamental radica en el notable calentamiento que están experimentando los ecosistemas polares. Este calentamiento resulta espectacular en el caso del Ártico, donde la pérdida de hielo es particularmente rápida (Vinnikov et al. 1999; Serreze, Holland y Stroeve 2007) y parece estar acelerándose, hasta el punto de que en un futuro próximo se plantea como escenario plausible un océano Glacial Ártico desprovisto de cobertura de hielo en verano (Serreze, Holland y Stroeve 2007). La Península Antártica también sufre de forma notable los problemas derivados del calentamiento y la pérdida de masas de hielo marino (Rignot et al. 2004), aunque aquí la pérdida es mucho menor y más localizada que en el Ártico.

Los efectos del calentamiento global sobre las zonas polares resultan ya tan evidentes y tienen consecuencias tan alarmantes, que han motivado en buena parte la declaración del nuevo Año Polar Internacional, en el marco del cual está previsto, entre otras cosas, investigar el ecosistema polar para poder predecir mejor su respuesta a los cambios ambientales, particularmente al calentamiento global. Uno de los fines principales del Año Polar Internacional consiste en incrementar el nivel de información de la sociedad en torno a las transformaciones que están ocurriendo en las regiones polares, objetivo al que contribuye esta obra.

Las emisiones de dióxido de carbono y otros gases invernadero derivadas de la actividad humana están generando un aumento de su concentración en la atmósfera que se predice pueda provocar una elevación en la temperatura global del planeta durante el siglo XXI cercana a los 4 °C (IPCC 2001). Los modelos de circulación global que se utilizan para pronosticar la evolución futura del clima apuntan a grandes diferencias regionales en las tasas de calentamiento, con algunas zonas que padecerán un calentamiento muy superior al calentamiento promedio y otras que experimentarán uno muy inferior. Estos modelos sugieren que el mayor calentamiento se apreciará en el Ártico, donde la temperatura podría aumentar hasta 9 °C (mapa 2); de hecho, los registros climáticos indican que el Ártico se ha venido calentando ya a un ritmo de 0,4 °C por década, dos veces más rápido que en el resto del planeta (IPCC 2001). En el hemisferio sur, por el contrario, se espera que el calentamiento sea prácticamente nulo (mapa 2).

Otros impactos asociados a la actividad humana son, sin embargo, mucho más intensos en la Antártida. Por ejemplo, el efecto de los compuestos químicos sintéticos volátiles sobre la ozonosfera resulta mayor en el hemisferio sur, lo que conduce al desarrollo de un agujero estacional en la capa de ozono que conlleva una exposición a niveles de radiación ultravioleta mucho más fuerte en el hemisferio sur que en el norte (v. capítulo 1). Igualmente, la caza de ballenas ha tenido secuelas muy importantes en el hemisferio sur, y sus consecuencias sobre el ecosistema antártico podrían ser más profundas de lo que hasta ahora se pensaba (v. capítulo 2).

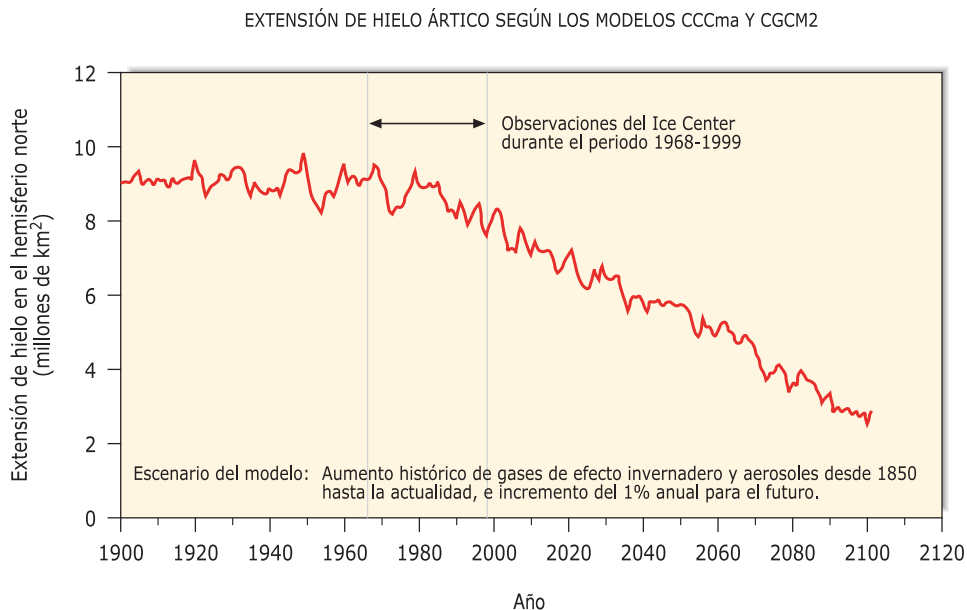
**Mapa 2: Aumento predicho de la temperatura promedio para distintas regiones de la Tierra a lo largo del siglo XXI**



Fuente: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Universidad de Princeton.

