

Ecología química en el bentos antártico

M. Ballesteros¹, L. Núñez-Pons¹, J. Vázquez¹, F.J. Cristobo², S. Taboada¹, B. Figuerola¹, C. Ávila¹

(1) Departament de Biologia animal (Invertebrats), Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Avda. diagonal, 645, 08028 Barcelona, España.

(2) Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Gijón, Av. Príncipe de Asturias, 70 bis, 33212 Gijón (Asturias), España.

➤ Recibido el 15 de noviembre de 2010, aceptado el 17 de enero de 2011.

Ballesteros, M., Núñez-Pons, L., Vázquez, J., Cristobo, F.J., Taboada, S., Figuerola, B., Ávila, C. (2011). Ecología química en el bentos antártico. *Ecosistemas* 20(1):54-68.

El estudio de las interacciones entre los organismos mediadas por sustancias químicas, lo que se denomina ecología química, nos da información sobre la biología de las especies implicadas, el funcionamiento de la comunidad en que viven y nos puede proporcionar además el conocimiento de nuevas sustancias que pueden ser útiles para el ser humano. En el marco de nuestros estudios sobre la ecología química de los invertebrados antárticos, en el proyecto ECOQUIM (2003-2006) se recolectaron numerosas muestras biológicas a partir de las cuales se obtuvieron extractos y sustancias naturales de invertebrados antárticos. En el proyecto ACTIQUIM (2007-actualidad), se ha evaluado el papel ecológico de estos extractos y sustancias naturales mediante experimentos de ecología química in situ (repelencia, defensa ante distintos tipos de macro y micro-depredadores, toxicidad, citotoxicidad y actividad antifouling) y también se ha analizado la actividad antitumoral de algunos compuestos obtenidos recientemente. Nuestros resultados demuestran, entre otras cuestiones, que las defensas químicas en los organismos antárticos son elevadas en las esponjas, los cnidarios, los tunicados, los briozoos, los equinodermos y los moluscos y que por lo tanto, estos grupos pueden ser una fuente rica en metabolitos secundarios con bioactividad, tanto a nivel ecológico como farmacológico.

Palabras clave: Antártida, organismos bentónicos, productos naturales, química marina, taxonomía

Ballesteros, M., Núñez-Pons, L., Vázquez, J., Cristobo, F.J., Taboada, S., Figuerola, B., Ávila, C. (2011). Chemical ecology in the Antarctic benthos. *Ecosistemas* 20(1):54-68.

The study of the relationships between organisms mediated by chemicals (chemical ecology) can provide valuable information about the biology of the species, their role within the community and our knowledge of new molecules potentially useful to human beings. Within our ECOQUIM Project (2003-2006), we collected many biological samples that allowed us to obtain extracts and bioactive natural products from Antarctic benthic invertebrates. During the ACTIQUIM Project (2007 and on) the ecological activities of the marine natural products obtained have been determined by in situ chemical ecology experiments (repellence, defence, toxicity, cytotoxicity and antifouling). Also, the pharmacological potential has been analyzed by testing the antitumoral activity of selected compounds recently described. Our results show that chemical defences are abundant in Antarctic sponges, cnidarians, echinoderms, bryozoans, tunicates and mollusks, and that these zoological groups can be considered as a rich source of bioactive secondary metabolites of importance both in ecology and in pharmacology.

Key words: Antarctica, benthic organisms, marine chemistry, natural products, taxonomy

Introducción

Los organismos del bentos antártico son extremadamente diversos, en contradicción con las teorías clásicas postuladas antiguamente, y presentan un elevado grado de endemismo que indica las claras condiciones de aislamiento que soporta y ha venido soportando durante siglos el continente antártico (Gallardo, 1987). Los ecosistemas marinos de la Antártida están sometidos a unas condiciones ambientales extremas entre las que destacan la marcada estacionalidad (régimen de luz, aporte de nutrientes orgánicos), temperaturas bajas, los efectos de la congelación del agua de mar en las capas superiores durante el invierno austral, el impacto del hielo, y la acción erosiva del hielo flotante en las comunidades intermareales e infralitorales superiores (Arntz y Gallardo, 1994; Gili et al., 2000; Gutt, 2000). También se ha demostrado la importancia de los patrones anuales e interanuales de las corrientes marinas para explicar la distribución de las principales comunidades, principalmente de invertebrados suspensívoros, que reciben gran parte de su alimento gracias a estos fenómenos.

Las comunidades marinas de las zonas antárticas se han calificado como antiguas y estables, y debido a ello, se considera que las interacciones entre los organismos juegan un papel esencial en la estructura de las mismas (Dayton et al., 1974). El estudio de las interacciones entre los organismos y el medio, y entre organismos a nivel intra e interespecífico mediadas por sustancias químicas (metabolitos secundarios o productos naturales), lo que se denomina ecología química, nos da información sobre la ecología y la biología de las especies implicadas, el funcionamiento y la estructura de la comunidad en que viven y, nos puede proporcionar además nuevas sustancias que pueden ser útiles para el ser humano desde el punto de vista farmacológico (Faulkner, 2000; Avila, 2006; Avila et al., 2005, 2008; Albericio et al., 2009; Blunt et al., 2010; Taboada et al., 2010).

