

Impactos del calentamiento global sobre los ecosistemas polares

Carlos M. Duarte (ed.)

Separata del capítulo

3. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS REPERCUSIONES PARA LA MEGAFUNA ANTÁRTICA

por

Jaume Forcada
British Antarctic Survey
Consejo Nacional de Investigaciones Medioambientales
Cambridge, Reino Unido

© Fundación BBVA, 2007

www.fbbva.es

ISBN: 978-84-96515-55-0



LA MEGAFUNA ANTÁRTICA comprende la mayoría de las especies depredadoras que respiran aire: aves y mamíferos marinos. Estas especies tienen una elevada longevidad y una reproducción lenta, y por ello son vulnerables a cambios climáticos que aumentan la variabilidad en la tasa de crecimiento de sus poblaciones. Casi todas se sitúan en lo alto de las cadenas tróficas marinas, y el krill antártico constituye el principal alimento de muchas de ellas. A excepción de los cetáceos, con vida totalmente acuática, todas las demás especies dependen del medio terrestre para reproducirse. El impacto del cambio climático sobre la megafauna es mayor a nivel regional y presenta distintos niveles de expresión. Se manifiesta como consecuencia de alteraciones del clima y la meteorología a distintas escalas temporales, incluyendo años, décadas o periodos entre éstas, y generalmente está relacionado con fenómenos globales, como la Oscilación Sur de El Niño (ENSO, del inglés El Niño-Southern Oscillation). A lo largo del océano Glacial Antártico, diversas poblaciones de aves y mamíferos marinos han mostrado alteraciones cíclicas en su éxito reproductor, productividad y supervivencia que son congruentes con las alteraciones ambientales relacionadas con la ENSO. Estas últimas se manifiestan como reducciones de la extensión de la capa de hielo marino y como elevaciones de la temperatura del agua y del aire, y modifican temporalmente la estructura de los ecosistemas marinos. Los efectos sobre el krill y otras presas, junto con la transformación del medio terrestre y del hielo, repercuten en aves y mamíferos marinos. La disminución del alimento y del hábitat disponible durante las épocas de cría altera la distribución y abundancia de las especies de pinnípedos, pingüinos y otras aves marinas. Únicamente aquellas especies capaces de adaptarse a un ambiente más variable pueden sobrevivir con éxito al cambio climático. Para las otras especies, esto significa cambios en su distribución, abundancia y algunos aspectos de su biología.

3.1. INTRODUCCIÓN

La megafauna antártica se compone de organismos acuáticos, como los mamíferos marinos y los pingüinos, y de otros que están adaptados a la vida en el mar, como

◀ **Foto 3.1: Grupo de pingüinos rey (*Aptenodytes patagonicus*).** Los pingüinos, las aves más genuinamente antárticas, se están viendo gravemente afectadas por el calentamiento global y sus efectos sobre las poblaciones de krill, que constituye su principal fuente de alimento.

las aves marinas que vuelan. La mayoría de ellos dependen del medio terrestre para completar su ciclo vital. Algunos desarrollan parte de este ciclo sobre el hielo, pero otros necesitan superficies no cubiertas por éste para sobrevivir. El continente antártico es un desierto helado del cual sólo el 4% aproximadamente queda libre de hielo durante el verano. Esta estación sólo provee de las escasas zonas costeras, fundamentales para la reproducción de estas especies. Sin embargo, toda la megafauna antártica, en mayor o menor medida, depende del hielo para su descanso, cría y obtención de alimento. Las plataformas de hielo y el hielo marino, además de proporcionar hábitat crítico, aseguran el suministro de alimento para la mayoría de estas especies, gracias a su dinámica e influencia en los procesos oceanográficos que favorecen la producción primaria.

El continente antártico está cubierto de hielo, situado sobre el medio terrestre, incluido el fondo del mar cuando está helado, y sobre el medio pelágico, formando plataformas. Las plataformas de hielo son dinámicas, ya que varían en extensión, grosor y cohesión a lo largo del año. De éstas se desprenden los icebergs, que van a la deriva con las corrientes marinas (foto 3.2). Más allá de las plataformas de hielo se encuentra el hielo marino creado por congelación de la superficie del mar con las bajas temperaturas del invierno antártico. Tanto las plataformas como el hielo marino resultan sensibles a pequeños cambios de temperatura. Por eso, los efectos más importantes del calentamiento global sobre la megafauna, mediados



Foto 3.2: Un iceberg a la deriva, en el que se observan los distintos tipos de hielo formados durante diferentes etapas. La compresión del hielo y el aporte de minerales generan coloraciones diversas.

por el aumento de la temperatura de la atmósfera y del océano, están relacionados con la alteración de la dinámica del hielo, tanto marino como terrestre, de su grosor y de su extensión en el espacio y el tiempo. Además, el incremento del aporte de agua dulce al océano, a través del deshielo acelerado de glaciares, icebergs y plataformas de hielo, modifica la biodiversidad y estructura de los ecosistemas marinos, de los que la megafauna constituye una parte integral.

Los efectos del calentamiento sobre la megafauna son múltiples, pero destacan dos tipos principales: los relacionados con la pérdida o ganancia de hábitat crítico, sin el cual la megafauna no puede vivir –como, por ejemplo, el medio físico necesario durante la época de cría de algunas aves y mamíferos marinos–; y los que modifican las redes tróficas y tienen repercusiones directas sobre el alimento de la megafauna. La contracción del área ocupada por el hielo marino afecta a las especies que más dependen de él para completar su ciclo reproductor. Por el contrario, otras menos dependientes del hielo posiblemente se beneficien de su reducción, con lo cual es razonable esperar alteraciones de las redes tróficas, de las comunidades de especies, de su distribución y de su abundancia. En muchos casos, las consecuencias del calentamiento global resultan de la interacción de múltiples factores, lo que da lugar a diferentes tipos de respuestas poblacionales entre distintas especies, con los consiguientes cambios en las comunidades y en los ecosistemas. Estos cambios se expresan regionalmente y a distintas escalas temporales, en función del impacto local del calentamiento, de los ciclos climáticos relacionados con éste, y de sus repercusiones sobre cada especie de la megafauna.

Las consecuencias del calentamiento global sobre la megafauna tienen lugar al mismo tiempo que otros impactos antropogénicos, como, por ejemplo, el aumento de las pesquerías marinas y, en menor medida, el incremento del turismo en determinadas zonas del continente antártico. En el caso del turismo, las secuelas son probablemente escasas. Sin embargo, el aumento de distintas pesquerías en el océano Antártico puede desestabilizar algunos ecosistemas marinos y ocasionar efectos directos e indirectos sobre la megafauna. Así pues, entender las repercusiones de la acción del hombre requiere el estudio combinado de distintos impactos sobre los ecosistemas, con especial énfasis en las regiones más afectadas por el calentamiento global, donde éste es más detectable. En estas regiones, la modificación de los ecosistemas por la pérdida del hielo resulta más importante y son mayores los impactos sobre la megafauna, sobre todo en especies sensibles a la reducción del hielo.

El impacto del calentamiento global en la megafauna antártica no es tan aparente como en el Ártico, donde la pérdida acelerada de hielo marino, sobre todo en verano, afecta al éxito reproductor y a la supervivencia de algunas especies de megafauna, como el oso polar (*Ursus maritimus*) (Derocher 2005). En menor grado, también repercute sobre las focas de Groenlandia (*Pagophilus groenlandicus*) y de

casco (*Cystophora cristata*) (Johnston et al. 2005), pues ambas dependen estrictamente de las plataformas de hielo y del hielo marino para criar. Sin embargo, una de las regiones australes donde ya se detectan cambios parecidos en la megafauna es la Península Antártica.

