

Actividad investigadora del CEDEX en la Antártida. Ecosistemas acuáticos de la Península Byers (Isla Livingston, Antártida marítima)

CEDEX research activities in Antarctica. Aquatic ecosystems in Byers Peninsula (Livingston Island, maritime Antarctica)

Manuel Toro^{1*}, Antonio Quesada², Antonio Camacho³, Marc Oliva⁴, Antonio Alcamí⁵, Dermot Antoniades⁶, Manuel Bañón⁷, Steven Fassnacht⁸, Eduardo Fernández-Valiente², Luis Galan⁹, Santiago Giralt¹⁰, Ignacio Granados¹¹, Ana Justel¹², Emma J. Liu¹³, Alberto López-Bueno⁵, Antonio Martínez-Cortizas¹⁴, Sergi Pla-Rabes¹⁵, Alberto Rastrojo⁵, Eugenio Rico¹⁶, Carlos Rochera³, Bart Van de Vijver¹⁷, David Velazquez², José Antonio Villaescusa³, Warwick F. Vincent⁶

Palabras clave

Antártida;
cambio climático;
ecosistemas acuáticos;
limnología;
paleolimnología;
sedimentos lacustres;

Resumen

El CEDEX ha participado desde 2001 en diferentes proyectos antárticos junto con numerosas instituciones españolas y de otros países, desarrollando su actividad científica en el Campamento Internacional de la Península Byers (Isla Livingston, islas Shetland del Sur, Antártida), lugar catalogado como Área Antártica de Especial Protección (Antarctic Specially Protected Area No. 126) por la importancia y valor de sus ecosistemas terrestres y acuáticos. Es una de las mayores áreas libres de hielo de la Antártida marítima, en la que se localiza la mayor variedad de ambientes y procesos geológicos, hidrológicos o biológicos de toda la región, con un estado de conservación prístino. La Península Byers está considerada la zona limnológica más significativa de toda la región de la Península Antártica por albergar un gran número de lagos, arroyos y charcas, con una excepcional biodiversidad de fauna y flora, contando con la presencia simultánea de gran parte de las especies más singulares, endémicas o representativas de la Antártida. Además, el registro sedimentario de los lagos de este enclave constituye uno de los archivos más completo y extenso de la región de la Península Antártica para el estudio paleoecológico y climático de la historia del Holoceno. Considerada un “hotspot” antártico en términos de biodiversidad, y localizada en una de las zonas del planeta donde se está detectando más significativamente el calentamiento global, la Península Byers reúne todas las características necesarias para ser considerada un lugar idóneo de referencia internacional para estudios y programas de seguimiento ambiental a largo plazo no sólo limnológicos, sino también terrestres o costeros.

Keywords

Antarctica;
climate change;
aquatic ecosystems;
limnology;
paleolimnology;
lake sediments;

Abstract

Since 2001 CEDEX has taken part in many Antarctic joint research projects with different institutions from Spain and other countries, developing scientific activities in the International Camp of Byers Peninsula (Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica). This place was designed as an Antarctic Specially Protected Area (No. 126) because the importance and value of its terrestrial and aquatic habitats. It is one of the largest ice-free areas of maritime Antarctica, with the highest diversity of environments and geological, hydrological and biological processes in the whole region, all of them in a pristine state. Byers Peninsula is considered the most significant limnological area in the Antarctic Peninsula region because it hosts a high number of lakes, ponds and streams, with an exceptional fauna and flora diversity, including the most singular, representative or endemic Antarctic species. Furthermore, the lakes sedimentary record is one of the widest and complete archives in Antarctic Peninsula region for the palaeoecological and climatic study of the Holocene. Because Byers Peninsula is an Antarctic biodiversity “hotspot”, and it is located in one of the areas in the Earth where global warming is being more significant, it must be considered as a suitable international reference site for limnetic, terrestrial and coastal studies, and long term monitoring programmes.

* Autor de contacto: manuel.toro@cedex.es

¹ Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Madrid, España.

² Departamento de Biología, Universidad Autónoma de Madrid, España.

³ Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Ecología Evolutiva, Universitat de Valencia, España.

⁴ Centro de Estudos Geográficos / IGOT, Universidade de Lisboa, Portugal.

⁵ Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CSIC), Madrid, España.

⁶ Université de Laval, Quebec, Canadá.

⁷ Agencia Estatal de Meteorología, Alicante, España.

⁸ Colorado State University, Fort Collins, Estados Unidos.

⁹ Instituto Geológico y Minero de España, Tres Cantos, España.

¹⁰ Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (CSIC), Barcelona, España.

¹¹ Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, Rascafría, España.

¹² Departamento de Matemáticas, Universidad Autónoma de Madrid, España.

¹³ Department of Earth Sciences, University of Bristol, Reino Unido.

¹⁴ Departamento de Edafología e Química Agrícola, Universidad de Santiago de Compostela, España.

¹⁵ Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF), Bellaterra, España.

¹⁶ Departamento de Ecología, Universidad Autónoma de Madrid, España.

¹⁷ National Botanic Garden of Belgium, Meise, Bélgica.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas polares, el Ártico y la Antártida, están siendo foco de atención en los últimos años en medios de comunicación de todo el mundo, por las claras evidencias que nos ofrecen del cambio climático global y su aceleración reciente. Esta realidad, ya prácticamente indiscutible, tiene una gran transcendencia a escala global: la Antártida y el océano que la rodea son una pieza fundamental del sistema climático del planeta, ya que condicionan el funcionamiento y las propiedades de la atmósfera y del resto de los océanos. La región de la Antártida, rodeada por los mayores océanos de la Tierra y cubierta casi en su totalidad por un casquete de hielo con un espesor medio de 2500 m, presenta un elevado balance negativo de la radiación (hasta un 85-90% de la radiación incidente es reflejada en gran parte del continente), actuando como un auténtico refrigerador del planeta. Cualquier cambio importante que se produzca en este balance tendrá sin duda implicaciones globales en atmósfera y océanos, además del propio efecto negativo, denominado *albedo feedback*, sobre esta región (Cordero *et al.* 2014; Hall 2004).

Ya hay evidencias de un calentamiento reciente del Océano Antártico, cuyos efectos se han hecho notar en algunas zonas de este continente, como la Península Antártica o las costas cercanas del Oeste del continente, donde se ha detectado una rápida expansión de comunidades de plantas (Convey *et al.* 2011), una mayor tasa de pérdida de hielo en glaciares o el colapso de un número importante de plataformas o barreras de hielo en sus costas (Vaughan *et al.* 2013). Si bien la Antártida Continental en su globalidad no parece mostrar una tendencia marcada hacia un calentamiento, y la plataforma de hielo marino en torno a la zona continental parece mantenerse o incluso incrementarse ligeramente, al menos en las últimas décadas (Vaughan *et al.* 2013), la Península Antártica es una de las regiones del planeta que ha sufrido un calentamiento regional más rápido en los últimos 50 años (Turner *et al.* 2005; Mulvaney *et al.* 2012). En esta región, el registro meteorológico de la Base Antártica de Esperanza, con observaciones históricas desde 1958, muestra un calentamiento medio equivalente a $3,5^{\circ} \pm 0,8^{\circ}\text{C}$ por siglo (Vaughan *et al.* 2003). Aunque en una escala temporal mayor, la tendencia a un calentamiento de la Península Antártica comenzó hace unos 600 años, la alta tasa constatada en el último siglo es inusual en un contexto de variabilidad climática natural en los últimos 2000 años (Mulvaney *et al.* 2012).

La ubicación del continente antártico, lejos de cualquier influencia directa y significativa de origen humano, es ideal para estudiar y monitorizar procesos tanto a escala local como global, así como su relación con posibles cambios climáticos. Sin embargo, la presencia humana en este continente es relativamente reciente en términos históricos, y aunque actualmente cada vez es mayor el número de localizaciones con un registro instrumental de datos ambientales, la disponibilidad de series de datos temporales y espaciales para generar modelos climáticos es muy escasa, lo que limita la confianza y aumenta la incertidumbre de las predicciones futuras para esta región del planeta. Sin embargo, hay un auténtico tesoro documental de la historia pasada del clima y de la evolución del medio ambiente en la Antártida recogido en el hielo y en los sedimentos

marinos y lacustres. Son registros que abarcan desde cientos o miles de años en los sedimentos, hasta millones de años en el casquete de hielo que cubre el continente. El estudio de los indicadores de naturaleza mineral, física, química o biológica acumulados a lo largo del tiempo en estos registros paleoambientales permite descifrar la evolución del clima en el pasado con una perspectiva temporal única y esencial para comprender la variabilidad climática natural en el pasado, y predecir en el futuro los cambios y respuestas del clima en diferentes escenarios. Es por ello que una de las prioridades en la investigación Antártica, con gran transcendencia para otras investigaciones en el resto del planeta, es el estudio y descifrado de los registros paleoclimáticos, cuyos resultados contribuirán a mejorar la exactitud y precisión de los modelos predictivos de cambio climático.

La interpretación de los registros paleoambientales, especialmente los de tipo sedimentario en ambientes acuáticos, requiere también de un conocimiento detallado del funcionamiento actual de los ecosistemas en los que se localizan, los procesos que en ellos se suceden, sus características hidrológicas y físico-químicas, y la estructura y composición de sus comunidades biológicas. De esta forma, conociendo y estudiando un amplio espectro de ambientes acuáticos con organismos que muestran diferentes respuestas a las condiciones ambientales actuales, podremos descifrar y reconstruir su evolución y la de otros sistemas similares en el pasado, seleccionando los indicadores mejores y más sensibles como sensores para un seguimiento actual y futuro del cambio climático y sus efectos.

Las diferentes formas de vida en la Antártida son el resultado de miles de años de evolución y adaptación a unas condiciones ambientales, generalmente extremas y muy cambiantes, con alternancias de periodos con avances y retrocesos glaciares que han obligado a los organismos a retraerse en épocas de clima más extremo en limitados y dispersos refugios, y recolonizar de nuevo en épocas más favorables los diferentes hábitats disponibles. El estudio de la biodiversidad antártica, las adaptaciones morfológicas y fisiológicas de los organismos, su distribución actual, sus interacciones, y en general, su respuesta a los cambios ambientales, es crucial y prioritario para comprender y conocer su evolución en el tiempo y predecir su posible futuro en diferentes escenarios de cambio climático, quedando aún mucho recorrido por hacer en este sentido en la investigación antártica.