La ecología química marina ha avanzado mucho durante las dos últimas décadas, se han multiplicado las campañas de muestreo, han aparecido nuevos equipos de investigación y han mejorado las técnicas de extracción de metabolitos que han permitido la purificación de nuevas moléculas cada vez con cantidades menores de muestra inicial (Faulkner, 2000; Paul et al., 2006). Ello ha permitido que los organismos marinos estén proporcionando en la actualidad gran cantidad de productos naturales bioactivos, en porcentajes incluso mayores que los obtenidos de organismos terrestres (Newman y Cragg, 2007; Albericio et al., 2009). Estudios recientes demuestran que los organismos bentónicos de la Antártida son una fuente de productos naturales muy rica y variada, de gran interés tanto desde el punto de vista de la ecología química como desde el punto de vista farmacológico (Amsler et al., 2001; Avila, 2006; Avila et al., 2008; Blunt et al., 2010). Recientemente se han estudiado algunas especies antárticas de las zonas de McMurdo Sound y la Península Antártica que habitan aguas someras y que presentan defensas químicas (Baker et al., 1995; McClintock y Baker, 1998), si bien sólo en unos pocos de estos casos se han descrito completamente las sustancias químicas implicadas y/o se ha establecido su función ecológica real en el ecosistema (McClintock et al. 2006; Aumack et al. 2009; Koplovitz et al. 2009; Peters et al. 2009; Núñez-Pons et al. 2010). La defensa contra depredadores es uno de los principales temas a la hora de hablar del papel de los metabolitos secundarios en la interacción entre los diferentes organismos, pero otros aspectos como la competencia por el espacio, quimiotaxis, inhibición de ciclos vitales, citotoxicidad, protección contra rayos UV, efectos antibacterianos o antifouling son también factores a tener en cuenta (Avila et al. 2008; McClintock et al. 2010).

Desde 1998 nuestro equipo de investigación está llevando a cabo estudios con el objetivo de conocer las interrelaciones de los organismos del bentos antártico basadas en metabolitos secundarios y el interés aplicado que pueden tener estas sustancias en el campo de la farmacología o en la biomedicina.

Los proyectos ECOQUIM y ACTIQUIM

Las campañas de muestreo realizadas por nuestro equipo en aguas antárticas se han desarrollado en el marco de los proyectos denominados ECOQUIM y ACTIQUIM. El proyecto ECOQUIM, desarrollado entre los años 2003 y 2006, tenía como objeto estudiar extractos orgánicos y productos naturales bioactivos procedentes de organismos del bentos antártico a nivel ecológico, en lo referente a su localización histológica y su origen (a partir de la dieta, organismos simbioses o biosíntesis/biotransformación), y también a su posible actividad disuasoria contra depredadores simpátricos mediante la realización de tests de repelencia alimentaria. Además pretendía analizar su posible acción antitumoral para usos farmacológicos.

Para cumplir estos objetivos se realizaron dos campañas antárticas de muestreo y experimentación. La primera de ellas tuvo lugar durante el verano austral del 2003-2004 (ECOQUIM-1) a bordo del buque de investigación polar alemán R/V Polarstern del Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (Bremerhaven, Alemania), y fue la campaña ANT XXI/2, desarrollada en la zona oriental del Mar de Weddell e Isla de Bouvet. La segunda campaña se realizó durante el verano austral del 2006 (ECOQUIM-2), y fue desarrollada en parte a bordo del buque de investigación oceanográfica español Bio-Hespérides y en parte en la base científico-militar española B.A.E. Gabriel de Castilla situada en Isla Decepción (**Fig. 1**) (Archipiélago Shetland del Sur, territorio Antártico). En el transcurso de estas campañas se recolectaron mediante diferentes técnicas de muestreo (draga Agassiz, draga de roca, trineo epibentónico, draga Van Veen, box corer y buceo) numerosas muestras de organismos del bentos antártico (más de 1500 muestras), pertenecientes principalmente a los grupos de las esponjas, cnidarios, moluscos, anélidos poliquetos, briozoos, equinodermos, picnogónidos y tunicados. Las muestras destinadas a estudios químicos fueron congeladas inmediatamente a -20°C y una porción representativa de cada una fue además conservada en alcohol de 70° o formol al 4% para estudios taxonómicos posteriores. Se efectuaron además fotografías, antes de su conservación, de la mayoría de las especies de las muestras recolectadas para facilitar su posterior identificación a nivel específico. A partir de las muestras obtenidas durante la campaña con el buque R/V Polarstern pudimos obtener extractos y productos naturales bioactivos. Parte de ellos fueron utilizados en la segunda fase de la campaña del 2006 para realizar, en la base antártica española de Isla Decepción, experimentos de actividad de repelencia alimentaria contra la estrella de mar *Odontaster validus*.

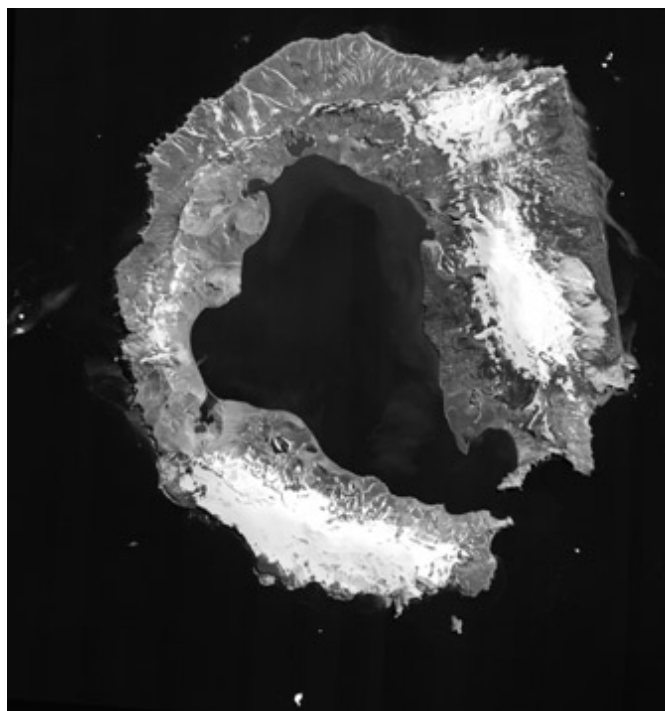


Foto 1. Ortofoto de la isla Decepción (autorización para la publicación del Dr. M. Berrocso, Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz).