El calentamiento al oeste de la Península Antártica ha sido uno de los más rápidos y mayores del planeta. Las medias anuales de incremento de temperatura registradas en algunas de sus bases científicas a lo largo de los últimos 50 años son hasta 10 veces superiores a la media anual de calentamiento para todo el planeta (Vaughan et al. 2003). En las últimas décadas, la temperatura superficial del océano en esta región se ha elevado alrededor de 1 °C, y la subida ha sido mayor en los meses de invierno (Meredith y King 2005). Desde los años sesenta, los cambios en la circulación atmosférica conocidos como el Modo Anular del Hemisferio Sur (SAM, del inglés Southern Annular Mode) han aumentado la fuerza de los vientos del oeste sobre esta zona (Marshall, Van Lipzig y King 2006). Estos impactos constituyen la prueba irrefutable de la conexión entre la actividad humana y la destrucción de extensas áreas de algunas plataformas de hielo, como la placa Larsen.

3.2. EL ECOSISTEMA MARINO ANTÁRTICO Y LA IMPORTANCIA DEL KRILL PARA LA MEGAFUNA

Los ecosistemas antárticos están condicionados por la alta estacionalidad del clima y las extremas temperaturas del largo invierno. Grandes cambios en la irradiación solar y en la cobertura del hielo crean condiciones muy diferentes entre verano e invierno, y éstas atañen directamente a los organismos antárticos. Algunos efectos importantes varían en función de la tolerancia y adaptación de cada especie a las temperaturas extremas (Peck, Webb y Bailey 2004). Sin embargo, los que predeterminan la distribución y abundancia de la mayoría de las especies son aquellos que afectan a la fuente de alimento, que depende de los escasos meses estivales en que las condiciones resultan favorables para su desarrollo. Éste es el caso del plancton marino, situado en la base de la cadena trófica, y del resto de organismos que dependen de él para desarrollar sus ciclos reproductores y sobrevivir durante los meses de escasez del invierno. Para el plancton, los márgenes continentales son las zonas marinas más productivas de la Antártida. El aporte de minerales de origen terrestre durante el deshielo estacional favorece la formación de florecimientos de fitoplancton cerca de la costa. Además, el deshielo ayuda a estabilizar las capas superficiales del mar, acumulando biomasa de algas. En este medio tan productivo abundan crustáceos y salpas (plancton gelatinoso), los componentes predominantes en el zooplancton y el principal alimento de los depredadores, la mayoría de los cuales forman parte de la megafauna. Debido a la corta duración del verano, las cadenas tróficas también son relativamente cortas (Clarke 1985) y se articulan alrededor de varias especies clave, entre ellas el krill antártico (*Euphasia superba*).



Foto 3.3: Krill (*Euphasia superba*). La disminución del krill por efecto del calentamiento está teniendo un negativo impacto en cascada en muchas de las especies predatoras que integran la comunidad de grandes aves y mamíferos marinos antárticos.

Dada su gran densidad en el océano Antártico, los crustáceos desempeñan un papel fundamental en la estructuración y función de las redes tróficas marinas (Smetacek y Nicol 2005; Murphy et al. 2007), especialmente los eupasiáceos (el krill), de los cuales las principales especies tienen ciclos de vida ligados a los ciclos estacionales del hielo marino. El krill antártico es muy abundante y se distribuye desde el hielo marino hasta el medio oceánico, por lo que constituye el alimento más importante para peces, calamares, aves y mamíferos marinos. En el hielo, sobre todo durante su estado larvario, el krill encuentra algas de las que alimentarse y refugio frente a depredadores (Smetacek y Nicol 2005). Debido a esta dependencia del hielo, probablemente el krill sea uno de los grupos más afectados por las consecuencias del calentamiento global. Este cambio climático también repercute, indirectamente, sobre los principales depredadores del krill, para los que resulta difícil localizar otra fuente tan copiosa de alimento. Estos impactos cobran una relevancia más grande en las regiones donde el krill es abundante y el retroceso del hielo mayor.

Una de las zonas más productivas del océano Antártico es su sector atlántico suroeste, desde la Península Antártica hasta la Convergencia Antártica y el Arco de Escocia, incluyendo Georgia del Sur y las islas Sándwich del Sur. En esta área se encuentra la mayor densidad de krill de todo el océano Antártico (Atkinson et al.

2004), así como la mayor diversidad y abundancia de sus principales depredadores, incluyendo focas, lobos marinos, ballenas, pingüinos y otras aves marinas, sobre todo albatros y petreles (Laws 1984). Distintos fenómenos oceanográficos del mar de Escocia, incluyendo el rápido paso de la Corriente Circumpolar Antártica, su accidentada batimetría, la influencia del clima y la interacción de éste con el océano Pacífico a través de la Corriente Circumpolar Antártica, junto con la dinámica del hielo en el mar de Weddell, alteran el transporte del krill producido al oeste de la Península Antártica hacia el Arco de Escocia y sus islas. Debido a estas interacciones, los efectos del calentamiento sobre el clima y los océanos, tanto en esta región como en otras conectadas remotamente a ella, alteran la disponibilidad y abundancia del krill. Estas conexiones entre el medio ambiente físico de regiones del planeta separadas por grandes distancias, como el mar de Escocia y el océano Pacífico tropical (Trathan y Murphy 2002), ocurren gracias a la transferencia de anomalías climáticas de la atmósfera, la circulación del océano y los procesos físicos derivados de la interacción océano-atmósfera (Turner 2004). Estas interacciones afectan a toda la cadena trófica y, en última instancia, a la dinámica poblacional de los depredadores marinos (Forcada et al. 2005; Forcada et al. 2006; Trathan et al. 2006).

En los últimos 50 años, la extensión del hielo marino en este sector del océano Antártico se ha reducido como consecuencia del calentamiento global, y los glaciares han retrocedido notablemente (Cook et al. 2005), con lo que ha aumentado el aporte de agua dulce al océano. Esto ha repercutido directamente en las redes tróficas mediante la alteración de la dinámica del hielo y su impacto negativo en el krill antártico (Murphy et al. 2007). El descenso del hielo marino en invierno modifica la variedad y composición regional del fitoplancton, lo que favorece la proliferación de salpas y desfavorece al krill, cuya densidad y disponibilidad para sus depredadores disminuyen significativamente (Loeb et al. 1997; Atkinson et al. 2004). El incremento en el aporte de agua dulce proveniente del deshielo de los glaciares ha contribuido a la modificación estacional de la diversidad de especies del fitoplancton y, en consecuencia, del zooplancton marino (Moline et al. 2004). Teniendo en cuenta la oceanografía y la dinámica del hielo en el mar de Weddell, al sur del mar de Escocia, así como los efectos del clima global y la oceanografía en el océano Pacífico, el impacto del calentamiento sobre la Península Antártica no sólo afecta a los límites del hielo y a sus depredadores, sino también a los de sus islas subantárticas.

En otras regiones antárticas, la dinámica del hielo es distinta (Zwally et al. 2002; Parkinson 2004) y los efectos del calentamiento global sobre los ecosistemas marinos resultan menos detectables. Por ejemplo, en el mar de Ross, en el sector pacífico del océano Antártico, la extensión de hielo marino parece haberse ampliado en los últimos años, y los efectos del calentamiento son quizá menos perceptibles que en la Península Antártica; sin embargo, las temperaturas de la troposfera y las capas altas de la atmósfera también parecen haber aumentado

considerablemente en estas regiones (Turner et al. 2006), y su dinámica está desligada de la de las capas más bajas, en contacto con el hielo. Por eso no se conocen con exactitud las consecuencias a largo plazo de este rápido calentamiento y es importante evaluar sus efectos desde un punto de vista regional. Para obtener conclusiones globales sobre los impactos del calentamiento necesitamos realizar estudios comparativos sobre los diferentes efectos en los ecosistemas marinos de distintas regiones antárticas.