2. LA COOPERACIÓN INTERNACIONAL EN LA INVESTIGACIÓN ANTÁRTICA

El Tratado Antártico, firmado en Washington D.C. el 1 de diciembre de 1959 y ratificado por España en 1982, entre otros muchos aspectos, establece un uso exclusivo de la Antártida para fines pacíficos, prohibiendo toda medida de carácter militar, excepto para colaborar con las investigaciones científicas, estableciendo la libertad de investigación científica en la Antártida y un compromiso de intercambio de información sobre los proyectos de programas científicos en la Antártida, personal científico y libre disponibilidad de las observaciones y resultados científicos. En este sentido, los Representantes de los Gobiernos firmantes del Tratado, en su XV Reunión Consultiva celebrada en París

en 1989, ya establecieron unas prioridades para la investigación en la Antártida, aún hoy vigentes:

- Detección de los cambios de importancia global mejor observados en la Antártida
- Procesos que relacionan los sistemas biológicos y del hielo antártico con la atmósfera y océanos del planeta
- Fuentes de información paleoambiental en la Antártida
- Ecología de los ambientes antárticos en proceso de cambio
- Monitorización y seguimiento de cambios ambientales en la Antártida

En España, el Comité Polar Español (CPE) fue creado por acuerdo de la Comisión permanente de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) en 1998, constituyendo la Autoridad Polar Española base para la coordinación de todas las actividades de las diferentes instituciones de España en las zonas polares, cuya Secretaría Técnica, dependiente de la Presidencia del Comité Polar Español, radica actualmente en la Dirección General de Investigación Científica y Técnica del Ministerio de Economía y Competitividad. La actividad científica española en la Antártida esta principalmente financiada por los Planes o Programas de Investigación Científica y Técnica de la Administración General del Estado en materia de I+D+I, a través de las correspondientes convocatorias de ayudas a proyectos de investigación. Para llevar a cabo la mayor parte de los proyectos financiados de investigación polar, España dispone de dos infraestructuras fijas: la Base Antártica Española Juan Carlos I (BAE-JCI), situada en la isla Livingston, y la Base Antártica Española Gabriel de Castilla (BAE-GC), situada en la isla Decepción, permaneciendo abiertas sólo durante el verano austral. La figura 1 muestra la localización de las infraestructuras antárticas españolas. Además, existe una instalación provisional gestionada por el personal de la BAE-JCI, también ubicada en la isla Livingston: el Campamento Internacional de la Península Byers (figura 2). Como infraestructura móvil para el desarrollo de las campañas polares, se cuenta con el Buque de Investigación Oceanográfica Hespérides, apoyado hasta hace un par de años para tareas logísticas y de apoyo a las Bases por el Buque de Investigación Oceanográfica Las Palmas, hoy ya retirado de la actividad polar. En paralelo, determinados proyectos desarrollados en estas

instalaciones pueden estar financiados por otros países, o bien proyectos financiados por España pueden desarrollarse con infraestructuras o logística de otros países, todo ello siguiendo el espíritu de colaboración internacional que rige la actividad científica en este continente.

El CEDEX, desde 2001, viene participando de forma continua en diferentes proyectos antárticos junto con numerosas instituciones españolas y de otros países, desarrollando su actividad científica en el Campamento Internacional de la Península Byers, lugar situado en el extremo occidental de la Isla Livingston (archipiélago de las Shetland del Sur), y catalogado como Área Antártica de Especial Protección (Antarctic Specially Protected Area - ASPA No. 126) por su especial importancia y valores biológicos y arqueológicos (ATCM 2011). Este estatus de protección creado bajo el Sistema del Tratado Antártico, regula el acceso a estas zonas designadas como ASPA, limitándose prácticamente a un uso exclusivo científico y bajo un estricto control de las actividades y la logística que en ellas se desarrolle, con el fin de minimizar al máximo el impacto sobre el medio ambiente de la actividad científica.

De especial interés, ha sido la participación en el proyecto BYERSIPY, que abarco las dos campañas correspondientes al Año Polar Internacional (2007-2008), integrado en uno de los más ambiciosos programas científicos coordinados internacionalmente, cuyo período de observaciones sobre el terreno en las zonas polares se desarrolló entre el 1 de marzo de 2007 y el 1 de marzo de 2009, con una participación de más de 60 países y 50.000 investigadores (<http://www.ipy.org/> <https://www.uam.es/otros/cn-scar/api.htm>).

Los proyectos en los que ha participado el CEDEX en la Antártida son los siguientes:

- LIMNOPOLAR I: Estudio de los ecosistemas acuáticos antárticos no marinos como sensores del cambio climático. (Ref.: REN2000-0435 ANT). Plan Nacional I+D+I. Programa Nacional de Recursos Naturales (Ministerio de Educación y Cultura). 2000-2003.
- LIMNOPOLAR II: Ecosistemas acuáticos no marinos de áreas polares. Tendencias ecológicas en un contexto de cambio climático global. (Ref.: CGL2005-06549-C02-01/ANT). Plan Nacional I+D+I. Programa Nacional de Biodiversidad, Ciencias de la Tierra y Cambio Global (Ministerio de Educación y Ciencia). 2005-2008.

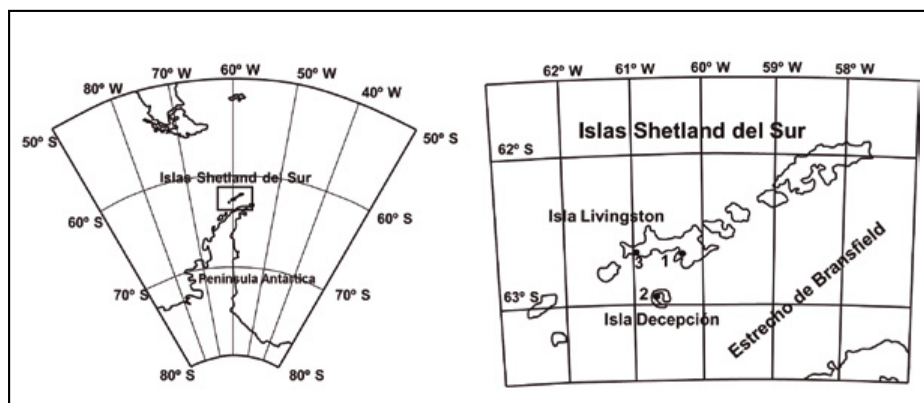


Figura 1. Localización de las infraestructuras antárticas de España: 1. Base Antártica Española Juan Carlos I (Isla Livingston); 2. Base Antártica Española Gabriel de Castilla (Isla Decepción); 3. Campamento Internacional de la Península Byers (Isla Livingston).



Figura 2. Regreso de los investigadores al Campamento Internacional de Byers tras una jornada de muestreo en los lagos de la Meseta Central de la Península Byers .

- BYERSIPY (Año Polar Internacional): Península Byers (Isla Livingston) como lugar antártico de referencia internacional para estudios terrestres, de agua dulce y costeros. (Ref.: POL2006-06635/CGL). Plan Nacional I+D+I. Programa Nacional de Recursos Naturales (Ministerio de Educación y Cultura). 2007-2009.
- CHRONOS. Geocronología del sedimento de lagos antárticos en la Península de Byers (Isla Livingston). (Ref.: CTM2009-07869-E). Plan Nacional I+D+i. Ministerio de Ciencia e Innovación. Subprograma de Acciones Complementarias. 2009.
- HOLOANTAR: Evolução holocénica ambiental na Antártida Marítima. Interações entre o permafrost e o ambiente lacustrino. Plan Nacional de Portugal: PTDC/CTE-GIX/119582/2010. 2012-2014.

La tabla 1 muestra las instituciones que han participado conjuntamente con el CEDEX en los proyectos arriba mencionados desde 2001 hasta la actualidad.

Tabla 1. Instituciones con las que ha participado el CEDEX en los proyectos de investigación antárticos desde 2001 hasta la actualidad.

Institución	País
Universidad Autónoma de Madrid (UAM)	España
Universitat de Valencia (UV)	España
Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)	España
Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama	España
Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (CSIC)	España
Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)	España
Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CSIC)	España
Instituto Geológico y Minero (IGME)	España
Universidad de Santiago de Compostela	España
Unidad de Tecnología Marina (UTM-CSIC)	España
Colorado State University	Estados Unidos
University of Liverpool	Reino Unido
University of Bristol	Reino Unido
Universidade de Lisboa - IGOT	Portugal
National Botanic Garden of Belgium	Bélgica
Université de Laval	Canadá
Poznan Radiocarbon Laboratory	Polonia
Pusan National University	Corea del Sur

Los siguientes apartados recogen las principales contribuciones a la investigación y el conocimiento de los ecosistemas acuáticos de la Península Byers (Isla Livingston) obtenidos en los proyectos reseñados, cuyos resultados específicos y detallados o bien ya han sido publicados (ver bibliografía), o los más recientes se encuentran aún en fase de redacción o en prensa en revistas científicas que cubren el ámbito del medio ambiente polar.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el extremo oeste de la Isla Livingston se encuentra la Península Byers, la mayor área libre de hielo permanente de las islas Shetland del Sur (región de la Antártida marítima), con una extensión de unos 60 km² (figura 3).

En la primera campaña científica llevada a cabo en 2001, en un enclave de la meseta central situado entre los lagos Somero y Limnopolar, se instaló una estación meteorológica automática (figura 4), equipada con sensores básicos (temperatura, humedad, viento, PAR y radiación global) siguiendo los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (Bañón *et al.* 2013). La Península Byers presenta un clima polar oceánico, menos extremo que el existente en la Antártida continental, con una temperatura media anual de -2,8°C, habiéndose registrando una temperatura máxima de 9,3°C y una mínima de -27,4°C (periodo 2002-2010), y precipitaciones que reflejan una gran irregularidad espacial en esta región, oscilando los valores entre los 500 y 800 mm anuales (Bañón *et al.* 2013). Durante el periodo estival, las temperaturas oscilan entre valores medios para las mínimas de -0,4°C y de 2,7°C para las máximas, con un valor absoluto registrado de temperatura máxima de 9,3°C y mínima de -8,5°C. La zona se caracteriza por los frecuentes vientos con valores medios de 20-30 km/h, alcanzando algunos meses los 50 km/h de media de máximas, y valores máximos absolutos en ocasiones de más de 100 km/h.

La península se halla cubierta en su mayor parte por la nieve entre los meses de marzo/abril y diciembre/enero. En el proceso de formación y fusión del manto de nieve, además de la temperatura, juega un papel decisivo el régimen e intensidad de los vientos. En una de las cuencas hidrográficas de la Península Byers (lago Limnopolar) se ha estudiado cómo en función de la topografía del relieve, la acción de los vientos determina la distribución de la nieve sobre el terreno, así como su espesor (Fassnacht *et al.* 2013). Esta distribución en



Figura 3. Mapa topográfico del SGE (1:25.000) de la Península Byers, con la localización del Campamento Internacional de Byers, la estación meteorológica y las principales zonas donde se han llevado a cabo los estudios limnológicos: 1. Lago Limnopolar; 2. Lago Chester; 3. Lago Escondido; 4. Lago Cerro Negro; 5. Lago Domo; 6. Arroyo Petreles; 7. Cascada arroyo Turbio.