Los proyectos ACTIQUIM-I y ACTIQUIM-II, este último vigente en la actualidad, tienen como finalidad principal determinar la actividad ecológica de productos naturales marinos obtenidos de organismos bentónicos antárticos mediante experimentos de ecología química realizados in situ. Hasta ahora nuestros experimentos se habían limitado a investigar la repelencia y defensa ante macrodepredadores omnívoros. Sin embargo en estos proyectos se ha ampliado la investigación a ensayos para evaluar la defensa ante distintos tipos de depredadores (incluyendo microdepredadores), así como la toxicidad frente a organismos de pequeño tamaño y larvas, la citotoxicidad durante distintas fases del desarrollo embrionario del erizo de mar *Sterechinus neumayeri* y frente a su esperma, y la actividad antifouling contra microorganismos simpátricos. El proyecto ACTIQUIM ha incluido, además otros organismos antárticos, las algas, que son productores de gran cantidad de metabolitos secundarios con aplicaciones en la industria farmacéutica pero que han sido poco estudiados con respecto a su ecología química (Salvador et al., 2007). Los extractos y metabolitos secundarios aislados fueron también evaluados para determinar su posible potencial antitumoral. Para la realización de los experimentos se utilizó el material (extractos crudos y sustancias naturales aisladas) procedente del proyecto ECOQUIM, además del recolectado en otras dos campañas realizadas en la base de la isla Decepción (**Fig. 2**) (Archipiélago Shetland del Sur, territorio Antártico) en el marco del proyecto ACTIQUIM,

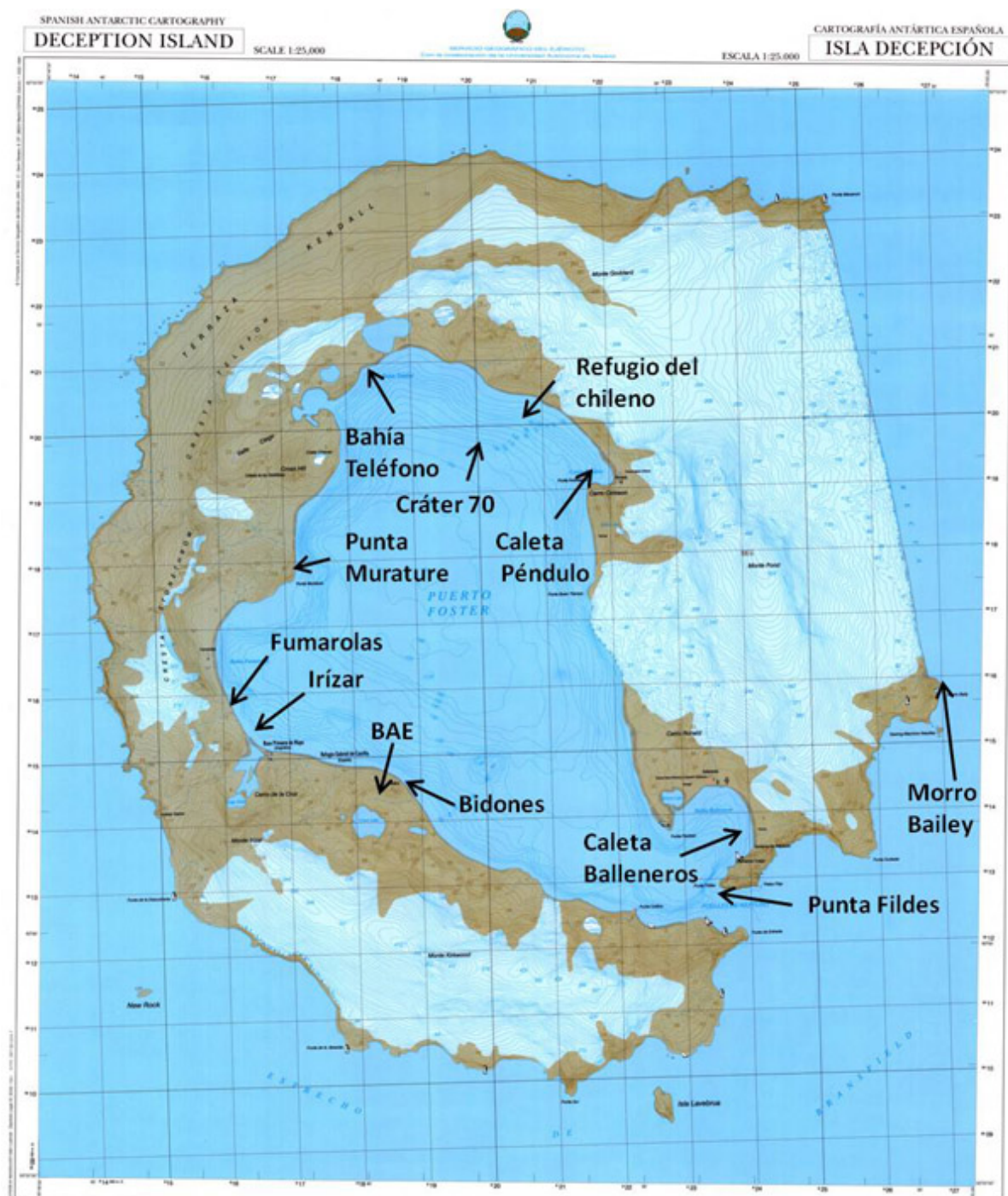


Foto 2. Mapa de la isla Decepción con la localización de los principales puntos de muestreo.