3.3. MEGAFUNA ANTÁRTICA: BIOLOGÍA, ADAPTACIÓN AL HIELO Y HÁBITATS CRÍTICOS

En la megafauna hay grupos de especies que dependen del medio terrestre para completar su ciclo vital, como los pinnípedos (focas y lobos marinos) y las aves marinas (principalmente pingüinos, albatros y petreles), y especies exclusivamente acuáticas, como los cetáceos. De entre estos grupos, no todas las especies evolucionaron y se adaptaron a ambientes antárticos del mismo modo, ni durante el mismo periodo geológico, y, por tanto, lo hicieron en un contexto ecológico distinto. La variación en los valores de diferentes parámetros biológicos (edad de maduración sexual, fecundidad, crecimiento y tasa de supervivencia) como respuesta a ambientes extremos resulta específica para cada especie, y esta variación



Foto 3.4: Pingüinos emperador (*Aptenodytes forsteri*) buceando. Se trata de los vertebrados mejor adaptados a las inhóspitas condiciones de la Antártida, hasta el punto de ser los únicos pingüinos capaces de soportar el invierno en estas latitudes, con temperaturas de hasta $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

determina sus procesos demográficos y su dinámica poblacional. A su vez, la demografía determina su distribución y abundancia. Por otro lado, las adaptaciones ecofisiológicas de cada especie (por ejemplo, la tolerancia a temperaturas extremas o la vida acuática o semiacuática) limitan o favorecen su adaptación al hielo y otras condiciones de vida extremas. Por eso es necesario distinguir estrategias biológicas y mecanismos de adaptación específicos para entender las consecuencias del calentamiento global sobre distintas especies.

Debido a la marcada estacionalidad de los ecosistemas antárticos, las especies de la megafauna tuvieron que adaptar sus ciclos vitales a los cambios climatológicos y físicos extremos que se producen entre verano e invierno. Así, la casi totalidad de la megafauna se reproduce durante el verano austral, cuando la extensión del hielo marino retrocede y hace el medio terrestre más accesible. Sin embargo, este espacio libre de hielo es muy reducido, por lo que la competición por él resulta localmente importante. Finalizada la reproducción, la mayoría de las especies realizan movimientos migratorios o de dispersión, ya que no pueden sobrevivir al invierno antártico. Algunas vagan y viven en el océano en busca de alimento; otras efectúan dispersiones hacia territorios invernales más al norte; y, finalmente, otras permanecen en el hielo, cerca de zonas donde el alimento resulta accesible, como ocurre en las polinias, aberturas en el hielo marino –formadas por fuertes corrientes oceánicas– que permiten el acceso seguro al mar para encontrar alimento.

Dada la alta estacionalidad de los ciclos vitales, todas las especies dependen de estímulos o señales ambientales que les indican cuándo es el momento adecuado para emprender sus movimientos migratorios o desarrollar las distintas fases de su ciclo vital. La alteración de estos estímulos por el calentamiento global (por ejemplo, los cambios en el inicio del deshielo en primavera o en la formación del hielo en otoño, o los cambios de temperatura) puede tener consecuencias importantes para las poblaciones y las comunidades de organismos (Barbraud y Weimerskirch 2006). En años en los que el retroceso del hielo resulta extremo debido a anomalías del clima, aunque existe más espacio disponible para la cría de aves y pinnípedos, éstos normalmente no retornan a nidificar o a criar en mayor cantidad, ya que también suele haber una menor disponibilidad de alimento asociada al clima adverso.

La escasez de territorio no cubierto de hielo y la influencia del clima y los cambios físicos del continente antártico hacen que las islas antárticas y subantárticas sean muy importantes para la megafauna. Su disponibilidad de territorio y su fácil acceso al alimento suelen ser mayores que en el continente, y constituyen lugares de reproducción óptimos para aves marinas y pinnípedos. Muchas de estas islas se hallan alejadas del continente, como las islas del Arco de Escocia o las del sector índico del océano Antártico, incluyendo los archipiélagos de Kerguelen y Crozet. En estos archipiélagos, la mayoría de los depredadores dependen casi exclusivamente del alimento que encuentran en el medio pelágico. Sin embargo, la disponibilidad de este alimento, constituido principalmente por el

krill o por especies depredadoras del krill, puede resultar mucho más variable e impredecible que en otras zonas, debido a las interacciones entre el clima y distintos fenómenos oceanográficos.

3.3.1. Variabilidad biológica y adaptación al hielo

Durante la época de cría, que se reduce a los escasos meses de verano, tanto mamíferos como aves marinas se congregan en colonias situadas en tierra o sobre el hielo. Sin embargo, la adaptación a ciclos estacionales es distinta en ambos grupos y varía principalmente en función de sus requerimientos energéticos.

3.3.1.1. AVES MARINAS

En las aves marinas, la mayor inversión de energía en la reproducción se produce durante la alimentación de los pollos, que se alarga hasta que éstos se independizan de sus padres. En los pingüinos, la independencia suele ocurrir un mes después de la eclosión de los huevos. Durante este tiempo, los padres realizan múltiples viajes de alimentación al mar y deben asegurar un suministro constante de presas para garantizar el éxito reproductor y el mantenimiento de los pequeños. En esta época dependen del medio marino, que debe abastecerlos de presas, pero están limitados por la distancia que pueden viajar desde la colonia de cría para encontrarlas, así como por el tiempo máximo que pueden invertir en estos viajes sin perjudicar el desarrollo de los pollos. En otras aves marinas, y en particular en los albatros, los pollos se toman más tiempo para alcanzar la independencia. En el caso extremo del albatros viajero (*Diomedea exulans*), la independencia puede tardar hasta ocho meses, con lo que la inversión energética de los padres en la cría resulta mucho mayor, y esto da lugar a ciclos de cría bianuales.

Los efectos del calentamiento sobre las aves marinas se han detectado principalmente entre aquellas especies que dependen de una fuente abundante, constante y cercana de alimento, y cuyos pollos alcanzan rápidamente la independencia, como los pingüinos. Para éstos, los efectos del calentamiento sobre los ecosistemas conllevan una disminución del alimento disponible, que repercute principalmente en su éxito reproductor (Fraser y Hofmann 2003; Forcada et al. 2006; Trathan et al. 2006). En años en los que la extensión del hielo marino es baja, debido al aumento de las temperaturas, la disponibilidad de krill disminuye. Éste constituye la presa principal de muchos pingüinos y algunos petreles, que deben permanecer mayor tiempo en el mar buscando alimento.

En otras aves marinas menos dependientes del entorno físico y biológico más próximo a las colonias de cría, la obtención de alimento puede producirse a centenares o incluso a miles de kilómetros de distancia. Por ejemplo, muchos albatros que nidifican en islas subantárticas viajan durante días recorriendo centena-

res de kilómetros en busca de alimento antes de volver a sus nidos y alimentar a sus pollos. Éste es el caso del albatros de ceja negra (*Talassarche melanophrys*) y del albatros de cabeza gris (*Talassarche chrysostoma*) (foto 3.5), los cuales anidan en Georgia del Sur y viajan regularmente hasta la plataforma continental patagónica o la Península Antártica, en pos de presas como calamares y krill, respectivamente. La capacidad de desplazarse largas distancias en poco tiempo les permite acceder a presas más lejanas y dispersar el esfuerzo de búsqueda de alimento, con lo cual pueden maximizar la cantidad de comida que transfieren a los pollos tras su regreso a la colonia. Para estas especies que no dependen directamente del hielo marino, las anomalías ambientales relacionadas con cambios climáticos tienen un efecto menor.