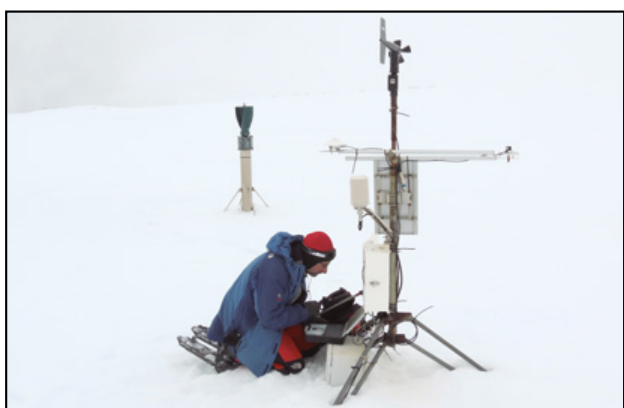


Figura 4. Recogida anual de los datos registrados en la estación meteorológica automática de la Península Byers, en las cercanías del lago Limnopolar.

las cuencas determina a su vez la localización de algunos hábitats dependientes del aporte y de la duración del agua de fusión del manto de nieve en la época estival, prolongando o reduciendo también el proceso de fusión de la capa activa del permafrost debido al efecto aislante del manto de nieve,

cuyas propiedades como el espesor, conductividad, densidad, contenido de agua y concentración de sales y nutrientes, se han estudiado en el marco de un estudio hidroquímico en dicha cuenca (figura 5).

La zona central de la península la constituye un altiplano de relieve ondulado y una altitud media de 105 m, en la que destacan algunos picos o antiguos nunataks, siendo la altitud más elevada de la península el Cerro Star (265 m), situado al NW. Esta meseta central desciende bruscamente en casi todo su perímetro a la zona de las playas de la península, al norte, oeste y sur de la misma, salpicada en su margen de pequeños barrancos que drenan esta zona central, y estando delimitada en su zona este por el domo glaciar de Rotch, extremo occidental del casquete de hielo que cubre la isla Livingston. La geología está dominada por rocas de origen volcánico, de composición mayoritariamente basáltica, o sedimentario, muy alteradas por procesos periglaciares y meteorización física (López- Martínez *et al.* 1996a y b). En gran parte de la península existe una capa activa de suelo sobre permafrost, que favorece la circulación superficial o subsuperficial del agua de fusión durante el verano (Serrano *et al.* 1996), condicionando el régimen



Figura 5. Estudio hidroquímico del manto de nieve en la cuenca del lago Limnopolar (Península Byers).

de caudales de la red hidrográfica de arroyos o la alimentación de charcas y lagunas.

La vegetación terrestre es escasa, constituida básicamente por líquenes y musgos, y se localiza mayoritariamente en las terrazas marinas, zonas con mayor humedad o depresiones del terreno encharcadas. Sin embargo, esta península representa una de las áreas con mayor diversidad florística natural de la Antártida, destacando la presencia de las dos especies de plantas nativas vasculares antárticas más características: *Deschampsia antarctica* Desv. y *Colobanthus quitensis* (Kunt) Bartl.

La retirada de los hielos glaciares de la meseta central en el pasado, dejó al descubierto numerosas depresiones y una compleja red de drenaje, en ocasiones poco definida o con carácter endorreico, donde se formó un elevado número de lagos, lagunas o zonas húmedas, de carácter temporal o permanente (figura 6). Constituye el área de mayor importancia limnológica de las Shetland del Sur y, probablemente, de toda la región de la Península Antártica (Toro *et al.* 2007). La formación de esta red de ecosistemas acuáticos comenzó durante el Holoceno inferior, de acuerdo con la datación efectuada en los sedimentos más antiguos de varios lagos localizados en el sector más occidental y alejado del límite actual del casquete de hielo (Björck *et al.* 1996; Toro *et al.* 2013).

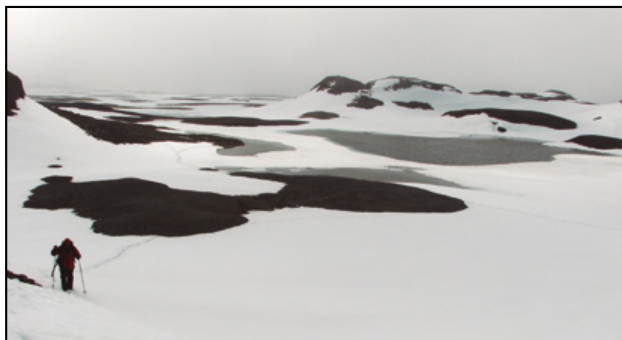


Figura 6. Lagos de la meseta central de la Península Byers (isla Livingston, Antártida) comenzando la fusión de su cubierta de hielo a comienzos del verano austral.

Otros aspectos ecológicos de gran valor de esta zona, motivo de su declaración como ASPA, son la presencia de varias zonas de reproducción de especies faunísticas de gran interés (elefantes marinos del Sur, lobos marinos antárticos, pingüinos Papua y Barbijo, charrán antártico, petreles gigantes del Sur, etc.), una elevada diversidad de musgos y líquenes, y notables aspectos geológicos, paleontológicos y arqueológicos.

4. DIVERSIDAD DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS DE LA PENÍNSULA DE BYERS

Los ecosistemas acuáticos de la Península Byers comprenden más de 100 lagos y charcas, zonas húmedas y numerosos arroyos, que albergan una excepcional biodiversidad de fauna y flora, con la presencia simultánea de gran parte de las especies más singulares, endémicas y representativas de la Antártida (Toro *et al.* 2007). Su estado prístino de conservación le confiere el carácter de sitio de referencia y lugar de estudio y seguimiento de cambios ambientales a escala tanto regional como global.

Los lagos y charcas, de tamaño variable, cubren una superficie total del 1,5 % de la península, y se distribuyen entre una compleja red de drenaje superficial de arroyos, con límites en ocasiones difusos de sus respectivas cuencas (López-Martínez *et al.* 1996a, b). El mapa de la Figura 3 muestra la elevada densidad de lagos y cursos de agua que cubren la Península Byers. Los lagos más profundos se ubican en la meseta central, siendo el más profundo Midge Lake, con 10 m aproximadamente de profundidad máxima, estando los más someros en la zona litoral de las terrazas de las playas del sur y oeste de la península. El lago Limnopolar (figura 7), con 5,5 m de profundidad máxima, situado en la zona occidental de la meseta central, ha sido foco de atención especial en los diversos proyectos llevados a cabo en la Península por mostrar caracteres ecológicos representativos de la mayoría de los lagos de la zona. Es el lago con la mayor cuenca hidrográfica de la península (0,58 km²), lo que ha permitido estudiar con mayor resolución numerosos procesos limnológicos y ambientales, así como la evolución climática reciente al estar magnificados estos procesos respecto a otros lagos con cuencas más reducidas (Fassnacht *et al.* 2013; López-Bueno *et al.* 2009; Martínez-Cortizas *et al.* 2014; Rochera *et al.* 2010; Toro *et al.* 2013).

Los caudales de los cursos de agua son muy variables, estando sometidos a una marcada temporalidad, bien por el corto estiaje que se produce al finalizar el periodo de fusión del manto de nieve en el verano, o bien por congelarse totalmente el agua circulante durante los fríos meses invernales. En ocasiones, el agua discurre de forma subsuperficial a lo largo de la capa activa localizada en las zonas con permafrost, fundiéndose anualmente en una profundidad que varía entre 50 y 90 cm. Los arroyos en la meseta central son de curso divagante o irregular, con reducidos caudales, adquiriendo una mayor entidad al unirse en las torrenteras o pequeños cañones o gargantas con fuerte pendiente que drenan la meseta hacia las playas del norte, oeste y sur



Figura 7. El lago Limnopolar y su cuenca es el más estudiado de la Península Byers, y probablemente de toda la Península Antártica, por su singularidad y representatividad de los ecosistemas acuáticos de la Antártida marítima.



Figura 8. Medición de variables físico-químicas (a), hidrológicas (b) y toma de muestras biológicas (c) en el arroyo Petreles (Isla Livingston, Antártida) durante el verano austral.

de la península. Una vez en las playas, los cursos de agua vuelven a adquirir una trayectoria más divagante o ramificada, alimentando algunas lagunas litorales o zonas encharcadas. Uno de los arroyos que desembocan en South Beaches, el arroyo Petreles, situado en las inmediaciones del campamento Byers, ha sido objeto de algunos estudios limnológicos por su carácter representativo de este tipo de hábitats en la Península Byers (figura 8) (Toro *et al.* 2007; Pla-Rabés *et al.* 2013).

En numerosas depresiones del terreno o márgenes de cursos de agua, se localizan pequeñas charcas o zonas húmedas donde se desarrollan unas de las comunidades biológicas de mayor interés ecológico: los tapetes microbianos, que albergan una interesantísima comunidad de cianobacterias, algas e invertebrados (figura 9) (Fernández-Valiente *et al.* 2007; Rochera *et al.* 2013a).

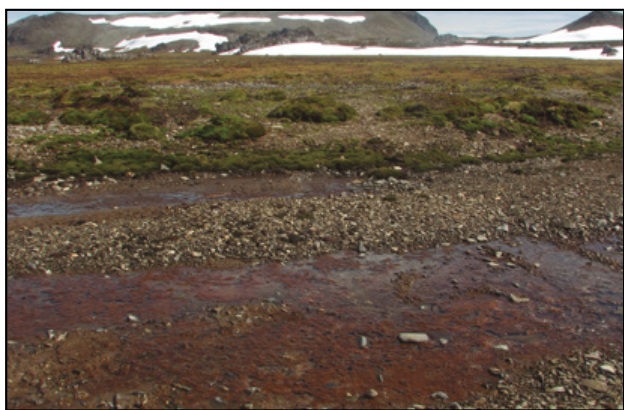


Figura 9. Tapetes microbianos desarrollados en las márgenes del arroyo Petreles, cerca del Campamento Internacional de la Península Byers.

El registro sedimentario de los lagos de la Península Byers constituye uno de los archivos más completo y extenso de la región de la Península Antártica para el estudio paleoecológico y climático de la historia del Holoceno. De las decenas de lagos existentes en este enclave, únicamente se ha obtenido el registro sedimentario completo en cinco de ellos (Oliva *et al.* enviado), estando en curso aún gran parte del análisis y descifrado de la información contenida en ellos. La gran diversidad y heterogeneidad de los ecosistemas lacustres de la península, ofrece una gran oportunidad para el estudio y reconstrucción de las diferentes respuestas ecológicas de estos sistemas a los cambios ambientales

o climáticos acaecidos en el pasado. La búsqueda de señales y respuestas comunes en todos ellos y su comparación con los indicadores hallados en los registros sedimentarios lacustres o marinos de otras localidades o islas cercanas, resultará esencial para la reconstrucción de los cambios a escalas regionales o globales.