La recolección de muestras durante las campañas ACTIQUIM-1 y ACTIQUIM-2 durante los veranos australes de 2008-2009 y 2009-2010 respectivamente fue efectuada mediante distintas técnicas según los organismos a recolectar. Así, se realizaron inmersiones con escafandra autónoma en distintas áreas de Isla Decepción para recolectar macroinvertebrados; se dispusieron nasas con cebo durante la marea baja a lo largo de la playa de la Base Gabriel de Castilla (**Fig. 3 y 4**) para atraer a los invertebrados necrófagos (anfípodos e isópodos principalmente); a bordo de la zodiac de la base se realizaron arrastres con manga de plancton de 140 μ m en la zona de bahía Foster (Isla Decepción) para capturar larvas; y también se llevaron acabo recolecciones manuales en el litoral, de algas e invertebrados mediante apnea o bien aprovechando la marea baja en Isla Snow, Isla Livingston (Bahía Falsa) y en Isla Decepción (Refugio del Chileno, Caleta Péndulo, Cráter 70, playa frente a la base, lago Irizar, Morro Baily y Fumarolas) (**Fig. 5 y 6**).

Mediante estas técnicas de muestreo se obtuvieron macro y microinvertebrados, algas, larvas y microorganismos que se utilizaron para realizar los diferentes experimentos en la base Gabriel de Castilla. Todos los invertebrados recolectados para experimentación se mantuvieron vivos en diferentes depósitos de agua de mar y en acuarios con aireadores del laboratorio húmedo de la base Gabriel de Castilla. La mayoría de ellos, tras la finalización de los experimentos, fueron devueltos al mar.

También se recolectaron más de 400 muestras de microorganismos, algas e invertebrados en las campañas ACTIQUIM-1 y ACTIQUIM-2, que fueron o bien fijadas para su identificación taxonómica o bien congeladas a -20°C para analizar sus productos naturales y/o su posible actividad antitumoral.



Foto 3. *Recolección de algas en el intermareal de la playa situada delante de la BAE Gabriel de Castilla.*



Foto 4. *Preparación de los equipos de buceo para una inmersión.*



Foto 5. Vista exterior del laboratorio húmedo en la isla Decepción.



Foto 6. Interior del laboratorio húmedo con los tanques de mantenimiento de invertebrados y las estanterías con las bandejas de los experimentos.

Algunos resultados

Vamos a desglosar brevemente a continuación algunos datos y ejemplos de resultados obtenidos de los experimentos realizados.

Identificación taxonómica

Las diferentes campañas realizadas en los proyectos ECOQUIM y ACTIQUIM nos han permitido obtener una muestra muy representativa de los organismos del bentos antártico (**Figs. 7, 8, 9 y 10**). Aunque el estudio taxonómico de algunos grupos no está aún finalizado se puede avanzar que hasta el momento se han identificado hasta el nivel de especie o género casi medio millar de especies pertenecientes a los siguientes grupos taxonómicos: 11 especies de algas macroscópicas, 84 especies de esponjas, 64 especies de cnidarios, 47 especies de briozoos, 32 especies de moluscos, 79 especies de anélidos poliquetos, 3 de nemertinos, 58 especies de equinodermos, 32 de picnogónidos, 37 de tunicados y 10 de otros grupos (braquiópodos, crustáceos, priapulidos, sipunculoideos). Además se han descrito especies nuevas (Ballesteros y Avila, 2006; Ríos et al., 2006) y otras están en proceso de descripción.



Foto 7. El tunicado individual Cnemidiocarpa verrucosa, común en el infralitoral rocoso de la isla Decepción.



Foto 8. Dos especies muy frecuentes en los fondos antárticos y que se han utilizado para diversos experimentos en el proyecto ACTIQUIM, el erizo Sterechinus neumayeri y la estrella Odontaster validus.



Foto 9. La anémona *Utricinopsis antarctica* en su ambiente natural.



Foto 10. Dos habitantes frecuentes en los fondos fangosos, la estrella *Ctenotaster involutus* y el nemertino *Parborlasiopsis corrugatus*.

Extracciones químicas

Las muestras para ensayos de ecología química eran procesadas, primero diseccionando en partes los organismos para localizar posibles diferencias en la distribución de las defensas químicas potencialmente presentes. Después, cada muestra era extraída mediante métodos químicos empleando disolventes orgánicos (acetona, dietil éter y butanol, en este orden), obteniéndose así extractos etéreo, butanólico y residuo acuoso de cada una de ellas. El protocolo seguido para dichas extracciones viene descrito en nuestros trabajos de ecología química (Iken et al., 1998, 2002; Avila et al., 2000). Estos extractos eran empleados para evaluar actividades ecológicas y por tanto eran usados en los experimentos descritos a continuación, si bien algunos de ellos eran posteriormente analizados con mayor detalle con el fin de aislar productos naturales interesantes, los cuales, si era posible eran también ensayados en dichos tests.

Tests de repelencia alimentaria ante macrodepredadores

Estos experimentos se han venido realizando con la voraz y abundante estrella de mar *Odontaster validus*, descrita como una de las especies más comunes del bentos antártico, con un amplio rango batimétrico y una variada dieta de tipo omnívoro generalista (Dayton et al., 1974). La metodología empleada viene descrita en detalle en trabajos previos de nuestro grupo investigador (Avila et al., 2000; Iken et al., 2002). Los tests de repelencia alimentaria contra depredadores simpátricos se llevaron a cabo durante 3 campañas antárticas (ECOQUIM-2, ACTIQUIM-1 y ACTIQUIM-2) siempre en las instalaciones de la base Gabriel de Castilla (Isla Decepción). En la campaña ECOQUIM-2 se ensayaron cerca de un centenar de extractos, pertenecientes a más de 50 especies diferentes, de las cuales 27 especies de esponjas, cnidarios, tunicados, briozoos, equinodermos, moluscos y un poliqueto resultaron activas contra la depredación de *Odontaster validus* (**Fig. 11**). Sólo el grupo de nemertinos y pterobranquios resultaron inactivos para la estrella, aunque cabe recalcar que éstos también fueron menos representados. Durante la campaña ACTIQUIM-1 se probaron más de 90 extractos y compuestos aislados de invertebrados antárticos, en los tests de repelencia. Se detectaron 58 muestras activas, de las cuales 11 provenían de compuestos aislados a partir de esponjas hexactinélidas, cnidarios y tunicados coloniales. El resto de positivos eran extractos de especies pertenecientes a los grupos taxonómicos Porifera, Cnidaria, Bryozoa, Echinodermata, Tunicata y Polychaeta, además de otros grupos menos representados. Cerca de 70 ensayos de este tipo se realizaron durante la campaña ACTIQUIM-2, con extractos etéreos y con compuestos aislados de esponjas y cnidarios. De los compuestos aislados 2 dieron actividad repelente contra la depredación de la estrella, así como 14 de los extractos de tunicados, cnidarios, algas, equinodermos y otros grupos menores.