El primer efecto del calentamiento global en los ecosistemas polares es la fusión de los casquetes polares. Resultados publicados en 2006 han revelado grandes pérdidas de hielo en el planeta. Por una parte, la placa de hielo antártico está perdiendo 152 km<sup>3</sup> de hielo al año, lo que equivale a  $0,4 \pm 0,2$  mm de aumento global anual del nivel del océano, con una disminución de cerca de 8.000 km<sup>2</sup> en la Península Antártica durante los últimos 50 años, coincidente con un calentamiento de cerca de 2 °C en esta región. Por otro lado, la mengua de la placa de hielo ártico se está acelerando, con tasas recientes de pérdida de la extensión de hielo estacional hasta 18 veces mayores que las de las últimas décadas, y con la constatación de una merma sin precedentes del espacio ocupado por el hielo perenne, que ha dado lugar a un mínimo histórico en la superficie invernal de hielo en marzo de 2006 (gráfico 1); además, en agosto de 2006 se observaron grandes grietas, de centenares de kilómetros de longitud, en el núcleo de hielo hasta ahora permanente del Ártico, que hacen prever un incremento en las pérdidas de esta masa. En Groenlandia, por su parte, el ritmo de desprendimiento de glaciares se ha duplicado en los últimos 5 años; asimismo, el descenso del hielo de la placa de Groenlandia se

**Gráfico 1: Cambios observados durante el siglo XX en la superficie ocupada por el hielo marino en el hemisferio norte, y predicciones derivadas del calentamiento esperado en el Ártico a lo largo del siglo XXI**



Fuente: National Snow and Ice Data Center, Estados Unidos.

ha quintuplicado, hasta alcanzar  $239 \pm 23 \text{ km}^3$  de hielo perdido por año, lo que contribuye con 0,6 mm adicionales a la elevación anual del nivel global del mar. También se predice un aumento de la tasa de calentamiento, que, por ejemplo, en el Ártico ascenderá a  $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$  por decenio en las primeras décadas de este siglo, para alcanzar los  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  por década hacia finales del siglo XXI; la proyección de los cambios debidos al calentamiento global sobre la extensión de hielo ártico augura una rápida pérdida de hielo y una reducción de su superficie a menos de 3 millones de  $\text{km}^2$  a finales del siglo XXI (gráfico 1), cifra tres veces inferior a la existente a principios del siglo XX (v. revisiones en Rignot y Thomas 2002; Rignot et al. 2004; Serreze, Holland y Stroeve 2007).

Todas estas pérdidas tienen importantes consecuencias climáticas y geopolíticas, pero la característica diferencial en este medio es que suponen, a la vez, una reducción del «hábitat», es decir, de la superficie de hielo de los océanos polares. Este libro contribuye a evaluar los efectos del calentamiento global sobre los ecosistemas polares –hasta ahora no suficientemente valorados–, a través del análisis –a cargo de algunos de los mejores expertos mundiales en este tipo de ambientes– del impacto derivado de la exposición de sus aguas a la radiación solar –asociada a la reducción de la cubierta de hielo–, incluyendo los elevados niveles de radiación

ultravioleta que recibe el ecosistema antártico; además, en esta obra se examina la respuesta al calentamiento global del ecosistema marino y, en particular, de la abundante e importante megafauna que vive en este entorno.

Este libro recoge los contenidos del segundo ciclo de debates organizado conjuntamente entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Fundación BBVA, en la Estación de Investigación Costera del Faro Cap Salines (Mallorca), con el objetivo de propiciar la reflexión acerca de los desafíos y descubrimientos científicos en el campo de la biodiversidad marina, y de sensibilizar a la sociedad respecto a la necesidad de conservar los océanos y las costas.

La obra ofrece, a través de las contribuciones de varios expertos de renombre internacional, una visión prospectiva sobre el impacto del calentamiento climático en los ecosistemas polares.

Agradezco la financiación y el apoyo de la Fundación BBVA, que ha hecho posible la organización del evento del que dimana esta obra y la edición de la misma. También quiero dar las gracias a José Manuel Reyero y sus colaboradores por la ayuda prestada en la edición del libro.

## BIBLIOGRAFÍA

- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden y D. Xiaosu, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- RIGNOT, E., y R.H. THOMAS. «Mass balance of polar ice sheets». *Science* 297 (2002): 1502-1506.
- RIGNOT, E., G. CASASSA, P. GOGINENI, W. KRABILL, A. RIVERA y R. THOMAS. «Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of the Larsen B ice shelf». *Geophysical Research Letters* 31 (2004): L18401, doi: 10.1029/2004GL020697.
- SERREZE, M.C., M.M. HOLLAND y J. STROEVE. «Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover». *Science* 315 (2007): 1533-1536.
- VINNIKOV, K.Y., A. ROBOCK, R.J. STOUFFER, J.E. WALSH, C.L. PARKINSON, D.J. CAVALIERI, J.F.B. MITCHELL, D. GARRETT y V.F. ZAKHAROV. «Global warming and Northern Hemisphere sea ice extent». *Science* 286 (1999): 1934-1937.

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Pág. 10:	Osos polares ( <i>Ursus maritimus</i> ) en la isla de Spitzbergen. © Jordi Bas	
Foto 1:	Oso polar ( <i>Ursus maritimus</i> ). © Juan Carlos Muñoz .....	14
Fotos 2-3:	Investigadores trabajando en el Ártico durante la campaña de investigación española ATOS-Ártico. © ATOS-Ártico .....	16

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Mapa 1:	Área ocupada por los océanos polares .....	17
Mapa 2:	Aumento predicho de la temperatura promedio para distintas regiones de la Tierra a lo largo del siglo XXI .....	19
Gráfico 1:	Cambios observados durante el siglo XX en la superficie ocupada por el hielo marino en el hemisferio norte, y predicciones derivadas del calentamiento esperado en el Ártico a lo largo del siglo XXI .....	20