En otras especies de petreles, como el petrel de nieve (*Pagodroma nivea*) (foto 3.6), la dependencia del hielo limita el acceso al alimento. Este petrel nidifica estrictamente en zonas cubiertas de hielo o nieve, a veces situadas a centenares de kilómetros de distancia de su fuente principal de alimento, el krill. Para nutrir a sus pollos, los padres deben recorrer estas distancias frecuentemente, con lo que invierten gran cantidad de energía en viajar. Dada la relación del krill con el hielo marino, el petrel de nieve se ve afectado en años en los que el hielo retrocede significativamente y reduce la disponibilidad de krill y de otro tipo de recursos dependientes del hielo (Jenouvrier, Barbraud y Weimerskirch 2005). Como la



Foto 3.5: Un albatros de cabeza gris (*Talassarche chrysostoma*) cebando a su polluelo en Georgia del Sur, tras un largo viaje en busca de alimento

mayoría de petreles y albatros, el petrel de nieve es una especie longeva, que se reproduce despacio y tarda en alcanzar la madurez sexual. Esto requiere una regulación efectiva de la energía que invierte en la reproducción en comparación con la que utiliza para sobrevivir. Dado que la reproducción puede ser costosa, el petrel de nieve sobrevive a expensas de no reproducirse en aquellos años en los que el clima y la dinámica del hielo marino afectan a la cobertura de hielo marino y a la disponibilidad de alimento.

De entre los pingüinos antárticos, el de Adelia (*Pygoscelis adeliae*) y el emperador (*Aptenodytes forsteri*) son los más afines al hielo. El pingüino emperador es uno de los vertebrados antárticos más adaptados al hielo, capaz de sobrevivir a temperaturas inferiores a -50 °C durante las tormentas del invierno, en uno de los ambientes más extremos y hostiles del planeta. Presenta uno de los ciclos reproductores más largos, que empieza en marzo, durante el invierno, y finaliza en diciembre, durante el verano. La cría tiene lugar en el hielo marino de rápida formación, que es el que solidifica en invierno sobre el mar y rompe en verano. Durante la incubación y eclosión de su único huevo, así como en las primeras semanas de vida del pollo, los machos resisten más de tres meses sin alimento, expuestos a temperaturas extremas, y llegan a perder hasta el 45% de su peso corporal. Durante este periodo, las hembras se alimentan en el mar, principalmente de peces. Estudios sobre esta especie en el sector índico del océano Antártico indican



Foto 3.6: Petrel de nieve (*Pagodroma nivea*). Estas aves marinas crían en zonas permanentemente heladas alejadas del mar, por lo que deben desplazarse cientos de kilómetros para encontrar el krill, principal alimento con que ceban a sus pollos.

que los machos sobreviven menos que las hembras, debido a su mayor inversión de energía en la reproducción. Sin embargo, el aumento de temperatura en verano y en invierno puede reducir la supervivencia en ambos sexos; en particular, la disminución extrema de la extensión de hielo marino puede incrementar la mortalidad en los machos (Jenouvrier, Barbraud y Weimerskirch 2005), como consecuencia de la posible menor disponibilidad de alimento.

Las estrategias biológicas del pingüino emperador y del petrel de nieve –las aves más adaptadas al hielo antártico– contrastan en diversos aspectos (Jenouvrier, Barbraud y Weimerskirch 2005). El pingüino emperador se reproduce casi cada año, a pesar de las condiciones extremas y del coste que esto representa para los machos adultos, mientras que el petrel de nieve puede diferir la reproducción para evitar dicho coste y presenta un ciclo reproductor más corto. El pingüino emperador empieza pronto a reproducirse, mientras que el petrel de nieve puede tardar más de siete años y su longevidad es posiblemente mayor a la del pingüino emperador. Sin embargo, para ambas especies una mayor reducción del hielo marino podría dar lugar a cambios poblacionales importantes a largo plazo.

3.3.1.2. MAMÍFEROS MARINOS

A diferencia de las aves marinas, cuyo esfuerzo reproductor se limita a la puesta y el desarrollo del huevo, los mamíferos tienen una larga gestación, cuya última fase requiere un elevado gasto energético para las madres. Entre los pinnípedos antárticos, el periodo de gestación equivale habitualmente al intervalo entre dos veranos consecutivos. Después, durante la lactancia, las hembras deben transferir a las crías una cantidad de energía aún mayor que durante la gestación. En las focas (fócidos), la lactancia dura un mes como máximo; y entre los otarios, concretamente en el lobo marino antártico (*Arctocephalus gazella*), cerca de cuatro meses. Por lo general, la lactancia en los otarios (lobos y leones marinos) suele dilatarse cerca de un año, pero el acortamiento a cuatro meses quizá sea la única adaptación posible que permite al lobo marino sobrevivir a la estacionalidad antártica. La mayoría de las especies de pinnípedos pueden reproducirse en veranos consecutivos, por lo que la nueva gestación comienza mientras la cría del año lacta. Esto hace que las hembras sean más dependientes del medio terrestre cuando llega el momento de los nacimientos, al margen de las condiciones ambientales y de la disponibilidad de alimento. Para el lobo marino antártico, cuyo éxito reproductor se basa en una lactancia más reducida que la de otros congéneres y en una independencia más temprana de las crías, las condiciones de escasez de alimento son aún más difíciles de sobrellevar que para otros pinnípedos.

Para poder completar el ciclo reproductor y transferir toda la energía necesaria durante la lactancia, los pinnípedos han desarrollado dos estrategias distintas de alimentación y almacenamiento de energía (figura 3.1). Una de ellas, llamada reproducción capital, consiste en la acumulación de reservas energéticas en forma

de tejido lipídico, las cuales se movilizan y utilizan durante la época de cría, en la que los adultos generalmente no se alimentan, lo cual exige también reservas suficientes para mantener sus funciones corporales y su metabolismo. Esta estrategia es la que emplean todas las focas antárticas, desde el elefante marino austral (*Mirounga leonina*) hasta las focas leopardo (*Hydrurga leptonyx*), cangrejera (*Lobodon carcinophagus*), de Weddell (*Leptonychotes weddelli*) y de Ross (*Ommatophoca rossi*) (figura 3.2). La otra estrategia, llamada reproducción por inversión, requiere una fuente de alimento cercana a la colonia de cría y suficiente para abastecer las necesidades energéticas de madres e hijos. Al igual que hacen los pingüinos durante la reproducción, las madres de lobo marino realizan múltiples viajes de alimentación al mar y deben volver al medio terrestre para amamantar a sus crías. Esto limita el tiempo de alimentación en el mar —por lo general no superior a una semana—, durante el cual transforman gran parte del alimento ingerido en leche. Esta estrategia utilizada por el lobo marino antártico aumenta mucho su dependencia de las condiciones ambientales que determinan la disponibilidad de alimento cerca de las colonias de cría.

Los efectos del calentamiento global sobre los pinnípedos se observan principalmente durante la época de cría o en los meses previos, cuando los adultos deben acumular reservas suficientes. Las repercusiones más evidentes están relacionadas

Figura 3.2: Variación latitudinal de la distribución de focas y lobos marinos antárticos



En la figura, cada color representa a una especie, y la variación de tono en la escala latitudinal de la derecha indica la variabilidad en su distribución sur-norte; los colores más intensos equivalen al centro de su distribución, y los menos intensos corresponden a los límites de ésta. La foca de Weddell es el pinnípedo más adaptado al hielo y el más resistente a condiciones extremas. El lobo marino antártico es el menos adaptado al hielo y necesita superficies libres de éste para la cría.