5. SINGULARIDAD DE LOS FACTORES ABIÓTICOS

La singularidad de los factores abióticos que caracterizan a los sistemas acuáticos en la región de la Antártida marítima, sólo es equiparable a otros ambientes similares situados en latitudes equivalentes en la región del Ártico. Sin embargo, aspectos geográficos como la magnitud de los océanos que rodean totalmente a la Antártida, o la cobertura de más del 99% de su superficie por los hielos, generan unas condiciones ambientales únicas no existentes en otras zonas del planeta. En las escasas zonas de la Antártida marítima no cubiertas por los hielos permanentes, las características y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos están marcados muy estrechamente por la variabilidad climática estacional e interanual, determinando la evolución de los factores abióticos en las cuencas donde se localizan.

La Península Byers ofrece uno de los más diversos paisajes del agua de la región antártica. El mapa topográfico de la Figura 3 refleja esta realidad, en el que la extensa red de cursos y masas de agua marcan la principal característica geográfica y paisajística de la zona. Hay tres grandes subcuencas o sistemas hidrográficos en la Península, con una red hidrográfica de arroyos que descargan hacia el sur en South Beaches, al norte en Robbery Beaches y al oeste en President Beaches. La hidrología de estas cuencas está marcada por un régimen pluvionival, con caudales máximos a comienzos y mediados del verano cuando se produce el deshielo del manto nival de la Península, disminuyendo progresivamente hasta hacerse prácticamente nulos al inicio del invierno, en el que prácticamente todo el agua superficial se encuentra en estado sólido durante gran parte de los meses invernales (Toro *et al.* 2007). En la reducida época en que se hallan libres de hielo y nieve, los arroyos son generalmente someros (5–20 cm de profundidad media) en la meseta central, alcanzando hasta 50 cm en los cursos que atraviesan las playas. El régimen hidrológico del arroyo Petreles (figura 8), representativo de gran parte de los cursos de agua de la península, muestra caudales

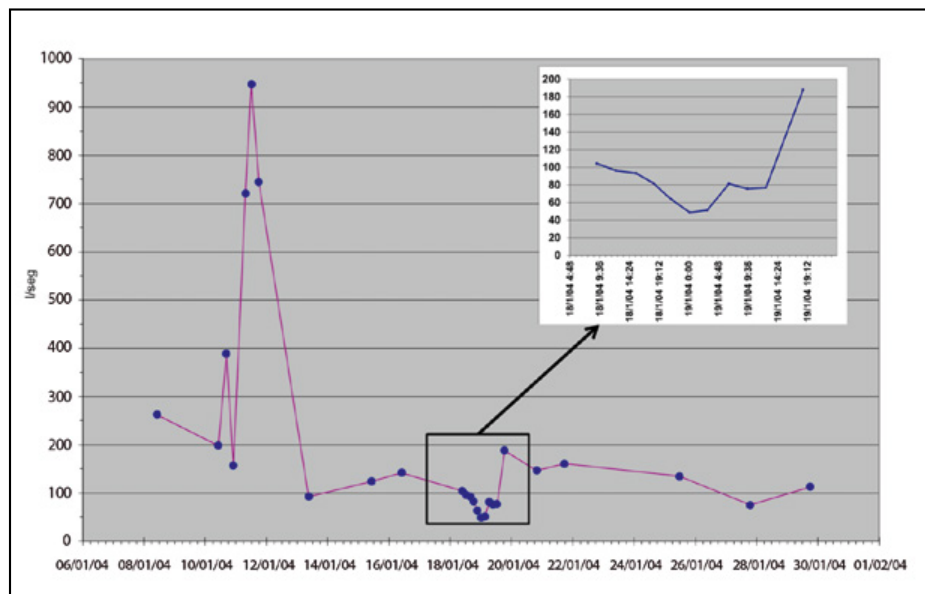


Figura 10. Evolución del caudal del arroyo Petreles (Isla Livingston, Antártida) a lo largo de un mes en el verano austral. Se observa el máximo de caudal que se produce durante varios días con mayor fusión del manto nival en la cuenca, así como las fluctuaciones diarias del hidrograma producidas como consecuencia de la radiación solar y los consecuentes cambios diarios de la temperatura ambiente registrados durante un ciclo de 36 horas.

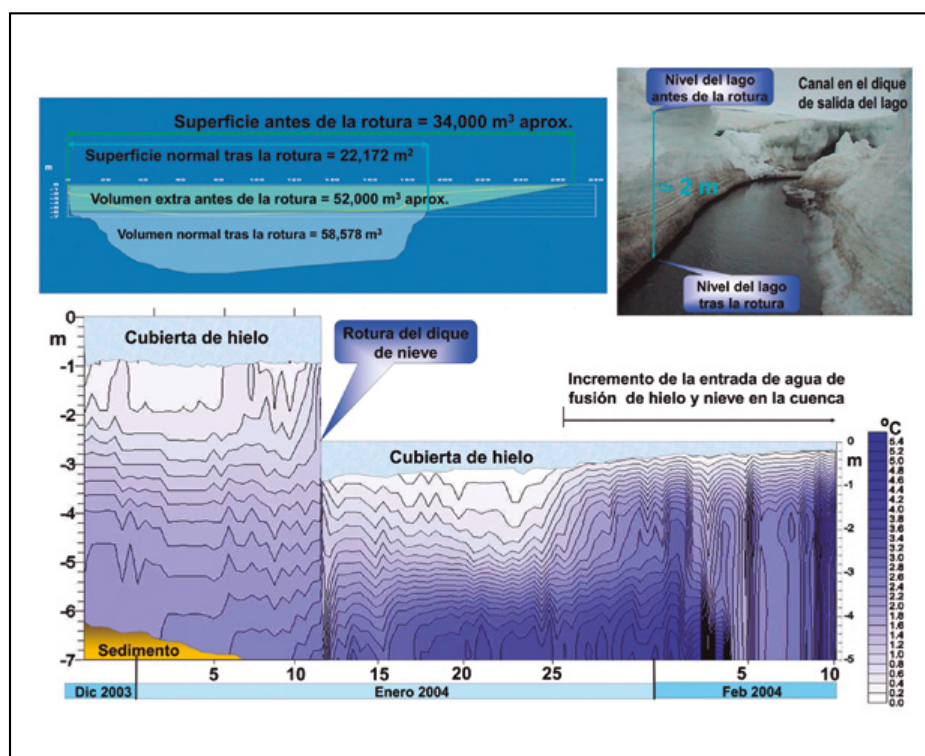


Figura 11. Esquema del proceso de rotura del dique de nieve en el desagüe del lago Limnopolar y efectos en las dimensiones y en la estructura térmica de la columna de agua del lago.

estivales medios que fluctúan entre 0,003 y 0,94 m³/s, y velocidades medias entre 0,26 y 2,33 m/s en la zona cercana a su desembocadura en South Beaches (figura 10) (Pla-Rabés *et al.* 2013). En los días en los que se produce la mayor fusión del manto nival, se han registrado caudales en algunos de estos arroyos con valores superiores a 2,3 m³/s.

Los lagos y charcas muestran una gran diversidad física, especialmente en sus aspectos hidrológicos, muy relacionados con la morfometría de sus cubetas y cuencas. La mayoría de ellos permanecen cubiertos de hielo durante al

menos 8 o 9 meses, pudiendo durar la cubierta en años más fríos y con mayor precipitación de nieve hasta 10 meses. Midge Lake es el lago permanente más profundo y grande de la Península Byers, con una profundidad máxima en torno a 10 m y una superficie de 5 ha. El lago situado a mayor altitud es Cerro Negro (100 m), ubicado en una depresión de la zona superior del nunatak del mismo nombre, y cuyo desagüe se produce por una cascada de más de 50 m en su pared Sur sobre la playa de South Beaches. En el grupo de los más grandes y profundos, además de Midge

Lake, destacan el Limnopolar (5,5 m y 0,022 km²), el Chester Cone (5,5 m y 0,037 km²) o el Escondido (5,3 m y 0,016 km²). En las playas del Sur y Oeste se encuentran otros lagos de superficie similar (Maderos, Refugio, Diablo y Limícolas), pero con profundidades máximas inferiores a 50 cm.

En algunos lagos como el Limnopolar o el Turbio se forma durante el invierno un dique por acumulación de nieve en el desagüe, actuando como una presa durante el deshielo, almacenando un volumen extra de agua de fusión y duplicando su volumen normal. Al avanzar el deshielo, se produce la rotura brusca del dique, vaciándose drásticamente en apenas unas horas el volumen extra almacenado, con consecuencias en los procesos físicos, químicos y biológicos del lago (figura 11). La formación de estos eventos, actualmente con una periodicidad generalmente anual, pero probablemente muy dependientes de la evolución climática (precipitación de nieve y temperaturas estivales), provocan una gran descarga de agua en sus arroyos de salida, contribuyendo a una mayor erosión y encajonamiento de estos al descender por los barrancos del borde de la meseta hacia las playas. Es en estas gargantas encajadas y de fuerte pendiente donde se localizan en ocasiones pequeñas cascadas, constituyendo unos hábitats con gran energía hídrica, muy raros o escasos en el entorno antártico (Rochera *et al.* 2013b). Algunos lagos muestran un carácter temporal sin una periodicidad claramente establecida, bien por perder toda su masa de agua por drenaje o filtración a finales del verano (ej. lago Las Palmas, con una profundidad máxima de 2,2 m) o bien porque sólo se forman muy ocasionalmente algunos años en pequeños valles al originarse un dique excepcional de nieve en la salida de los mismos, y reteniendo el agua durante apenas unas semanas (ej. lago Triangular, con > 2,0 m de profundidad máxima).

En su mayoría, y debido a su reducida profundidad máxima, los lagos de Byers son fríos monomícticos, con un periodo de estratificación inversa de la columna de agua bajo la cubierta de hielo invernal (figura 11), y un único periodo de mezcla durante el escaso periodo estival sin cubierta de hielo, en el que los fuertes y frecuentes vientos de la zona favorecen la mezcla continua de su columna de agua. En los lagos más profundos, la temperatura máxima estival en superficie no supera los 5-6°C, alcanzando hasta los 9-10°C en los más someros y cercanos a la costa. En años con una duración mayor de la cubierta de hielo (9-10 meses), en los lagos más profundos (> 5 m) puede producirse un agotamiento del oxígeno disuelto en las capas profundas cercanas al sedimento, afectando al balance producción/respiración de las comunidades de musgos acuáticos que viven en el lecho del lago.