Foto 11. Presentación de diferentes bloques de alimento preparado con extractos a la estrella *Odontaster validus* para el experimento de preferencia alimentaria.

Tests de preferencia alimentaria ante microdepredadores

Estos test se realizaron con extractos ya preparados en la Universidad de Barcelona. Durante la campaña ACTIQUIM-1 se realizaron varias pruebas, sin éxito, en las que los extractos fueron añadidos a una comida artificial preparada con una base de algas (*Padina pavonica*, *Ulva* sp., *Codium* sp., *Plocamium cartilagineum* y algas rojas antárticas) y ágar, que se vertía en un molde de metacrilato sobre un soporte de malla reticulada. Gracias al soporte de malla reticulada la cantidad de comida ingerida podía ser contabilizada una vez retirado el alimento como el número de cuadrados consumidos. La metodología está basada en el protocolo empleado por Hay et al. (1994). Los microdepredadores utilizados fueron: el erizo *Sterechinus neumayeri*, la lapa *Nacella concinna* (**Fig. 12**), y anfípodos de la especie *Cheirimedon femoratus*. En la siguiente campaña, ACTIQUIM-2, se probaron con los mismos organismos, varios tipos de ingredientes nuevos, algunos comerciales, además de un formato de comida artificial nuevo basado en bolitas de caviar elaboradas mediante alginato. El erizo de mar y la lapa continuaron con sus bajas tasas de ingesta ante cualquiera de las dietas ofrecidas, pero el anfípodo aceptó vorazmente varias de ellas, y en particular el nuevo formato con textura de caviar. Finalmente se encontró una receta adecuada para un microdepredador que la consumía, y se pudieron realizar los experimentos. El protocolo de la comida artificial, diseño del experimento y resultados detallados está siendo elaborados para su próxima publicación (Núñez-Pons et al., datos sin

publicar). Se evaluaron más de 50 extractos de los cuales 42 fueron activos frente a los controles para el anfípodo, y éstos eran extractos de esponjas, cnidarios, tunicados y algas (Núñez-Pons et al., datos sin publicar).



Foto 12. Charca intermareal con la lapa antártica *Nacella concinna*, una de las especies utilizada para los experimentos de preferencia alimentaria ante microdepredadores.

Experimentos de toxicidad frente a crustáceos

Se realizaron experimentos de toxicidad con extractos ofertados a anfípodos recogidos mediante buceo en las inmediaciones de Puerto Foster. Los anfípodos recolectados (**Fig. 13**) se mantenían en acuarios de pequeño tamaño con aireadores para mantenerlos en buenas condiciones, a la espera de utilizarlos para los experimentos. En total se ensayaron 25 extractos pertenecientes a 14 especies de esponjas y 1 especie de briozoo. Se pudo comprobar que ninguno de los extractos producía cambio alguno en el comportamiento de los anfípodos, por lo que se optó por utilizar copépodos, mucho más pequeños que los anfípodos. En este caso, se probaron un total de 32 extractos pertenecientes a 24 especies de invertebrados. A falta de realizar los análisis estadísticos correspondientes, 14 de los 32 extractos testados presentaron un efecto claramente tóxico frente a los copépodos utilizados en los ensayos.



Foto 13. El anfípodo *Cheirimedon femoratus* es muy abundante entre las algas del intermareal e infralitoral antártico. Ha sido utilizado en los experimentos de preferencia alimentaria ante microdepredadores y en los de toxicidad de extractos frente a crustáceos.

Experimentos para evaluar la actividad antirecubrimiento (antifouling) contra microorganismos

Durante la campaña antártica ACTIQUIM-1 se realizaron ensayos con extractos procedentes de especies de algunos organismos seleccionados. En primer lugar, se recolectó una muestra de agua de mar en la zona intermareal de Cráter 70. Se conservó parte de la muestra congelada para la posterior identificación de las especies bacterianas asociadas al agua. Para el aislamiento de los microorganismos presentes en la muestra tomada se utilizaron medios generales como el agar marino y el caldo marino. Estos medios permiten cultivar bacterias marinas heterotróficas ya que contienen los nutrientes necesarios para el crecimiento de éstas (**Fig. 14**). Tras reiteradas siembras y la determinación de la temperatura óptima de crecimiento se iniciaron los experimentos para probar la actividad antirecubrimiento. Se utilizó el método de difusión de discos en ágar utilizando ágar marino, mediante discos de papel. Transcurridas 24 h de incubación a la temperatura óptima se medía en mm el halo de inhibición que se creaba o no alrededor de los discos. Para la interpretación de los resultados respecto a la actividad del extracto, se siguió el procedimiento propuesto por Mahon et al. (2003), que establece las categorías interpretativas para las medidas de las zonas de inhibición según estos halos de inhibición. Se evaluó la actividad antirecubrimiento para un total de 43 extractos diferentes pertenecientes a 30 especies de invertebrados marinos (esponjas, briozoos, cnidarios, ofiuroideos, holoturoideos, tunicados). Los resultados previos de este experimento muestran que de los 43 extractos que fueron testados, 10 de ellos presentaron un halo de inhibición diferente a cero (es decir, se observaba actividad antibacteriana). Las bacterias de los cultivos están en proceso de identificación.