Foto 3.7: Lobo marino antártico (*Arctocephalus gazella*). El éxito reproductor de este otárido se halla condicionado por los cambios que se producen en el clima y en la cantidad de krill.

con las alteraciones climáticas que modifican los ecosistemas y la fuente de alimento principal de los individuos reproductores. Así, por ejemplo, en el lobo marino antártico que cría en Georgia del Sur se ha visto que la productividad, el éxito reproductor y otros parámetros vitales disminuyen con los cambios ambientales derivados del fenómeno de El Niño en el Pacífico tropical (Forcada et al. 2005). Esta alteración climática se transfiere al sector atlántico suroeste del océano Antártico y se manifiesta mediante elevadas temperaturas del mar y con una reducción de la extensión del hielo marino en invierno. En esta región, el descenso de la cobertura del hielo está asociado a una menor disponibilidad de alimento para los lobos marinos, tanto de krill antártico –su presa principal– como de las especies de peces que forman parte de su dieta.

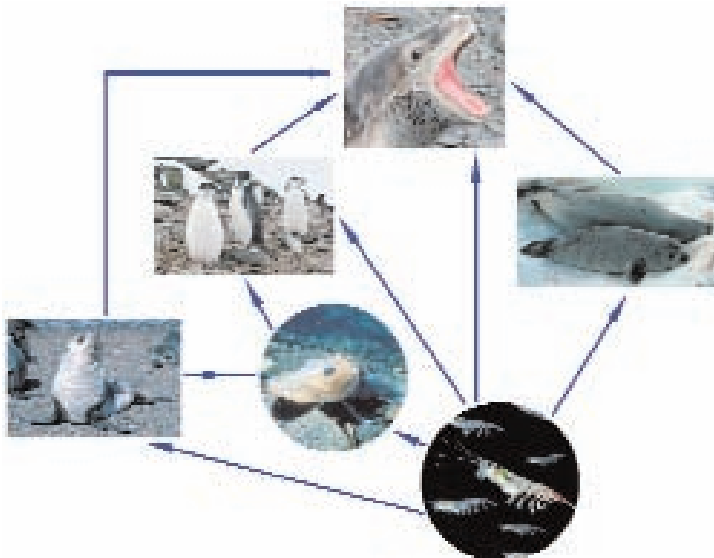
En el elefante marino austral, que tiene una estrategia completamente opuesta a la del lobo marino antártico y una distribución latitudinal más amplia, también se han observado los efectos de El Niño en la supervivencia de las crías. Las madres de elefante marino acumulan reservas lipídicas ingiriendo más alimento en la última fase de la gestación. Por lo general, esto suele ocurrir por encima de los límites de la Convergencia Antártica, la zona que separa el océano Antártico de aguas templadas y subtropicales. Tras el nacimiento de las crías, éstas son amamantadas durante un mes escaso, en el que se les transfiere una enorme cantidad de energía. Las crías se independizan con el destete, y a partir de ese momento deben sobrevivir utilizando sus propias reservas y otros recursos. En algunos años de El Niño, la disponibilidad de alimento para madres y crías es mayor, ya que repercute positivamente sobre la abundancia de calamares, una de sus presas principales. La mayor inversión de energía en años de anomalías climáticas parece favorecer la supervivencia de las crías de primer año en la isla Macquarie (McMahon y Burton 2005). En esta especie y región del océano Antártico, El Niño tiene efectos opuestos a los observados en el lobo marino antártico de Georgia del Sur.

Entre las focas propiamente antárticas, los efectos del calentamiento no son tan evidentes, debido a su capacidad para sobrevivir de las reservas de alimento acumuladas fuera de la época de cría. En estas especies, a diferencia de lo que sucede con las focas árticas, como la ocelada, la reducción del hielo marino no supone una pérdida de acceso a la fuente principal de alimento, ni tampoco una pérdida de protección de las crías frente a depredadores. De entre las focas antárticas, la más adaptada al hielo es la de Weddell (figura 3.2), que se alimenta principalmente de grandes peces bentónicos, cuya disponibilidad no parece haber disminuido con el retroceso del hielo marino. Por otra parte, la foca de Weddell está adaptada a temperaturas extremas, y su éxito reproductor depende de las condiciones ambientales. En condiciones de temperaturas extremas y fuertes tormentas se puede producir la pérdida de la cría. Sin embargo, las madres están suficientemente bien adaptadas y capacitadas para sobrevivir a estas condiciones. La estabilidad de las poblaciones queda así asegurada, ya que las madres sobreviven a pesar de perder ocasionalmente a las crías. Por el contrario, los efectos ambientales extremos en el lobo marino

antártico afectan tanto a madres como a crías, lo cual conlleva una mayor variabilidad en las trayectorias demográficas y el crecimiento neto de sus poblaciones, que a largo plazo puede producir disminuciones poblacionales importantes.

En otras focas antárticas, la adaptación al hielo es distinta. Por ejemplo, la foca leopardo (esquema 3.1), uno de los principales depredadores antárticos, se asocia al hielo, especialmente al hielo marino de rápida formación, así como a fragmentos de hielo flotantes e icebergs, en los que suele descansar después de sus actividades depredadoras. El nacimiento de sus crías ocurre en las plataformas de hielo y en el hielo marino de rápida formación, pero, a diferencia de la foca de Weddell, la foca leopardo no permanece todo el tiempo sobre el hielo. Durante la época de cría, la foca leopardo se alimenta de especies animales también asociadas al hielo, como el krill antártico, algunas especies de peces bentónicos, pingüinos y, sobre todo, de las crías de otros pinnípedos, especialmente de foca cangrejera. En muchas regiones antárticas, las crías de foca cangrejera constituyen una fuente principal de alimento, hasta el punto de que se especula sobre el hecho de que la foca leopardo presenta un ciclo reproductor más flexible y adaptable a la estacionalidad antártica que el de otras focas (por ejemplo, la foca de Weddell y la cangrejera) como mecanismo que le permite tener sus propias crías cuando otras especies, como la foca cangrejera, ya han parido las suyas, para así poder alimentarse de estas últimas. Por otro lado, al no tratarse de un depredador selectivo, la foca leopardo puede

Esquema 3.1: La foca leopardo y sus principales presas



La foca leopardo es uno de los mayores depredadores antárticos. No se trata de un depredador específico, por lo que puede alimentarse tanto de krill como de las crías de otros pinnípedos. Sin embargo, los efectos en cascada que ocurren en las redes tróficas con los cambios climáticos pueden alterar negativamente la disponibilidad de muchas de sus presas a la vez, dificultando con ello su obtención de alimento.



Foto 3.8: Foca leopardo (*Hydrurga leptonyx*). Esta foca es el mayor y más eficaz predador presente en aguas antárticas, lo que la sitúa en la cúspide de la cadena alimentaria. Entre sus presas figuran crías de otras focas y pingüinos. La foto muestra el momento en que una foca leopardo captura, bajo el agua, un pingüino de Adelia.

cambiar de presas en función de su disponibilidad, lo que en principio la haría menos sensible a cambios climáticos que disminuyan la abundancia de alimento. Sin embargo, en épocas en que las anomalías climáticas reducen la extensión del hielo marino también desciende considerablemente para las focas leopardo la disponibilidad tanto de krill antártico como de sus múltiples depredadores, ya que estas condiciones alteran significativamente las redes tróficas. Además, la foca leopardo tiene una época de dispersión después del periodo reproductor que está asociada a los cambios ambientales de origen climático (Jessopp et al. 2004), por lo que en años de elevadas temperaturas marinas y menor cobertura de hielo se altera la fase dispersiva y baja cuantiosamente el número de focas leopardo que viajan a las colonias reproductoras de pingüinos y lobos marinos de islas antárticas y subantárticas. Estas condiciones están asociadas a una menor abundancia de krill para los pingüinos en las colonias de cría (Fraser y Hofmann 2003) y parecen indicar también que hay menos alimento disponible para las focas leopardo.