La mineralización de las aguas de la Península Byers es generalmente baja, con valores de conductividad que oscilan entre 30 y 50 µS/cm para los lagos más alejados de la costa, entre 50 y 100 µS/cm para los situados en la zona central y borde de la meseta, y entre 100 y 200 µS/cm para los situados en la costa (Toro *et al.* 2007). Los cursos de agua, generalmente muestran valores entre 50 y 100 µS/cm. Los lagos costeros muestran un predominio más evidente de los iones Cl⁻ y Na⁺ por su proximidad al mar. Las aguas corrientes de la península presentan una composición iónica muy variada, con una mayor concentración en Ca²⁺ respecto al Na⁺ en los arroyos de la meseta central, pero encontrándose cursos de agua con predominio de

los aniones Cl⁻, HCO₃⁻ o incluso SO₄²⁻. (Berry Lyons *et al.* 2013). El pH de las aguas es circumneutro o ligeramente alcalino, aunque se han localizado dos excepciones: el arroyo Rotch, en el extremo este de South Beaches, cerca del domo glaciar de Rotch, con valores habituales de pH superiores a 9,0, y el lago Marte, al norte de Cerro Negro, con valores de pH en torno a 3,0-3,5. La diversidad geológica de la península, con materiales de naturaleza volcánica, y la existencia de surgencias de agua en algunas de estas zonas, podrían explicar estos valores anormales encontrados.

Los lagos de la Península Byers tienen carácter oligotrófico o ultraoligotrófico, exceptuando algunos que se localizan en las cercanías de colonias de aves marinas o elefantes marinos. Es el caso de los lagos Maderos y Refugio, en las playas del oeste y sur respectivamente, que muestran un carácter cercano a la hipereutrofia en la época estival. En la zona de South Beaches se localiza una de las colonias de cría más importantes de elefantes marinos de la Península Antártica (Gil-Delgado *et al.* 2013), lo que ocasiona un aporte extraordinario de nutrientes (compuestos de P y N) a los lagos, charcas y arroyos costeros, alcanzándose valores de producción primaria en términos de clorofila *a* de hasta 40 µg/l (lago Refugio en South Beaches). La concentración de Chl *a* en los lagos es generalmente inferior a 1 µg/l, y los valores de NH₃ oscilan entre 0,1 y 2,0 µM en arroyos y lagos, los de NO₃ entre 0,3 y 1 µM y los de PO₄ no suelen superar los 2 µM, mostrando valores mínimos (<0,1 µM) en los lagos de la meseta.

6. LAS COMUNIDADES BIOLÓGICAS DEL MEDIO ACUÁTICO

Los ecosistemas acuáticos no marinos de la Antártida muestran una reducida biodiversidad en comparación con ríos, lagos o humedales de otras latitudes, estando en la mayoría de los casos dominados por comunidades microbianas. Gran parte de la biomasa de la fracción planctónica de los lagos la constituye el bacterioplancton, con abundancias medias en un rango de 0,5-6,5 x 10⁶ células /ml. El nanoplancton está dominado por un reducido número de especies flageladas y ciliados. El fitoplancton, con un carácter necto-bentónico debido al pequeño volumen y profundidad de las masas de agua y su alta tasa de renovación, está constituido principalmente por especies de diatomeas, crisófitas, picocianobacterias y clorófitas. La estructura de las comunidades varía entre los lagos principalmente en función de la concentración de nutrientes, determinante de su estado trófico, así como de la morfología de sus cubetas (Rochera *et al.* 2013c). Las comunidades bentónicas de los lagos están formadas por biofilms o tapetes de cianobacterias y diatomeas, con la presencia en el fondo de los lagos más profundos (> 5 m) de un tapete denso de musgos (*Drepanocladus longifolius*), en el que vive una de las dos únicas especies de insectos acuáticos antárticos (el díptero *Parochlus steinenii*), o el oligoqueto *Lumbricillus sp.*, ambos también presentes en el lecho de algunos arroyos que cruzan las playas del Sur. El organismo de mayor tamaño que vive en los lagos, y en las aguas dulces de toda la Antártida, es el crustáceo *Branchinecta gainii* (1-2 cm), acompañado del copépodo *Boeckella poppei*, estando los dos en la cúspide de la cadena trófica de estos sistemas acuáticos (figura 12). Los rotíferos son escasos en estas aguas antárticas así como otras especies de crustáceos, destacando la presencia



Figura 12. Imagen subacuática del fondo del lago Chester, donde pueden observarse numerosos individuos del crustáceo *Branchinecta gainii*, el animal de agua dulce más grande de la Antártida, nadando sobre la una cubierta poco densa del musgo *Drepanocladus longifolius*.

de una de las pocas especies de cladóceros antárticos, *Macrothrix ciliata*, citado en el lago Limnopolar por primera vez en la Antártida (Toro *et al.* 2007).

En las zonas más húmedas, charcas o márgenes de lagunas o cursos de agua, existen comunidades de tapetes microbianos formados por una matriz de cianobacterias filamentosas (figura 9), acompañada de varias especies de diatomeas, alojando una comunidad de invertebrados característica formada por protozoos, nematodos, ciliados, tardígrados, o incluso larvas de quironómidos (Fernández-Valiente *et al.* 2007; Toro *et al.* 2007; Rochera *et al.* 2013a, 2013b). En estos ecosistemas acuáticos se dan cita en ocasiones, de forma única y excepcional, las dos únicas especies de insectos dípteros de la Antártida: *Parochlus steinenii* y *Belgica antártica*, esta última de distribución exclusiva y muy escasa en la Antártida. También existen en las zonas más húmedas extensas alfombras de diferentes especies de musgos, frecuentados por *Belgica antártica* en la zona este de South Beaches, además de una rica y diversa comunidad de otros invertebrados como los nematodos, grupo que tiene en esta península un *hotspot* de biodiversidad (Nielsen *et al.* 2011).

De gran interés igualmente, los biofilms de diatomeas constituyen una de las comunidades biológicas acuáticas de agua dulce más representativas de la Antártida, muy

característicos en el lecho y márgenes de los cursos de agua, estando constituidos estructuralmente por diatomeas y cianobacterias de tipo filamentosas (Pla-Rabes *et al.* 2013). Se han estudiado las comunidades de diatomeas epilíticas que se desarrollan en el lecho de algunos cursos de agua de la Península Byers, como el arroyo Petreles (figura 8), en donde se ha comprobado que las variables y procesos físicos (hidrología e hidráulica, erosión/deposición y tipo de sustrato) determinan la variabilidad y la evolución espacial y temporal de la composición y estructura de la comunidad de diatomeas a microescala (figura 13) (Pla-Rabes *et al.* 2013). Algunas de estas comunidades de biofilms de diatomeas muestran en determinadas situaciones, cuando los cauces alcanzan una mayor estabilidad física (disminución de los fuertes caudales del deshielo), una elevada diversidad y un gran número de especies de carácter endémico. En un contexto antártico, representan por tanto un hábitat de gran importancia para la conservación de la diversidad de diatomeas, y su estudio proporciona un interesante y valioso conocimiento sobre las preferencias ecológicas de las especies antárticas. En los ecosistemas acuáticos de la Península de Byers se han identificado más de 140 taxones de diatomeas, de los cuales, el 55% tienen una distribución exclusivamente antártica (Kopalova y Van der Vijver, 2013),

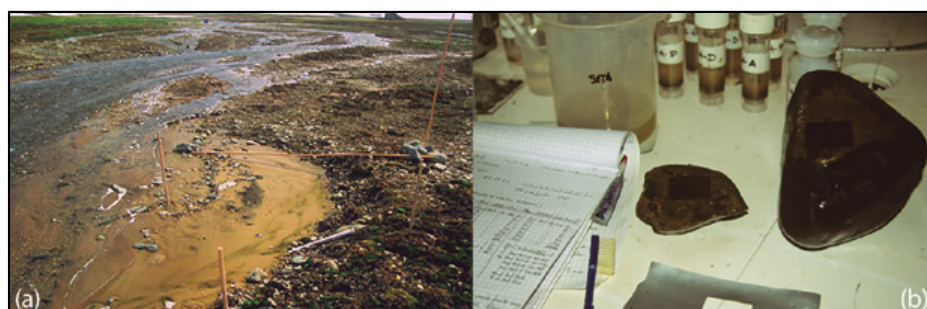


Figura 13. Zona de estudio (a) y toma de muestras de biofilms (b) en el sustrato del arroyo Petreles, cerca del Campamento Byers, para el estudio de la comunidad de diatomeas y su endemismo en relación con las variables ambientales y su evolución temporal y espacial.



Figura 14. Lago Turbio (a) tras el descenso brusco del nivel por rotura del dique de nieve. Tunel de desagüe a través del dique de nieve ya roto (b), y garganta que drena el lago hacia South Beaches (c). En estas zonas de fuertes pendientes se localizan algunas pequeñas cascadas donde se desarrollan biofilms muy específicos formados por cianobacterias, diatomeas y otras algas.

representando este grupo biológico una de las mejores herramientas en los estudios paleoclimáticos del sedimento de los lagos, al ser las diatomeas unos excelentes indicadores por su amplio espectro de preferencias ecológicas para la reconstrucción de cambios ambientales acaecidos en el pasado.

Especialmente singulares y raros en el entorno antártico, también se encuentran en la Península de Byers un tipo de biofilms que colonizan las cascadas que existen en las gargantas que drenan la meseta central hacia South Beaches, distinguiéndose más de 5 tipos diferentes en función del microhábitat ocupado, definido por variables de caudal, disponibilidad de nutrientes o humedad, y formados por diferentes comunidades de algas clorófitas, cianobacterias y diatomeas, cuya proporción de pigmentos les confieren distintas tonalidades de color (verde, negro, naranja o blancos) (Rochera *et al.* 2013b). Entre los 5 tipos de biofilms, la diversidad de especies alcanza hasta 4 especies diferentes de cianobacterias, 37 especies de diatomeas, un alga verde típica los medios lóticos antárticos (*Ulothrix* sp.) y una crisofícea. Son hábitats de actividad biológica relativamente efímera, entre 1 y 2 meses, ya que a comienzos del verano, durante el máximo deshielo o con la ruptura de los diques de algunos lagos, estas gargantas están sometidas a un fuerte estrés producido por un incremento brusco del caudal con una carga de sedimentos en suspensión muy abrasiva que impide el desarrollo de comunidades epilíticas (figura 14). Es sólo una vez disminuido este máximo de caudal, cuando comienza la colonización y desarrollo de los biofilms, cuya actividad se extiende hasta el inmediato comienzo del invierno con la congelación o reducción al mínimo de las aguas superficiales. Es de esperar que en un contexto de calentamiento climático, este tipo de



Figura 15. En South Beaches, al sur de la Península Byers, se localizan varias lagunas litorales (a) que reciben un aporte extraordinario de nutrientes procedente de la colonia de elefantes marinos ubicada en sus inmediaciones (b), animales a los que es frecuente verlos nadar en las aguas de estas lagunas.

hábitats sean cada vez más frecuentes en zonas o cuencas donde se incremente la fusión de los hielos (Quayle *et al.* 2002, Vaughan *et al.* 2003).

7. INTERACCIONES TRÓFICAS Y PROCESOS ECOLÓGICOS

Los lagos antárticos son ecosistemas sometidos a condiciones extremas muy cambiantes, provocando un fuerte control físico de las comunidades y procesos biológicos que en ellos se desarrollan. Sin embargo, los estudios llevados a cabo en los ecosistemas acuáticos de la Península Byers, muestran en la mayoría de estos sistemas un cierto acoplamiento y control biológico de la comunidad y de la cadena trófica microbiana (Rochera *et al.* 2011).