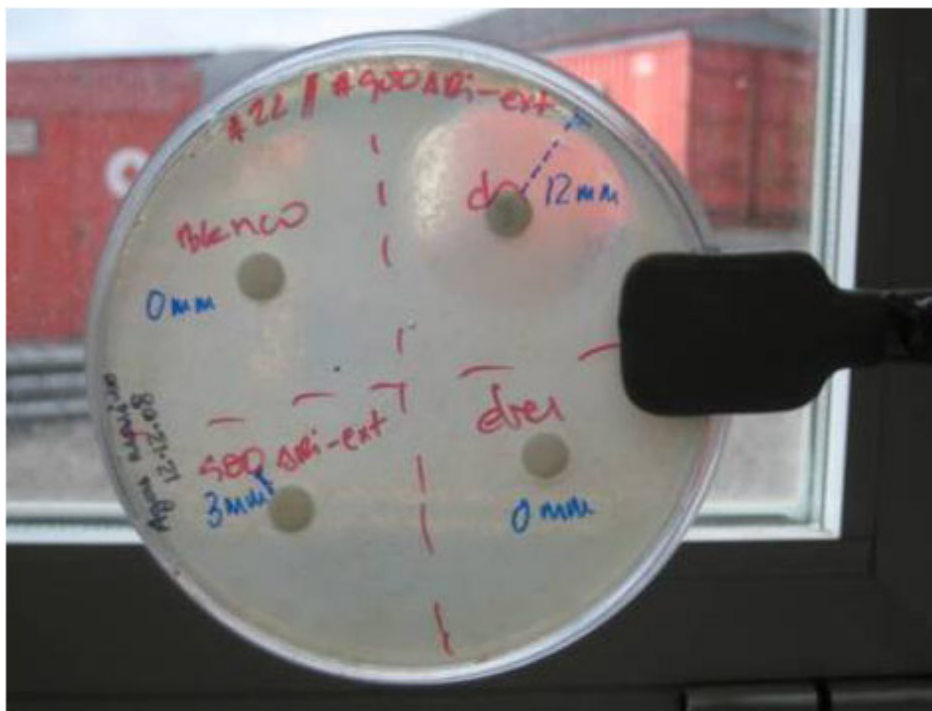


Foto 14. Placa de Petri con siembra de bacterias en ágar marino para evaluar la actividad antirecubrimiento de extractos de invertebrados marinos.

Actividad antitumoral

Para evaluar la actividad antitumoral de los extractos o metabolitos de especies de macroorganismos capturados en las campañas, se analizaron en la empresa Pharmamar más de 800 muestras, congeladas a -20°C , de organismos bentónicos recolectados en las campañas ECOQUIM y ACTIQUIM-1. Estas muestras fueron ensayadas frente a un panel de líneas celulares para detectar su actividad farmacológica. Los resultados de estos estudios demuestran que los invertebrados bentónicos antárticos son una fuente de actividad antitumoral de gran interés (Reyes et al., 2008; Taboada et al., 2010), destacando de entre nuestros resultados la descripción de las aplycianinas como nuevos compuestos citotóxicos procedentes de un tunicado del Mar de Weddell.

Estudios químicos

Algunas muestras de las diferentes campañas han sido y están siendo sometidas a análisis químicos para la determinación de sustancias naturales bioactivas. En el grupo de los moluscos, el nudibranquio *Austrodoris kerguelensis* (Fig.15) demostró poseer compuestos terpenoides de interés causantes de la repelencia ante estrellas de mar (Iken et al., 2002), así como *Bathydoris hodgsoni*, con el nuevo compuesto hogsonal, responsable de la defensa de esta especie (Iken et al., 1998; Avila et al., 2000). Se están realizando varios estudios químicos en algunas especies de cnidarios, esponjas y tunicados antárticos con el fin de determinar moléculas que, o bien son cadenas orgánicas nuevas para la ciencia, o bien se trata de productos naturales que han dado actividad positiva en experimentos de repelencia ante depredadores generalistas simpátricos. Estos estudios se están llevando a cabo en colaboración con el Istituto di Chimica Biomolecolare (ICB-CNR) de Pozzuoli, Napoli (Italia) y con la Universidade da Coruña. Entre estas muestras encontramos, en el grupo de los cnidarios, el coral blando *Alcyonium grandis*, del cual se han obtenidos nuevos terpenoides de la familia de los illudalanos (Carbone et al. 2009). Dentro del grupo de los tunicados antárticos hay una ascidia colonial *A. falklandicum*, productora de una serie de compuestos alcaloides, las meridianinas A-G, repelentes ante depredadores y con potencial farmacológico (Núñez-Pons et al. 2010). Y también cabe destacar que en el grupo de los equinodermos holoturoideos, y en colaboración con un equipo de investigación del Pacific Institute of Bioorganic Chemistry de Vladivostok (Rusia), se han identificado una serie de metabolitos secundarios de tipo triterpenos, las liouvilloisidos A1, A2, A3, B1 y B2 a partir de las holoturias antárticas *Staurocucumis liouvillei* y *Achlyonice violaecuspidata* (Antonov et al. 2008; 2009). Los resultados actuales nos indican que varias moléculas más, actualmente en fase de estudio, son también nuevos productos naturales y están siendo elaborados para su próxima publicación.



Foto 15. El nudibranchio *Austrodoris kerguelensis* en su ambiente natural. De esta especie se han podido extraer interesantes compuestos terpenoides causantes de repelencia ante estrellas de mar.