La información sobre los efectos del calentamiento en el resto de las focas antárticas es más escasa, especialmente en la foca de Ross, cuya biología aún se desconoce en gran medida. Por otro lado, todavía se especula acerca de la expansión en la distribución y el aumento poblacional de la foca cangrejera como resultado de

la eliminación o disminución de las ballenas en muchas regiones antárticas. Al reducir la presión de depredación de las ballenas sobre el krill, las focas cangreje-ras, cuyo principal alimento también es el krill, podrían haber acrecentado sus efectivos poblacionales gracias al llamado «superávit» de krill. Durante muchos años se ha considerado que esta especie de foca representa casi el 70% de la bio-masa mundial de pinnípedos y alcanzó este estatus gracias al citado superávit. Pero al tratarse de una especie fundamentalmente dependiente del krill, también podría pensarse que sería una de las más perjudicadas, indirectamente, por los efectos del calentamiento sobre éste. Sin embargo, no se sabe con certeza si esto está ocurrien-do, ya que las estimaciones de abundancia disponibles no resultan muy fiables y se desconocen los efectivos poblacionales reales de esta especie.

La teoría del superávit de krill, que actualmente podría cuestionarse debido a las pruebas sobre la disminución de sus efectivos (Atkinson et al. 2004; v. capítulo 2), también se ha utilizado como una posible explicación para los cambios observa-dos entre especies de pingüinos antárticos (Fraser et al. 1992). Sin embargo, como se explica en el siguiente apartado, resultan más convincentes los efectos combina-dos del calentamiento global sobre la transformación de hábitats críticos, por un lado, y, por otro, sobre el aumento de la fluctuación de los ecosistemas marinos y la consiguiente alteración de la disponibilidad de alimento de estas especies (Fra-ser y Hofmann 2003; Forcada et al. 2006).

En los cetáceos, principalmente en las ballenas, no se han podido establecer con claridad las repercusiones del cambio climático, ya que su gran dispersión a lo largo del océano Glacial Antártico, sus amplios movimientos migratorios y su baja densidad poblacional dificultan el estudio detallado de su ecología en relación con la dinámica del hielo y el clima. Sin embargo, se han identificado varios escenarios e hipótesis acerca de los efectos adversos que podría ocasionar el calentamiento sobre algunas especies. Entre éstos, los más probables están relacionados con los efectos del clima global sobre el medio ambiente mediados por fenómenos climá-ticos cíclicos como El Niño. Éste es el caso de la ballena franca austral (*Eubalae-na australis*), cuya productividad y éxito reproductor parecen disminuir con el aumento de la temperatura global (Leaper et al. 2006). Sin embargo, aún se desco-nocen la distribución exacta y la abundancia de la mayoría de las especies de balle-nas en la Antártida, ya que muchas poblaciones fueron intensamente explotadas para su comercialización. Existen indicios de recuperación en algunas poblacio-nes, incluidas las de las especies más perjudicadas, como la ballena azul (*Balaenop-tera musculus*), pero su gran dispersión invernal y la baja densidad en toda su área de distribución siguen poniendo bastantes trabas para su estudio. En general es posible que la reducción de su presa principal provocada por el aumento en la fre-cuencia de anomalías climáticas, especialmente las que tienen efectos extremos sobre el medio ambiente, y en particular sobre el hielo marino, determine el esta-do nutritivo de las madres y cause variabilidad en algunos parámetros de la biolo-gía reproductiva.

3.3.2. Adaptación al hielo y hábitats críticos

Uno de los ejemplos más claros de los efectos del calentamiento global sobre la megafauna es el cambio poblacional y de distribución observado en especies congénicas de pingüinos que habitan y crían en las mismas regiones. Aquí se combina la transformación o pérdida del hábitat crítico para la cría con la fluctuación del ecosistema marino y la consecuente alteración de la disponibilidad de alimento. Las secuelas más evidentes se han detectado en la Península Antártica e islas adyacentes.

El pingüino de Adelia, junto con el barbijo (*Pygoscelis antarctica*) y el papúa (*Pygoscelis papua*), todos ellos pinguicélidos y de morfología y hábitos parecidos, son los más afectados por las consecuencias del calentamiento, observadas sobre todo en la Península Antártica y en las islas antárticas y subantárticas adyacentes (Fraser y Hofmann 2003; Forcada et al. 2006). El pingüino papúa es una especie esencialmente subantártica y cuenta con una subespecie en la Península Antártica. El pingüino de Adelia presenta una distribución circunantártica –sobre todo en el continente–, ligada estrechamente al hielo, y en invierno se encuentra principalmente en la zona marginal de éste. El pingüino barbijo se restringe a la porción marítima de la zona norte del continente, y durante la época de cría habita sobre todo islas antárticas y subantárticas. Las tres especies a veces concurren en las mismas áreas geográficas, por lo que se las considera especies simpátricas. Sin embargo, existe cierta segregación ecológica entre ellas, debida especialmente a la adaptación a sus hábitats preferidos –caracterizados mayormente por la dominancia o la ausencia de hielo marino–, pero también a las diferencias en cuanto a hábitos alimentarios, patrones migratorios, biología y fenología de la reproducción (cronología de los distintos eventos). Las consecuencias del calentamiento global para estas especies dependen de su afinidad a hábitats inicialmente dominados por la presencia de hielo, de la transformación experimentada por dichos hábitats, de su habilidad para explotar nichos ecológicos alternativos y de las alteraciones suscitadas en la cronología de la reproducción.

Los efectos del calentamiento en el pingüino de Adelia (foto 3.9) son quizá los más importantes, ya que suponen la pérdida de hábitat crítico –el hielo marino–, sobre todo en la época de cría, así como el descenso de su presa principal –el krill–, debido a la variabilidad del ecosistema marino y la modificación de las redes tróficas por culpa de los cambios climáticos. Esta especie necesita el hielo marino para sobrevivir, y el aumento de su inestabilidad disminuye la posibilidad de completar su ciclo reproductor en años de climas extremos, lo que da lugar a oscilaciones poblacionales importantes que la hacen más vulnerable frente a los efectos del calentamiento que sus congéneres. De éstos, el pingüino barbijo (foto 3.9) se beneficia de la ampliación del territorio desprovisto de hielo durante la época de cría, pero se ve perjudicado igualmente por la mengua de alimento provocada por la reducción del hielo marino. Esta especie se alimenta casi exclusivamente de krill en aquellos hábitats dominados por este crustáceo, y no parece seleccionar otras presas en años en los que el krill es localmente más escaso. Por eso, sus poblaciones fluctúan con condi-



Foto 3.9: Pingüinos de Adelia (derecha) y barbijo (izquierda). Ambas especies crían en islas antárticas, en algunos casos con su congénere, el pingüino papúa. La disminución de la extensión y cobertura del hielo marino les afecta, alterando su hábitat de reproducción y la disponibilidad de alimento durante la cría.



Foto 3.10: Pingüinos papúa, una de las especies que posiblemente se beneficien de los efectos del calentamiento en algunas regiones. Aunque el hábitat de cría del pingüino papúa aumenta al retroceder el hielo marino como consecuencia del calentamiento, éste también modifica el ecosistema marino y disminuye la disponibilidad de su alimento.

ciones climáticas extremas, aunque menos que las del pingüino de Adelia. Para el pingüino papúa (foto 3.10), adaptado a hábitats libres de hielo, el descenso de la extensión y cobertura de hielo generado por el calentamiento incrementa la disponibilidad de hábitat para la cría. Sin embargo, las consecuencias del calentamiento sobre sus presas principales afectan a su éxito reproductor y, posiblemente, a otros parámetros poblacionales. Debido a su menor densidad, en comparación con las demás especies, su competencia con éstas por el alimento y otros recursos es más baja. Además, a diferencia de las otras especies, no suele depredar predominantemente krill, sino que también se alimenta de peces y otras especies marinas, con lo cual puede explotar un nicho ecológico distinto. Debido a estas diferencias, es posible que esta especie se beneficie de los efectos del calentamiento en algunas regiones.

