



Oceanografía Biológica de Cabo Polonio

Apuntes sobre investigaciones recientes

Danilo Calliari, Laura Rodríguez-Graña, Martín Bessonart, Lía Sampognaro, María Elena Cazarré, Beatriz Yannicelli, Angel Segura, Cecilia Alonso, Carla Kruk



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

ANII

Oceanografía Biológica de Cabo Polonio

Apuntes sobre investigaciones recientes

Autores:

Danilo Calliari, Laura Rodríguez-Graña, Martín Bessonart, Lía Sampognaro, María Elena Cazarré, Beatriz Yannicelli, Angel Segura, Cecilia Alonso, Carla Kruk



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Textos: Danilo Calliari

Correcciones: Laura Rodríguez-Graña y Lía Sampognaro

Dibujos originales: Laura Rodríguez-Graña

Edición gráfica: Danilo Calliari y Laura Rodríguez-Graña

El material gráfico reproducido es de acceso público o pertenece a los autores según se indica en cada caso: Laura Rodríguez-Graña (LRG), Juan Gadea (JG), Lía Sampognaro (LS), Carmela Carballo (CC), Danilo Calliari (DC).

La investigación que originó los resultados presentados en esta publicación recibió fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) bajo el código ANII_FCE_2017_136372. Los resultados son producto del trabajo de los autores en su función como investigadores de la Universidad de la República. Los contenidos son responsabilidad exclusiva de los autores.

Todas las actividades se realizaron en un marco de profundo respeto por la naturaleza. Entre otros cuidados, el manejo de organismos estuvo acorde a criterios establecidos por la Comisión Honoraria de Experimentación Animal (Universidad de la República) y cumplió con las reglamentaciones vigentes sobre bienestar animal en Uruguay.

Correcta citación de la presente publicación:

Calliari D, Rodríguez-Graña L, Bessonart M, Sampognaro L, Cazarré ME, Yannicelli B, Segura A, Alonso C, Kruk C 2021. Oceanografía Biológica de Cabo Polonio. Apuntes sobre investigaciones recientes. Proyecto FCE_2017_136372. 62 pp.



La versión electrónica de esta publicación es distribuida bajo licencia *Creative Commons*. Los contenidos pueden ser copiados, reproducidos e incorporados en nuevos productos no comerciales bajo cualquier formato, manteniendo los términos de distribución y citando la fuente original.

Índice General

Presentación y agradecimientos	5
¿Quiénes somos y qué temas nos interesan?	7
¿Qué es la Oceanografía?	9
Orígenes de la Oceanografía como área del conocimiento científico	13
¿Porqué Cabo Polonio?	20
¿Qué hicimos en Cabo Polonio, y cuáles fueron los resultados?	21
1 Variabilidad del ambiente marino costero	25
2 Diversidad del plancton en Cabo Polonio	35
3 El metabolismo pelágico frente a Cabo Polonio	55
Perspectivas	60

Índice de cuadros

Cuadro 1: ¿Qué es el plancton?	17
Cuadro 2: ¿Qué es el metabolismo ecosistémico?	22
Cuadro 3: El CTD	26
Cuadro 4: Todo sobre la sal	30
Cuadro 5: ¿Qué es la clorofila?	33
Cuadro 6: Ictioplancton	39

Presentación y agradecimientos

Esta publicación tiene como meta difundir algunos elementos generales acerca de la Oceanografía, un área del conocimiento que tiene una historia muy larga, casi tan larga como la dispersión de los humanos sobre el planeta. Pero sobre todo, busca dar a conocer las actividades de investigación en Oceanografía Biológica que un grupo de trabajo de la Universidad de la República ha desarrollado recientemente frente a Cabo Polonio, sobre la costa atlántica uruguaya.

En muchos sentidos la comunicación a la sociedad de las actividades y de los objetivos de las investigaciones científicas que se desarrollan en su seno resultan tanto o más importantes que los propios resultados. En primer lugar, ésta es una forma de contribuir al diálogo informado entre investigadores y el resto de la sociedad. Dicho diálogo es un proceso imprescindible para estimular una reflexión amplia y participativa acerca de los supuestos en que se basa la investigación científica; y debería serlo también para reflexionar sobre la dirección en la que se avanza con esta actividad. Porque los resultados de la investigación científica tienen un potencial inmenso para moldear la forma como vivimos, como entendemos el mundo y nuestro lugar en él, como nos relacionamos con la naturaleza y con nuestros semejantes. Y todo ello es demasiado importante como para dejarlo únicamente en manos de los científicos. Otro motivo muy relevante tiene que ver con que es la propia sociedad la cual de manera directa e indirecta financia la investigación científica. Este tipo de comunicación es una forma de retribuir y también de rendir cuentas.

La ciencia es una actividad esencialmente colaborativa. El trabajo que se relata en la presente publicación fue desarrollado gracias a la conjunción de aportes de múltiples personas y agencias. La financiación estuvo en gran medida a cargo de la Universidad de la República, que brindó la infraestructura necesaria para las investigaciones (instrumentos, equipos, laboratorios) y subvencionó los costos implícitos en el tiempo de trabajo de los investigadores involucrados. También aportó fondos que solventaron buena parte del trabajo de campo e insumos de laboratorio mediante las partidas de Dedicación Total de varios de los

investigadores involucrados. La Agencia Nacional de Investigación e Innovación ANII también contribuyó decisivamente con esta investigación, en particular aportando fondos para trabajos de campo, compra de insumos de laboratorio, contratación de personal técnico, así como con los costos de esta publicación. La contribución de la ANII se realizó a través de la financiación de un proyecto en un llamado abierto a fondos concursables (Fondo Clemente Estable proyecto FCE-136371, 2018 – 2021). La Intendencia Departamental de Rocha y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas colaboraron autorizando el acceso a Cabo Polonio con un vehículo cargado de bártulos como sacos de dormir, frascos y botellas para muestras, instrumental científico e investigadores.