Las comunidades microbianas que dominan los ecosistemas lacustres de la Antártida, están constituidas por virus, bacterias, protistas y algunas especies de zooplankton. La estructura de estas comunidades y sus relaciones tróficas dependen de factores como la morfología de la cubeta lacustre, los aportes de nutrientes de fuentes externas o de la cuenca, la edad del lago o la distancia al mar. En los lagos de la Península de Byers se ha podido describir un marcado gradiente de productividad entre los lagos localizados en la zona de la meseta central y las lagunas costeras, más cercanas al mar (Rochera *et al.* 2013c). Estas últimas, además de recibir los aportes de los aerosoles marinos, están sometidas a una entrada excepcional de nutrientes de fuentes puntuales, como son las colonias de cría de aves marinas y elefantes marinos (figura 15), generando un proceso de eutrofización natural en algunos casos, y en las que su morfometría, con cubetas muy someras, contribuye a ese grado trófico favoreciendo el desarrollo de una mayor carga interna de nutrientes. Este estado trófico, tanto en los lagos oligotróficos o ultraoligotróficos de la meseta, como en



Figura 16. Experimentos (a) y procesamiento de muestras (b y c) en el igloo laboratorio del Campamento Byers para el estudio de la comunidad viral y de la producción bentónica de los lagos, y su posible respuesta a los cambios ambientales.

los eutróficos de la costa, es decisivo en la estructuración de las comunidades microbianas (Rochera *et al.* 2013c). Las algas clorófitas parecen dominar en los lagos más cercanos a la eutrofia, mientras que las especies del picoplancton autotrófico predominan en los lagos más oligotróficos, con menores aportes alóctonos al lago.

Aunque en general es más frecuente que se produzca una regulación “bottom-up” condicionada por la disponibilidad de nutrientes, en ocasiones en algunos de estos lagos puede existir un cierto control “top-down” de la comunidad cuando se cuenta con la presencia de las especies predadoras del macrozooplancton *Boeckella poppei* o *Branchinecta gainii*. Se ha observado un efecto cascada sobre la cadena trófica microbiana a través de esta depredación sobre la fracción nanoplanctónica, lo que favorecería una mayor producción del picoplancton al reducirse las poblaciones de protozoos que se alimentan de este plancton de menor tamaño, además de favorecer un mayor reciclado de nutrientes a la columna de agua (Rochera *et al.* 2011; Camacho *et al.* 2012).

Por otro lado, el papel de los virus infectando la comunidad bacteriana y provocando su lisis podría tener un papel muy relevante en la estructuración de las comunidades biológicas de estos lagos, habiéndose observado un paralelismo entre la densidad del virioplancton y el nivel trófico de los mismos (Villaescusa *et al.* 2010). El estudio de la estructura genética de la comunidad viral del lago Limnopolar ha revelado una riqueza genética excepcional,

con el mayor número de familias virales encontradas hasta la fecha en cualquier sistema acuático del planeta, y cuya evolución estacional podría estar relacionada con los cambios que se producen en las especies del fitoplancton (López-Bueno *et al.* 2009). Actualmente, se están llevando a cabo estudios de estas comunidades virales y su relación con determinados grupos algales del fitoplancton y del fitobentos, tanto en comunidades vivas actuales como subfósiles en testigos de sedimento, evaluando cómo podría verse afectada esta relación y la evolución futura de estos organismos por efecto de los cambios ambientales (figura 16).

8. PALEORECONSTRUCCIÓN AMBIENTAL: UNA MIRADA AL PASADO PARA PREDECIR EL FUTURO

El estudio de los registros fósiles en los sedimentos lacustres, donde encontramos numerosos “proxies” o indicadores de diversa naturaleza, física, química o biológica, nos permite reconstruir la historia pasada del clima y de los cambios ambientales no sólo en los ecosistemas acuáticos y sus cuencas, sino a escala regional o incluso planetaria, retrocediendo en el tiempo cientos de años, para los que no se disponía de registros instrumentales. La paleolimnología, ciencia que descifra la historia de los lagos y su entorno mediante el estudio de sus sedimentos, unida a los estudios y observaciones actuales de estos ecosistemas, nos permite mediante diferentes herramientas de análisis de la información, elaborar modelos con

una menor incertidumbre para predecir futuros cambios ambientales o los efectos que éstos pueden producir en los ecosistemas a diferentes escalas (Anderson *et al.* 2006).

Uno de los objetivos de los proyectos de investigación llevados a cabo en la Península de Byers ha sido la reconstrucción del clima durante el Holoceno en la región de la Península Antártica mediante el estudio paleolimnológico de los sedimentos lacustres en los numerosos lagos existentes. Retroceder hasta el origen de estos lagos tras la retirada de los hielos hace varios miles de años, está permitiendo además investigar los procesos de colonización por organismos en nuevos hábitats acuáticos situados en ambientes extremos, sometidos a un fuerte estrés físico por las condiciones climáticas de la zona.

La deglaciación en la zona de la Península Antártica desde el Último Máximo Glacial hace aproximadamente 20.000 años (Bentley *et al.* 2006), ha sido especialmente manifiesta desde el Holoceno inferior en la zona de las Shetlands del Sur, donde las temperaturas medias negativas se hallan más cercanas al punto de fusión (Simms *et al.* 2011), y la Península Byers, una de las mayores zonas libres de hielo permanente de esta región, es un claro ejemplo de esta evolución.

En varias campañas llevadas a cabo desde 2003, se ha obtenido el registro sedimentario completo de 5 lagos de la Península Byers (figuras 17 y 18), distribuidos en un gradiente de deglaciación desde la costa oeste hasta el Domo glaciar de Rotch, límite actual de los hielos permanentes al oeste de la isla Livingston. Los modelos cronológicos de los testigos de sedimento se han obtenido mediante técnicas radiométricas con ^{14}C en aquellos lagos o secciones con suficiente concentración de C en el sedimento, con técnicas de análisis de luminiscencia, en el caso de ausencia de materia orgánica o carbono en el sedimento, y de forma indirecta, mediante el estudio del registro de tefras volcánicas (Oliva *et al.* enviado).

El registro sedimentario más largo obtenido es el del lago Limnopolar, con una edad basal estimada y calibrada de 8300 años BP (Toro *et al.* 2013) (figura 19), lo que ha permitido mejorar la estima previa de la deglaciación en esta península,

establecida anteriormente en unos 5700 años (Björck *et al.* 1996). El resto de lagos estudiados (Chester, Escondido, Cerro Negro y Domo), muestran diferentes edades inferiores, en función de su localización en el gradiente de deglaciación. Una descripción detallada de este proceso de deglaciación en la Península de Byers así como sus implicaciones en la dinámica de los procesos geomorfológicos y biológicos serán publicados próximamente (Oliva *et al.* 2014 y enviado).

La isla de Decepción, localizada unos 40 km al sur de la Península de Byers, es un foco activo volcánico desde sus orígenes, constituyendo el principal origen del depósito de tefras (cenizas volcánicas) del Cuaternario en las Shetlands del Sur (Kraus *et al.* 2013). El estudio de los niveles de tefra encontrados en la mayoría de los testigos de sedimento obtenidos en los lagos de la Península Byers (figura 20), ha permitido elaborar una precisa tefroestratigrafía local,

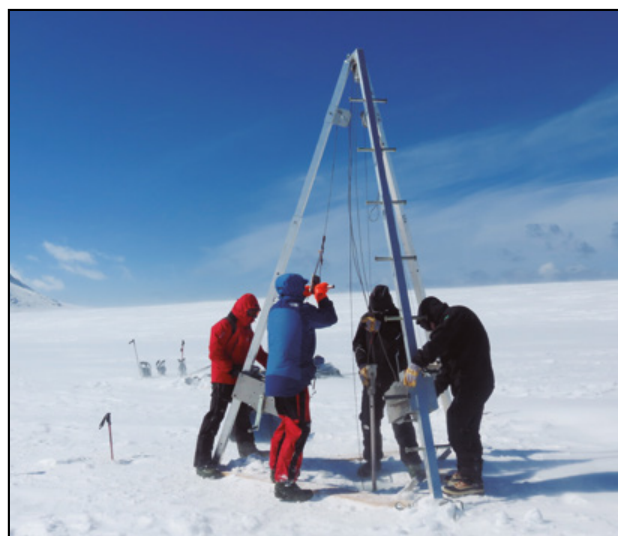


Figura 17. Obtención de testigos de sedimento en un lago cubierto de hielo de la Península Byers utilizando un equipo sondeador de pistón UWITEC del CEDEX.

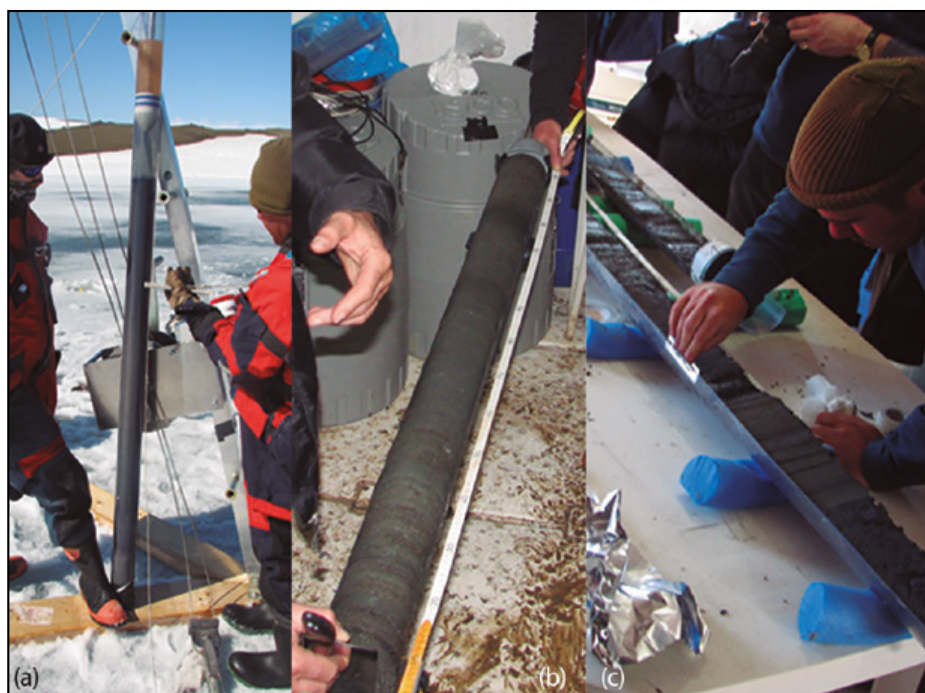


Figura 18. Extracción de un testigo de sedimento del lago Limnopolar (a) y seccionamiento en el igloo laboratorio del Campamento Byers (b y c).