3.4. RESULTADO DE LAS INTERACCIONES ENTRE EFECTOS ANTROPOGÉNICOS SOBRE LA MEGAFUNA ANTÁRTICA

Para varios grupos de especies antárticas, los efectos del calentamiento global se añaden a otros efectos antropogénicos adversos, como la contaminación por vertidos de petróleo y la introducción de especies no autóctonas (por ejemplo, las ratas y los gatos), las cuales han proliferado y han eliminado poblaciones enteras de aves nidificantes en algunas islas subantárticas. La mayoría de las especies invasoras provienen de climas templados y se beneficiarán del aumento de temperatura durante el verano, lo que dificultará su erradicación, si es que ésta se intenta llevar a cabo, en aquellas islas donde ya están establecidas. Sin embargo, los peores efectos antropogénicos que se conocen sobre la megafauna son las capturas incidentales en las pesquerías y la pérdida de alimento provocada con la intensificación de éstas.

Los grupos de especies más afectados por las capturas incidentales son los albatros y petreles que nidifican en islas subantárticas, muchos de los cuales realizan largos viajes de alimentación sobre el océano, donde además tienen fases de dispersión juvenil que pueden durar años. Las peores pesquerías son las de palangre pelágico y de fondo. El palangre pelágico, con artes de más de 130 km de longitud y miles de anzuelos, se utiliza para pescar especies muy valiosas comercialmente, como los atunes y los peces espada. Los albatros han aprendido a alimentarse del cebo usado para estas capturas, y se cree que estas artes pueden llegar a ocasionar anualmente la muerte por ahogamiento de decenas e incluso centenares de miles de ejemplares de aves marinas. El palangre de fondo, cuyo objetivo suele ser la pesca de la merluza chilena, se emplea sobre todo en aguas de la plataforma continental y también provoca numerosas capturas incidentales.

Se estima que 17 de las 24 especies de albatros existentes se encuentran seriamente amenazadas por este problema, y las poblaciones de algunas de las que viven gran parte del año en aguas del océano Antártico se hallan en peligro de extinción. A pesar de los esfuerzos de diversos grupos internacionales –incluidos grupos



Foto 3.11: Albatros viajero (*Diomedea exulans*). Es el ave marina de mayor envergadura y una de las que presentan un ciclo reproductor más largo, por lo que la cría tiene una periodicidad bianual. Durante la reproducción, puede llevar a cabo desplazamientos de hasta cientos de kilómetros y varios días de duración en busca de alimento antes de regresar al nido para cebar a su único pollo.

especiales de Naciones Unidas que han desarrollado programas de observación para evaluar los daños de estas pesquerías y promovido el uso de mecanismos de exclusión y reducción de capturas incidentales—, la FAO considera que muchos países todavía no han conseguido afrontar satisfactoriamente el problema. Además, la merluza chilena es una especie objetivo de pesquerías ilegales, muchas de ellas con barcos de bandera de conveniencia, para las cuales las capturas incidentales sólo suponen una molestia y un trastorno, no un problema de conservación por el que parezcan interesarse. Los albatros que nidifican en Georgia del Sur son especialmente sensibles a estas pesquerías, y sus poblaciones se citan entre las más amenazadas del mundo. Para algunas de estas especies, en particular el albatros de cabeza gris y el de ceja negra, los efectos del calentamiento sobre la disminución de su alimento constituyen un grave problema añadido para su éxito reproductor.

3.5. ¿ES EL CALENTAMIENTO GLOBAL UN PROBLEMA REAL PARA LA MEGAFaUNA ANTÁRTICA?

La mayoría de las poblaciones de megafauna estudiadas en diversas regiones del océano Antártico muestran cambios o fluctuaciones que en última instancia se correlacionan con los efectos del calentamiento global sobre el medio físico, es

decir, con aumentos significativos de la temperatura y reducciones en la extensión del hielo marino. En determinadas regiones, estas poblaciones muestran periodicidad en determinados parámetros, como el éxito reproductor, una periodicidad que coincide con los ciclos de la ENSO. En los casos examinados con detalle, los procesos poblacionales de escala medio-trófica –como, por ejemplo, aquellos que afectan al krill– y de escala alto-trófica –los que repercuten sobre los depredadores del krill– están conectados con la variabilidad ambiental local observada en algunas regiones del océano Antártico y en el Pacífico tropical en relación con la ENSO. Estas correlaciones a corto plazo detectadas durante oscilaciones de la ENSO tienen consecuencias potenciales a largo plazo para la estructura y función de los ecosistemas antárticos que difícilmente pueden explicarse por otra razón que no sea el cambio global. El efecto en cascada provocado sobre las redes tróficas y, en última instancia, sobre la megafauna es actualmente medible. Así, por ejemplo, aunque sigue sin demostrarse que los ciclos de la ENSO hayan sido alterados directamente por el calentamiento global, sí está claro que El Niño ha incrementado su frecuencia de aparición en los últimos 20 años, y esto ha ocurrido junto a una disminución progresiva de la extensión del hielo marino en invierno, fruto de una elevación de la temperatura de origen antropogénico.

3.6. ¿ES POSIBLE PREDECIR EL FUTURO?

Para predecir cómo va a afectar a los ecosistemas antárticos el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero podemos utilizar modelos climáticos que nos permiten estudiar el clima antártico y sus relaciones con el medio físico. Los modelos actuales vaticinan un calentamiento de algunos grados centígrados sobre la mayoría de la zona continental antártica a lo largo de este siglo. Sin embargo, las temperaturas medias sobre la mayoría del continente no se espera que suban por encima del punto de descongelación, con lo cual es posible que el calentamiento en los próximos 100 años no contribuya a una pérdida significativa de la mayoría del hielo continental. Pero también se pronostica un aumento de temperatura del océano Antártico, que puede dar lugar a la pérdida de un 25% del hielo marino, aunque existe gran incertidumbre sobre esta predicción. Igualmente, las aguas más calientes del océano pueden provocar un efecto negativo sobre las plataformas de hielo y acelerar su fragmentación y deshielo. Parece claro que el continuado retroceso del hielo marino seguirá afectando a las distintas especies de la megafauna antártica en diversa medida. Las consecuencias estarán directamente relacionadas con la dependencia de cada especie del hielo marino como hábitat crítico y con su adaptación a las perturbaciones producidas en la estacionalidad actual de la disponibilidad de alimento. Las alteraciones de la cadena trófica y la variación de las presas disponibles también modificarán la capacidad de carga del medio ambiente para muchas especies, cuyas poblaciones aumentarán o disminuirán en función de los cambios en dicha capacidad.