Conclusiones

La presencia de actividad ecológica en los diversos experimentos, como por ejemplo las defensas químicas contra la depredación, ya sea frente a macroinvertebrados generalistas como las estrellas de mar, o como frente a microdepredadores tipo anfípodos, ha demostrado ser considerablemente elevada en nuestras muestras antárticas. Los grupos que demostraron mayor actividad defensiva contra la depredación, por ejemplo, fueron las esponjas, los cnidarios, los tunicados, los briozoos, los equinodermos y los moluscos. Esto, en concordancia con otros estudios, indica que la incidencia de defensas químicas en los organismos antárticos es elevada, y que por tanto pueden considerarse como una fuente rica de metabolitos secundarios con bioactividad, tanto a nivel ecológico como para usos farmacológicos.

Este tipo de estudios multidisciplinarios, pese a su complejidad, nos permite abordar cuestiones ecológicas de forma amplia y genérica, y nos permitirá integrar todos los datos obtenidos de la experimentación con los distintos grupos taxonómicos en un modelo ecológico que tenga en cuenta los mecanismos químicos que regulan las interacciones entre los organismos bentónicos antárticos. El conocimiento del funcionamiento de los ecosistemas bentónicos antárticos es aún escaso, y nuestros estudios contribuyen a ampliarlo, así como a conocer la diversidad biológica y química de los mismos. Este es un elemento fundamental para elaborar en un futuro herramientas adecuadas de gestión para la conservación de los ecosistemas que ocupan los fondos antárticos. Teniendo en cuenta la breve historia de la biología antártica marina, y más aún de la ecología química marina, el campo para explorar aparece ante nosotros como un panorama todavía inmenso con mucho por descubrir.

Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda prestada por el personal de la Base Antártica Gabriel de Castilla durante todas las campañas realizadas, y personal de a bordo de los buques R/V Polarstern, Las Palmas, y Bio-Hespérides, por toda su colaboración. Además hay que agradecer la contribución de P. Ríos, M. Varela, A. Bosch, A. Gómez-Garreta, A. Ribera-Singuan, J. L. Moya y A. Ramos en las determinaciones taxonómicas u otras tareas de apoyo a lo largo del desarrollo de estos proyectos. Se agradece la colaboración y la realización de los experimentos antitumorales por parte de la empresa PharmaMar, y al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación de los proyectos ECOQUIM (REN2003-00545/ANT), ECOQUIM-2 (CGL2004-03356/ANT), ACTIQUIM (CGL2007-65453/ANT) y ACTIQUIM-II (CTM2010-17415/ANT).

Referencias

- Albericio, F., Alvarez, M., Cuevas, C., Francesca, A., Pla, D., Tulla-Puche, J. 2009. The sea as a source of new drugs. En: Tamaki, N., Kuge, Y. (eds.). *Molecular imaging for integrated medical therapy and drug development*, pp. 237-249. Springer, Tokyo, Japan.
- Amsler, C.D., Iken, K., McClintock, J.B., Baker, B.J. 2001. Secondary metabolites from Antarctic marine organisms and their ecological implications. En: McClintock, J.B., Baker, B.J. (eds.). *Marine Chemical Ecology*. pp. 263-296, CRC, Boca Ratón, Florida, USA.
- Antonov, A.S., Avilov, S.A., Kalinovskiy, A.I., Anastyuk, S.D., Dmitrenok, P.S., Evtushenko, E.V., Kalinin, V.I., Smirnov, A.V., Taboada, S., Ballesteros, M., Avila, C., Stonik, V.A. 2008. Triterpene glycosides from Antarctic sea cucumbers. 1. Structure of Liouvillosides A1, A2, A3, B1, and B2 from the sea cucumber *Staurocucumis liouvillei*: new procedure for separation of highly polar glycoside fractions and taxonomic revision. *Journal of Natural Products* 71:1677-1685.
- Antonov, A.S., Avilov, S.A., Kalinovskiy, A.I., Anastyuk, S.D., Dmitrenok, P.S., Evtushenko, E.V., Kalinin, V.I., Smirnov, A.V., Taboada, S., Bosch, A., Avila, C., Stonik, V.A. 2009. Three new triterpene glycosides from the Antarctic sea cucumber *Achlyonice violaeacuspidata* (Elpidiidae, Elasipodida). *Journal of Natural Products* 72: 33-38.
- Arntz, W. E., V. A. Gallardo. 1994. Antarctic benthos: present position and future prospects. En: Hempel, (ed.) *Antarctic Science*. pp. 243-277. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany.
- Aumack, C., Amsler, C., McClintock, J., Baker, B. 2009. Are interactions between dominant mesograzers and macroalgae in the Western Antarctic Peninsula, in part, chemically mediated? The anti-grazing capabilities of secondary metabolites produced in antarctic filamentous macrophytes. *Journal of Phycology* 45, Suppl. 1, 13.
- Avila, C. 2006. Molluscan Natural Products as biological models: chemical ecology, histology and laboratory culture. En: Muller, W.E.G. (ed.). *Progress in Molecular and Subcellular Biology. Subseries Marine Molecular Biotechnology*. Cimino, G., Gavagnin, M. (eds.). Vol. 2: Molluscs, pp. 1-23. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany.
- Avila, C., Iken, K., Fontana, A., Cimino, G. 2000. Chemical ecology of the Antarctic nudibranch *Bathydoris hodgsoni* Eliot, 1907: defensive role and origin of its natural products. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 252: 27-44.
- Avila, C., Ballesteros, M. and C. Debenham. 2005. Chemical ecology of Antarctic invertebrates. En: Arntz, W., Brey, T. (eds.). *The Expedition Antarktis XXI/2 of RV Polarstern in 2003-2004. Berichte zur Polarforschung* 503:68-72, Bremerhaven, Germany.
- Avila C, Taboada S, Núñez-Pons L. 2008. Marine Antarctic chemical ecology: what is next? *Marine Ecology* 29:1-70.
- Baker, B.J., Kopitzke, R.W., Yoshida, W.Y., McClintock, J.B. 1995. Chemical and ecological studies of the Antarctic sponge *Dendrilla membranosa*. *Journal of Natural Products* 58: 1459-1462.
- Ballesteros, M., Avila, C. 2006. A new Tritoniid species (Mollusca: Opisthobranchia) from Bouvet Island. *Polar Biology* 29: 128-136.
- Blunt, J.W., Copp, B. R., Hu, W. P., Munro, M. H., Northcote, P. T., Prinsep, M.R. 2010. Marine natural products. *Natural Products Report* 27:165-237.
- Carbone, M., Núñez-Pons, L., Castelluccio, F., Avila, C., Gavagnin, M. 2009. Illudalane Sesquiterpenoids of the alcyopterosin series from the Antarctic marine soft coral *Alcyonium grandis*. *Journal of Natural Products* 72(7):1357-1360.
- Dayton, P.K., Robilliard, G.A., Paine, R.T. and L.B. Dayton. 1974. Biological accommodation in the benthic community at McMurdo Sound, Antarctica. *Ecological Monographs* 44(1):105-128.
- Faulkner, D.J. 2000. Marine pharmacology. *Antonie Van Leeuwenhoek* 77:135-145.
- Gallardo, V.A.. 1987. The sublittoral macrofaunal benthos of Antarctic shelf. *Environment International* 13:71-81.
- Gili, J.M., Orejas, C., Ros, J., López, P., W. Arntz. 2000. La vida en los fondos antárticos. *Investigación y Ciencia* 290:64-74.