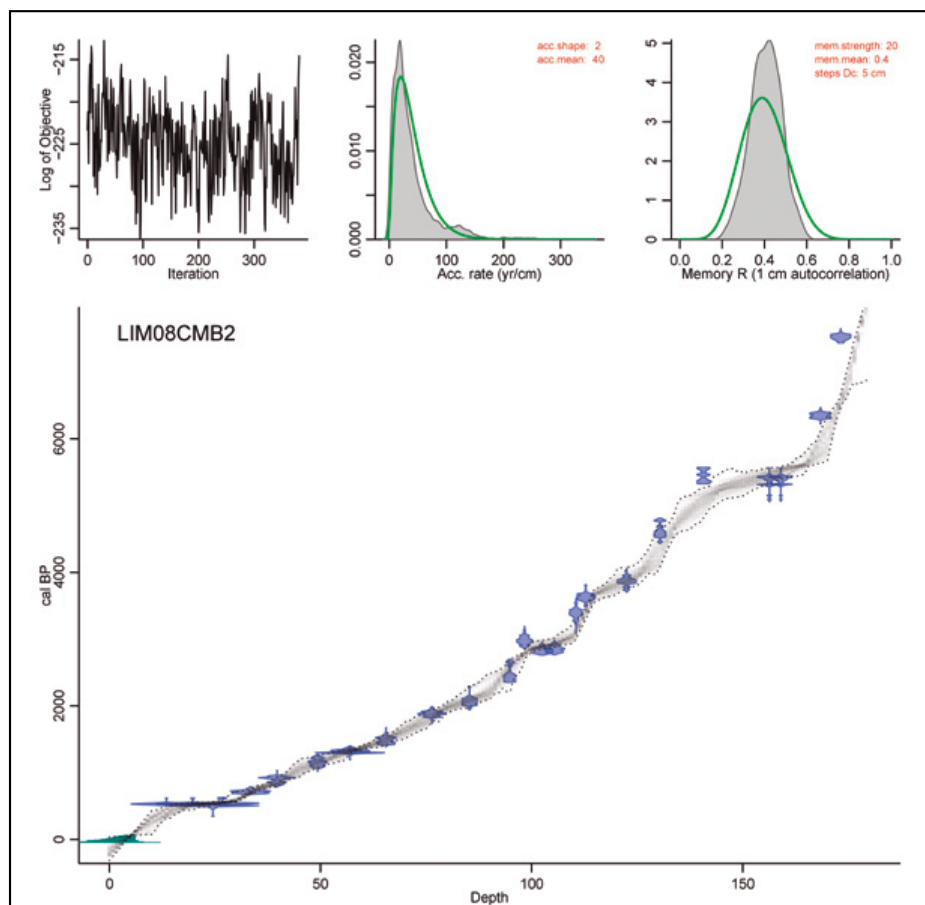


Figura 19. Modelo de edad-profundidad elaborado a partir del análisis AMS de ^{14}C en 25 muestras de sedimento del registro sedimentario completo (2,34 m) del lago Limnopolar (Península Byers). Las marcas azules muestran las distribuciones de probabilidad de las fechas calibradas de ^{14}C , y la zona sombreada los rangos y límites de error de las permutaciones del modelo.

contribuyendo a completar la correspondiente a las Shetlands del Sur (Liu *et al.* 2015).

La presencia en el registro sedimentario de los lagos de Byers de numerosos restos subfósiles de organismos acuáticos, prácticamente desde su formación tras la retirada del hielo glacial, está permitiendo reconstruir en detalle la evolución de los cambios ambientales. Especialmente significativos y prometedores son los análisis que se están llevando a cabo de los restos de diatomeas, quironómidos (*Parochlus steinenii* es la única

especie de díptero que vive en estos lagos) y musgos (*Drepanocladus longifolius*), como indicadores biológicos de numerosas variables y procesos ecológicos que se han sucedido en cada lago y su cuenca desde sus orígenes. Los resultados de estos estudios, unidos al análisis de otros indicadores de tipo geoquímico o mineralógico realizados en los sedimentos de estos lagos (Toro *et al.* 2013; Martínez-Cortizas *et al.* 2014; Liu *et al.* 2015), permitirán completar con detalle el diario de la historia de estos lagos, de sus cuencas y, a mayor escala, del clima de la región antártica.

9. PERSPECTIVAS DE FUTURO EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS DE LA PENÍNSULA DE BYERS

La Península Byers reúne una serie de características que la convierten en un lugar idóneo de referencia internacional para estudios no sólo limnológicos, sino también terrestres o costeros: es una de las mayores áreas libres de hielo de la Antártida marítima en la que se halla la mayor variedad de ambientes y procesos geológicos, hidrológicos o biológicos de toda la región, se encuentra en un estado de conservación prístino, está considerada un “hotspot” antártico en términos de biodiversidad, y se localiza en una zona del planeta donde se está detectando más significativamente el calentamiento global (Quesada *et al.* 2009).

La gran variabilidad interanual registrada en las condiciones meteorológicas y limnológicas en estos

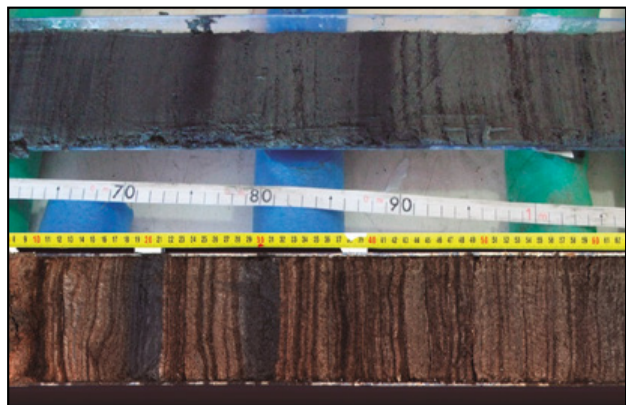


Figura 20. Ejemplo de niveles de tefras (cenizas volcánicas) sincrónicos encontrados en dos diferentes lagos de la Península Byers, Limnopolar (arriba) y Escondido (abajo), y cuyo análisis geoquímico y textural, junto con el registro de otros 3 lagos, ha permitido establecer una tefrocronología detallada para esta región (Liu *et al.* 2015).

ecosistemas acuáticos, refleja la necesidad de establecer programas de seguimiento ecológico a largo plazo que permitan diferenciar las tendencias en las respuestas de estos sistemas a procesos de cambios globales, como el calentamiento reciente, de las variaciones simplemente interanuales que puedan detectarse en estudios que cubran periodos inferiores a 10 años (Rochera *et al.* 2010, Bañón *et al.* 2013). Conjuntamente, las investigaciones paleolimnológicas en los lagos ayudarán a entender mejor la variabilidad y evolución del clima en el pasado en escalas de tiempo mayores que las obtenidas con la instrumentación actual, permitiendo modelizar y predecir con menor incertidumbre la evolución del clima y sus efectos futuros a escala regional y global.

El calentamiento reciente del clima en esta región podría modificar los flujos de energía y de reciclado y producción de nutrientes, así como los procesos bio-geoquímicos en los lagos y otras zonas acuáticas de la Antártida, afectando a las interacciones biológicas y las redes tróficas al extender el periodo productivo estival en el que se fusiona la cubierta de hielo en los lagos y desaparece el manto de nieve y hielo en sus cuencas, lo que intensificaría esas interacciones y la producción de nutrientes tanto en los ecosistemas acuáticos como en las comunidades microbianas de sus cuencas (Camacho *et al.* 2012). Es crucial pues, el estudio de las posibles consecuencias de estos cambios, que podrían incluir no sólo variaciones importantes en la composición biológica, la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, sino otros efectos indeseados como un mayor riesgo de colonización por especies alóctonas o exóticas, con potencial carácter invasor, al moderarse las condiciones extremas propias de estos ambientes polares.

El gran número de proyectos llevados a cabo en la Península de Byers desde la instalación en 2001 del Campamento Internacional de Byers en South Beaches, apoyado y mantenido con la logística de la BAE Juan Carlos I y coordinado por el Programa Polar Español, no sólo ha contribuido a obtener un conocimiento más detallado de los ecosistemas Antárticos localizados en este enclave, sino a abrir nuevos interrogantes y plantear nuevas hipótesis en el campo de la ciencia, cuyo estudio y resultados contribuirán a mejorar la interpretación de los procesos que rigen y gobiernan los ecosistemas Antárticos y, a mayor escala, conocer la evolución del clima y el medio ambiente en nuestro planeta.

Finalmente, hay que destacar el carácter multidisciplinar e internacional que subyace en la organización y desarrollo de estos proyectos, siguiendo la filosofía del Tratado Antártico, lo que garantiza un beneficio mutuo para todos los investigadores e instituciones participantes, así como un mayor logro científico en los resultados obtenidos y, por ende, en el avance del conocimiento antártico.

10. AGRADECIMIENTOS

Las investigaciones llevadas a cabo en la Península Byers en los proyectos mencionados han sido financiadas por las siguientes ayudas del Programa Nacional Español de Investigación: REN2000-0435-ANT, CGL2005-06549-C02-01/02/ANT, POL2006-06635/CGL, CGL2007-29841-E, CSD2007-0067 y CTM2009-07869-E/

ANT, así como por el Programa Polar Portugués de la Fundação para a Ciência e a Tecnologia de Portugal. El apoyo logístico durante la estancia y el transporte marítimo y aéreo en las campañas ha sido proporcionado por la Unidad de Tecnología Marina (UTM) del CSIC mediante los Buques de Investigación Oceanográfica de la Armada Española *Las Palmas* y *Hespérides*, y la Base Antártica Española Juan Carlos I, y por los Programas Antárticos de Brasil, Uruguay y Chile con sus respectivos buques, medios aéreos y logísticos. El personal técnico y científico de las instituciones participantes en estos proyectos también ha apoyado y colaborado de forma valiosa en la preparación de las campañas y en el procesamiento y análisis de numerosas muestras obtenidas.

11. BIBLIOGRAFÍA

Anderson, N.J., Bugmann, H., Dearing, J.A. and Gaillard, M.J. (2006). Linking palaeoenvironmental data and models to understand the past and to predict the future. *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 21, Nº 12, pp. 698-703.

ATCM (Antarctic Treaty Consultative Meeting). (2011). *Management Plan for Antarctic Specially Protected Area No. 126 Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands*. Buenos Aires: ATCM XXXIV Measure 4, 23 pp.

Bañón, M., Justel, A., Velázquez, D. and Quesada, A. (2013). Regional weather survey on Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland, Antarctica. *Antarctic Science*, vol. 25, Nº 2, pp. 146-156.

Bentley, M.J., Fogwill, C.J., Kubik, P.W. and Sugden, D.E. (2006). Geomorphological evidence and cosmogenic Be/Al exposure ages for the Last Glacial Maximum and deglaciation of the Antarctic Peninsula Ice Sheet. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 118, pp. 1149-1159.