BIBLIOGRAFÍA

- ATKINSON, A., V. SIEGEL, E. PAKHOMOV y P. ROTHERY. «Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean». *Nature* 432 (2004): 100-103.
- BARBRAUD, C., y H. WEIMERSKIRCH. «Antarctic birds breed later in response to climate change». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103 (2006): 6248-6251.
- CLARKE, A. «Food webs and interactions: an overview of the Antarctic ecosystem». En W.N. Bonner y D.W.H. Walton. *Key Environments – Antarctica*. Oxford: Pergamon Press, 1985. 329-352.
- COOK, A.J., A.J. FOX, D.G. VAUGHAN y J.G. FERRIGNO. «Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century». *Science* 308 (2005): 541-544.
- DEROCHER, A. «Population ecology of polar bears at Svalbard, Norway». *Population Ecology* 47 (2005): 267-275.
- FORCADA, J., P.N. TRATHAN, K. REID y E.J. MURPHY. «The effects of global climate variability in pup production of Antarctic fur seals». *Ecology* 86 (2005): 2408-2417.
- FORCADA, J., P.N. TRATHAN, K. REID, E.J. MURPHY y J.P. CROXALL. «Contrasting population changes in sympatric penguin species in association with climate warming». *Global Change Biology* 12 (2006): 411-423.
- FRASER, W.R., W.Z. TRIVELPIECE, D.G. AINLEY y S.G. TRIVELPIECE. «Increases in Antarctic penguin populations: reduced competition with whales or a loss of sea ice due to environmental warming?». *Polar Biology* 11 (1992): 525-531.
- FRASER, W.R., y E.E. HOFMANN. «A predator's perspective on causal links between climate change, physical forcing and ecosystem response». *Marine Ecology Progress Series* 265 (2003): 1-15.
- JENOUVRIER, S., C. BARBRAUD y H. WEIMERSKIRCH. «Long-term contrasted responses to climate of two Antarctic seabird species». *Ecology* 86 (2005): 2889-2903.
- JESSOPP, M.J., J. FORCADA, K. REID, P.N. TRATHAN y E.J. MURPHY. «Winter dispersal of leopard seals (*Hydrurga leptonyx*): environmental factors influencing demographics and seasonal abundance». *Journal of Zoology* 263 (2004): 251-258.
- JOHNSTON, D.W., A.S. FRIEDLAENDER, L.G. TORRES y D.M. LAVIGNE. «Variation in sea ice cover on the east coast of Canada from 1969 to 2002: climate variability and implications for harp and hooded seals». *Climate Research* 29 (2005): 209-222.
- LAWS, R.M. *Antarctic Ecology*. Londres: Academic Press, 1984.
- LEAPER, R., J. COOKE, P.N. TRATHAN, K. REID, V. ROWNTREE y R. PAYNE. «Global climate drives southern right whale (*Eubalaena australis*) population dynamics». *Biology Letters* 2 (2006): doi: 10.1098/rsbl.2005.0431.
- LOEB, V., V. SIEGEL, O. HOLM-HANSEN, R. HEWITT, W. FRASER, W. TRIVELPIECE y S. TRIVELPIECE. «Effects of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web». *Nature* 387 (1997): 897-900.
- MARSHALL, G.J., A. ORR, N.P.M. VAN LIPZIG y J.C. KING. «The impact of a changing southern hemisphere annular mode on Antarctic Peninsula summer temperatures». *Journal of Climate* 19 (2006): 5388-5404.
- MCCMAHON, C.R., y H.R. BURTON. «Climate change and seal survival: evidence for environmentally mediated changes in elephant seal, *Mirounga leonina*, pup survival». *Proceedings of the Royal Society B* 272 (2005): 923-928.

- MEREDITH, M.P., y J.C. KING. «Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century». *Geophysical Research Letters* 32 (2005): L19604, doi: 10.1029/2005GL024042.
- MOLINE, M.A., H. CLAUSTRE, T.K. FRAZER, O. SCHOFIELD y M. VERNET. «Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend». *Global Change Biology* 10 (2004): 1973-1980.
- MURPHY, E.J., J.L. WATKINS, P.N. TRATHAN, K. REID, M.P. MEREDITH, S.E. THORPE, N.M. JOHNSTON et al. «Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web». *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 362 (2007): 113-148.
- PARKINSON, C.L. «Southern Ocean sea ice and its wider linkages: insights revealed from models and observations». *Antarctic Science* 16 (2004): 387-400.
- PECK, L.S., K.E. WEBB y D.M. BAILEY. «Extreme sensitivity of biological function to temperature in Antarctic marine species». *Functional Ecology* 18 (2004): 625-630.
- SMETACEK, V., y S. NICOL. «Polar ocean ecosystems in a changing world». *Nature* 437 (2005): 362-368.
- TRATHAN, P.N., y E.J. MURPHY. «Sea surface temperature anomalies near South Georgia: relationships with the Pacific El Niño regions». *Journal of Geophysical Research* 108 (2002): art. n.º 8075.
- TRATHAN, P.N., E.J. MURPHY, J. FORCADA, J.P. CROXALL, K. REID y S.E. THORPE. «Physical forcing in the southwest Atlantic: ecosystem control». En I.L. Boyd, S. Wanless y C.J. Camphuysen, eds. *Top Predators in Marine Ecosystems: Their Role in Monitoring and Management*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. Vol. 12: 28-45.
- TURNER, J. «El Niño-southern oscillation and Antarctica». *International Journal of Climatology* 24 (2004): 1-31.
- TURNER, J., T.A. LACHLAN-COPE, S. COLWELL, G.J. MARSHALL y W.M. CONNOLLEY. «Significant warming of the Antarctic winter troposphere». *Science* 311 (2006): 1914-1917.
- VAUGHAN, D.G., G.J. MARSHALL, W.M. CONNOLLEY, C. PARKINSON, R. MULVANEY, D.A. HODGSON, J.C. KING, C.J. PUDSEY y J. TURNER. «Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula». *Climate Change* 60 (2003): 243-274.
- ZWALLY, H.J., J.C. COMISO, C.L. PARKINSON, D.J. CAVALIERI y P. GLOERSEN. «Variability of Antarctic sea ice 1979-1998». *Journal of Geophysical Research* 107(9) (2002): 1-19.

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Foto 3.1: Grupo de pingüinos rey (<i>Aptenodytes patagonicus</i>). © Juan Carlos Muñoz	84
Foto 3.2. Un iceberg a la deriva, en el que se observan los distintos tipos de hielo formados durante diferentes etapas. © Jaime Forcada	86
Foto 3.3: Krill (<i>Euphasia superba</i>). © Ingo Arndt	89
Foto 3.4: Pingüinos emperador (<i>Aptenodytes forsteri</i>) buceando. © Doug Allan/naturepl.com	91
Foto 3.5: Un albatros de cabeza gris (<i>Talassarche chrysostoma</i>) cebando a su polluelo en Georgia del Sur, tras un largo viaje en busca de alimento. © Jaime Forcada	94
Foto 3.6: Petrel de nieve (<i>Pagodroma nivea</i>). © Simon King/naturepl.com	95
Foto 3.7: Lobo marino antártico (<i>Arctocephalus gazella</i>). © Juan Carlos Muñoz	99
Foto 3.8: Foca leopardo (<i>Hydrurga leptonyx</i>). © Doug Allan/naturepl.com	102
Foto 3.9: Pingüinos de Adelia (derecha) y barbijo (izquierda). © Jaime Forcada	105
Foto 3.10: Pingüinos papúa, una de las especies que posiblemente se beneficien de los efectos del calentamiento en algunas regiones. © Jaime Forcada	105
Foto 3.11: Albatros viajero (<i>Diomedea exulans</i>). © Juan Carlos Muñoz	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 3.1: Estrategias reproductivas de los pinnípedos antárticos (fotos © Jaime Forcada)	97
Figura 3.2: Variación latitudinal de la distribución de focas y lobos marinos antárticos (fotos © Jaime Forcada/Donald Malone)	98
Esquema 3.1: La foca leopardo y sus principales presas (fotos © Jaime Forcada/British Antarctic Survey)	101

NOTA SOBRE EL AUTOR



Jaume Forcada es investigador en el British Antarctic Survey (Natural Environment Research Council) de Cambridge (Reino Unido). Como ecólogo poblacional de la División de Ciencias Biológicas, desarrolla la mayor parte de su trabajo en el grupo de Biología de la Conservación. En la actualidad es responsable de la sección sobre integración de estudios de historia de vida y cadenas tróficas, que constituye una parte integral del programa de investigación DISCOVERY 2010 del British Antarctic Survey.

e-mail: JFOR@bas.ac.uk