- Gutt, J. 2000. Some "driving forces" structuring communities of the sublittoral Antarctic macrobenthos. *Antarctic Science* 12 (3):297-313.
- Hay, M. E., Quaker, E. K., Fenical, W. 1994. Synergisms in plant defenses against herbivores: interactions of chemistry, calcification and plant quality. *Ecology* 75(6):1714-1726.
- Iken, K., Avila, C., Ciavatta, M.L., Fontana, A., Cimino, G. 1998. Hodgsonal, a new drimane sesquiterpene from the mantle of the Antarctic nudibranch Bathydoris hodgsoni. *Tetrahedron Letters* 39:5635-5638.
- Iken, K., Avila, C., Fontana, A., Gavagnin, M. 2002. Chemical ecology and origin of defensive compounds in the Antarctic nudibranch Austrodoris kerguelenensis (Opisthobranchia: Gastropoda). *Marine Biology* 141:101-109.
- Koplovitz, G., McClintock, J.B., Amsler, C.D., Baker, B.J. 2009. Palatability and anti-predatory chemical defenses in a suite of ascidians from the Western Antarctic Peninsula. *Aquatic Biology* 7:81-92.
- Mahon, A.R., Amsler, C.D., McClintock, J.B., Amsler, M.O., Baker, B.J. 2003. Tissue-specific palatability and chemical defenses against macropredators and pathogens in the common articulate brachiopod Liothyrella uva from the Antarctic Peninsula. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 290(2):197-210.
- McClintock, J.B., Baker, B.J. 1998. Chemical ecology in Antarctic seas. *American Scientist* 86:254-263.
- McClintock, J. B. Amsler, M. O. Amsler, C. D. Baker, B. J. 2006. The biochemical composition, energy content, and chemical antifeedant defenses of the common Antarctic Peninsular sea stars Granaster nutrix and Neosmilaster georgianus. *Polar Biology* 29(7):615-623.
- McClintock, J. B., Amsler, C.D., Baker, B. J. 2010. Overview of the chemical ecology of benthic marine invertebrates along the Western Antarctic Peninsula. *Integrative and Comparative Biology* 1-14.
- Newman, D.J. and Cragg, G.M. 2007. Natural products as sources of new drugs over the last 25 years. *Journal of Natural Products* 70:461-477.
- Núñez-Pons, L., Forestieri, R., Nieto, R. M., Rodríguez, J., Jiménez, C., Nappo, M., Ramos-Esplá, A., Varela, M., Castelluccio, F., Carbone, M., Gavagnin, M., Avila, C. 2010. Chemical ecology of tunicates of the genus Aplidium from the Weddell Sea (Antarctica). *Polar Biology* 33(10):1319-1329.
- Paul, V.J., Puglisi, M.P., Ritson-Williams, R. 2006. Marine chemical ecology. *Natural Products Reports* 23(2):153-180.
- Peters K.J., Amsler C.D., McClintock J.B., van Soest R.W.M., Baker, B.J. 2009. Palatability and chemical defenses of sponges from the western Antarctic Peninsula. *Marine Ecology Progress Series* 385:179-187.
- Reyes, F., Fernández, R., Rodríguez, A., Francesch, A., Taboada, S., Avila, C. 2008. Aplicyanins A-F, new cytotoxic bromoindole derivatives from the marine tunicate Aplydium cyaneum. *Tetrahedron* 64:5119-5123.
- Rios, P. & Cristobo, J. 2006. A new species of *Biemna* (Porifera: Poecilosclerida) from Antarctica: Biemna strongylota. *Journal of the Marine Biological association of the United Kingdom* 86:949-955
- Salvador, N., Gómez Garreta, A., Lavelli, L. and M.A. Ribera. 2007. Antibiotic activity of Iberian macroalgae. *Scientia Marina*. 71(1):101-113.
- Taboada, S., García-Fernández, L.F., Bueno, S., Vazquez, J., Cuevas, C. & C. Avila. 2010. Antitumoral activity in Antarctic and Sub-Antarctic benthic organisms. *Antarctic Science* 22(5):449-507.