Berry Lyons, W., Welch, K.A., Welch, S.A., Camacho, A., Rochera, C., Michaud, L., de Wit, R. and Carey, A.E. (2013). Geochemistry of streams from Byers Peninsula, Livingston Island. *Antarctic Science*, vol. 25, Nº 2, pp. 181-190.

Björck, S., Hjort, C., Ingólfsson, Ó., Zale, R. and Ising, J. (1996). Holocene deglaciation chronology from lake sediments. In: López-Martínez, J., Thomson, M.R.A. *et al.* (Eds.) *Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island*. BAS GEO-MAP Series, Sheet 5-A. Cambridge: British Antarctic Survey, pp. 49-51.

Camacho, A., Rochera, C., Villaescusa, J.A., Velázquez, D., Toro, M., Rico, E. Fernandez-Valiente, E. Justel, A., Bañón, M. and Quesada, A. (2012). Maritime Antarctic lakes as sentinels of climate change. *Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics*, vol. 7, Nº 3, pp. 239-250.

Convey, P., Hopkins, D.W., Roberts, S.J. and Tyler, A.N. (2011). Global southern limit of flowering plants and moss peat accumulation. *Polar Research*, vol. 30, DOI:10.3402/polar.v3430i3400.8929.

Cordero, R.R., Damiani, A., Ferrer, J., Jorquera, J., Tobar, M., Labbe, F., Carrasco, J. and Laroze, D. (2014). UV Irradiance and Albedo at Union Glacier Camp (Antarctica): A Case Study. *PLoS One*, vol. 9, Nº 3, pp. e90705.

Fassnacht, S.R., López-Moreno, J.I., Toro, M. and Hultstrand, D.M. (2013). Mapping snow cover and snow depth across the Lake Limnopolar watershed on Byers Peninsula, Livingston Island, Maritime Antarctica. *Antarctic Science*, vol. 25, Nº 2, pp. 157-166.

Fernández-Valiente, E., Camacho, A., Rochera, C., Rico, E., Vincent, W.F. and Quesada, A. (2007). Community structure and physiological characterization of microbial mats in Byers Peninsula, Livingston Island (South Shetland Islands, Antarctica). *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 59, pp. 377–385.

Gil-Delgado, J.A., Villaescusa, J.A., Diazmacip, M.E., Velázquez, D., Rico, E., Toro, M., Quesada, A. and Camacho, A. (2013). Minimum population size estimates demonstrate an increase in southern elephant seals (*Mirounga leonina*) on Livingston Island, maritime Antarctica. *Polar Biology*, vol. 36, pp. 607–610.

Hall, A. (2004). The Role of Surface Albedo Feedback in Climate. *J. Climate*, vol. 17, pp. 1550–1568.

Kopalova, K. and Van de Vijver, B. (2013). Structure and ecology of freshwater benthic diatom communities from Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands. *Antarctic Science*, vol. 25, No 2, pp.239–253.

Kraus, S., Kurbatov, A. and Yates, M. (2013). Geochemical signatures of tephros from Quaternary Antarctic Peninsula volcanoes. *Andean Geology*, vol. 40, pp. 1–40.

Liu, E.J., Oliva, M., Antoniades, D., Giralt, S., Granados, I., Pla-Rabes, S., Toro, M. and Geyer, A. (2015). Expanding the tephrostratigraphical framework for the South Shetland Islands, Antarctica, by combining compositional and textural tephra characterisation. *Sedimentary Geology*, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.08.002>.

López-Bueno, A., Tamames, J., Velázquez, D., Moya, A., Quesada, A. and Alcamí, A. (2009) High diversity of the viral community from an Antarctic lake. *Science*, vol 326, pp. 858–861.

López-Martínez, J., Serrano, E. and Martínez de Pisón, E. (1996a). Geomorphological features of the drainage system. In: López-Martínez, J., Thomson, M.R.A. and Thomson, J.W. (Eds.) *Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island*. BAS GEOMAP Series, Sheet 5-A. British Antarctic Survey, Cambridge, pp. 15–19.

López-Martínez, J., Hathway, B., Lomas, S., Martínez de Pisón, E. and Arche, A. (1996b) Structural geomorphology and geological setting. In: López-Martínez, J., Thomson, M.R.A. and Thomson, J.W. (Eds.) *Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island*. BAS GEOMAP Series, Sheet 5-A. British Antarctic Survey, Cambridge, pp. 9–14.

Martínez Cortizas, A., Rozas Muñoz, I., Taboada, T., Toro, M., Granados, I., Giralt, S. and Pla-Rabés, S. (2014). Factors controlling the geochemical composition of Limnopolar Lake sediments (Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland Island, Antarctica) during the last ca. 1600 years. *Solid Earth Discussions*, vol. 6, pp. 761–792.

Mulvaney, R., Abram, N.J., Gagan, M.K., Hindmarsh, R.C.A., Arrowsmith, C. Fleet, L., Triest, J., Sime, L.C., Alemaney, O., Foord, S. 2012. Recent Antarctic Peninsula warming relative to Holocene climate and ice-shelf history. *Nature*, vol. 489, pp. 141–144.

Nielsen, U.N., Wall, D.H., Li, G., Toro, M., Adams, B.J. and Virginia, R.A. (2011). Nematode communities of Byers Peninsula, Livingston Island, maritime Antarctica. *Antarctic Science*, vol. 23, No 4, pp. 349–357

Oliva, M., Antoniades, D., Giralt, S., Granados, I., Toro, M., Pla-Rabes, S. and Vieira, G. (2014). Holocene deglaciation of Byers Peninsula (Livingston Island, Maritime Antarctica) inferred from lake records. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 16, pp. 291.

Oliva, M., Antoniades, D., Giralt, S., Granados, I., Pla-Rabes, S., Toro, M., Liu, E.J., Sanjurjo, J. and Vieira, G. (Enviado). The

Holocene deglaciation of the Byers Peninsula (Livingston Island, Antarctica) based on the dating of lake sedimentary records. *Geomorphology*, (enviado).

Pla-Rabes, S., Toro, M., Van De Vijver, B., Rochera, C., Villaescusa, J.A., Camacho, A. and Quesada, A. (2013). Stability and endemism of benthic diatom assemblages from different substrates in a maritime stream on Byers Peninsula, Livingston Island, Antarctica: the role of climate variability. *Antarctic Science*, vol. 25, No 2, pp. 254–269.

Quayle, W.C., Peck, L.S., Peat, H., Ellis-Evans, J.C. and Harrihan, P.R. (2002). Extreme responses to climate change in Antarctic lakes. *Science*, vol. 295, pp.645.

Quesada, A., Camacho, A., Rochera, C. and Velázquez, D. (2009). Byers Peninsula: A reference site for coastal, terrestrial and limnetic ecosystem studies in maritime Antarctica. *Polar Science*, vol. 3, pp. 181–187.

Rochera, C., Justel, A., Fernández-Valiente, E., Bañón, M., Rico, E.,Toro, M., Camacho, A. and Quesada, A. (2010). Interannual meteorological variability and its effects on a lake from maritime Antarctica. *Polar Biology*, vol. 33, pp. 1615–1628.

Rochera, C., Villaescusa, J.A., Diazmacip, M.E., Gil-Delgado, J.A., Toro, M., Rico, E., Velázquez, D., Quesada, A. y Camacho, A. (2011). Interacciones bióticas en lagos Antárticos: Investigaciones derivadas del proyecto LIMNOPOLAR en la Península Byers (Antártida marítima). *Ecosistemas*, vol. 20, No 1, pp. 23–32.

Rochera, C., Villaescusa, J.A., Velázquez, D., Fernández-Valiente, E., Quesada, A. and Camacho, A. (2013a). Vertical structure of bi-layered microbial mats from Byers Peninsula, Maritime Antarctica. *Antarctic Science*, vol. 25, No 2, pp.270–276.

Rochera, C., Fernández-Valiente, E., Van de Vijver, B., Rico, E., Toro, M., Vincent, W.F., Quesada, A. and Camacho, A. (2013b). Community structure and photosynthetic activity of benthic biofilms from a waterfall in the maritime Antarctica. *Polar Biology*, vol.36, No 12, pp. 1709–1722.

Rochera, C., Toro, M., Rico, E., Fernández-Valiente, E., Villaescusa, J.A., Picazo, A., Quesada, A. and Camacho, A. (2013c). Structure of planktonic microbial communities along a trophic gradient in lakes of Byers Peninsula, South Shetlands Islands. *Antarctic Science*, vol. 25, No 2, pp.277–287.

Serrano, E., Martínez de Pisón, E. and López-Martínez, J. (1996). Periglacial and nival landforms and deposits. In: López-Martínez, J., Thomson, M.R.A. and Thomson, J.W. (Eds.) *Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island*. BAS GEOMAP Series, Sheet 5-A. British Antarctic Survey, Cambridge, pp. 28–34.

Simms, A.R., Milliken, K.T., Anderson, J.B. and Wellner, J.S. (2011). The marine record of deglaciation of the South Shetland Islands, Antarctica since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, vol. 30, pp. 1583–1601.

Toro, M., Camacho, A., Rochera, C., Rico, E., Bañón, M., Fernández-Valiente, E. Fernández-

Valiente, Marco, E., Justel, A., Avendaño, M.C., Ariosa, Y., Vincent, W.F. and Quesada, A. (2007). Limnological characteristics of the freshwater ecosystems of Byers Peninsula, Livingston Island, in maritime Antarctica. *Polar Biology*, vol. 30, pp. 635–649.

Toro, M., Granados, I., Pla, S., Giralt, S., Antoniades, D., Galán, L., Martínez Cortizas, A., Lim, H.-S. and Appleby, P.G. (2013). Chronostratigraphy of the sedimentary record of Limnopolar Lake, Byers Peninsula, Livingston Island, Antarctica. *Antarctic Science*, vol. 25, No 2, pp. 198–212.

Turner, J., Colwell, S.R., Marshall, G.J., Lachlan-Cope, T.A., Carleton, A.M., Jones, P.D.,

Lagun, V., Reid, P.A. and Iagovkina, S. (2005). Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.*, vol. 25, pp. 279–294.

Vaughan, D. G., Marshall, G. J., Connolley, W. M., Parkinson, C., Mulvaney, R., Hodgson, D. A., King, J. C., Pudsey, C. J. and Turner, J. (2003). Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Climate Change*, vol. 60, pp. 243–274.

Vaughan, D.G., Comiso, J.C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K. and Zhang, T. (2013). Observations: Cryosphere. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M.,

Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Villaescusa, J.A., Casamayor, E.O., Rochera, C., Velázquez, D., Chicote, A., Quesada, A. and Camacho, A. (2010). A close link between bacterial community composition and environmental heterogeneity in Maritime Antarctic lakes. *International Microbiology*, vol. 13, pp. 67–77.