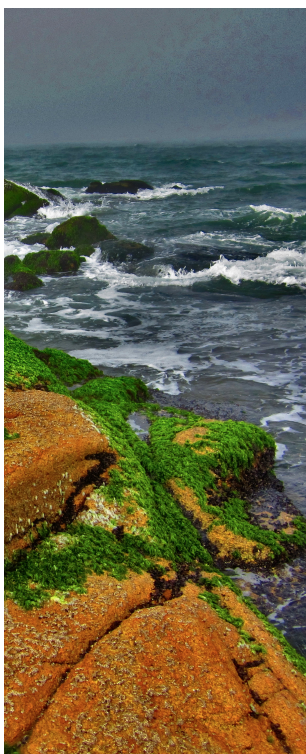
Estudiantes de la Facultad de Ciencias y del Centro Universitario Regional del Este (CURE) de la Universidad de la República participaron de manera destacada en diferentes instancias: Carmela Carballo, Camila Rebollo, Karina Eirin, Victoria Vidal y Pedro Ferrer. Pablo Muniz (Ciencias), César Fagundez y Victoria Vidal (CURE) colaboraron en la identificación de grupos específicos de organismos. La Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (DINARA-MGAP) facilitó acceso a espacios de laboratorio y alojamiento en la Estación de Acuicultura de Cabo Polonio durante los trabajos de campo, y de varias formas prestó apoyo logístico imprescindible para desarrollar estas actividades. Además, diversas personas vinculadas a la Estación de Cabo Polonio ayudaron de manera desinteresada, incluso entrando al agua en pleno invierno para ayudar en las maniobras de botadura e izado de la pequeña embarcación utilizada para la toma de muestras: Gabriel Pereira, Juan Gadea, Angel Inchausti, Nazarena Beretta, Juan Manuel Gutiérrez, Larisa Magnone, Florencia Feola, Sebastián Marquisá, Enrique Páez, Edwin da Costa. La preparación de las pruebas de imprenta estuvo a cargo de Karina Rodas (Mastergraf S.R.L.) quien resolvió múltiples problemas técnicos y realizó correcciones que permitieron alcanzar una mayor calidad en el producto final. ¡A todos muchísimas gracias!

Los autores



¿Quiénes somos y qué temas nos interesan?

Somos investigadores del Centro Universitario Regional del Este y de Facultad de Ciencias de la Universidad de la República que buscamos contribuir a comprender el funcionamiento del océano. Nos especializamos en áreas como la Oceanografía Biológica, la Ecología Marina y áreas del conocimiento afines.



La franja intermareal rocosa es cubierta y descubierta por el mar con cada marea. Quienes allí viven deben tolerar períodos de inmersión y emersión. Aquí vemos pequeños balanos (blancos), mejillones en las grietas entre rocas (negros) y algas verdes. Foto: LRG.

Cecilia Alonso es Bióloga (Facultad de Ciencias – Universidad de la República) y Dra. en Recursos Naturales (Max Planck Institut für marine Mikrobiologie, Alemania). Se especializa en Ecología Microbiana Marina.

Martín Bessonart es Biólogo (1992 Facultad de Ciencias – Universidad de la República) y Dr. en Acuicultura y Pesca (1997 Universidad de Las Palmas de Gran Canaria). Se especializa en ecología de peces, nutrición y acuicultura.

María Elena Cazarré es Bióloga (Facultad de Ciencias – Universidad de la República) y Maestrando en Geociencias (PEDECIBA-UdelaR) donde investiga los flujos de materiales mediados por el zooplancton en el litoral marino.

Carla Kruk es Bióquímica (Facultad de Ciencias – Universidad de la República), Magíster en Biología (PEDECIBA-UdelaR) y Dra. en Ciencias de la Vida (Univ. de Wageningen, Holanda). Se especializa en ecología del fitoplancton.

Laura Rodríguez-Graña es Bióloga (Facultad de Ciencias – Universidad de la República) y Dra. en Oceanografía (Univ. Concepción, Chile). Se especializa en ecología del ictioplancton y en la eco-fisiología del zooplancton.

Lía Sampognaro es Bióloga (Facultad de Ciencias – Universidad de la República), Magíster y Doctorando en Biología (PEDECIBA-UdelaR) donde investiga la ecología del microplancton marino.

Angel Segura es Biólogo (Facultad de Ciencias – Universidad de la República), Magíster y Dr. en Biología (PEDECIBA-UdelaR). Se especializa en Ecología teórica, Ecología Marina y métodos cuantitativos.

Beatriz Yannicelli es Bióloga (Facultad de Ciencias – Universidad de la República), Magíster en Biología (PEDECIBA-UdelaR) y Dra. en Oceanografía (Univ. de Concepción, Chile). Se especializa en ecofisiología del plancton.

Danilo Calliari es Biólogo (Facultad de Ciencias – Universidad de la República) y Dr. en Oceanografía (Univ. de Concepción, Chile). Se especializa en ecofisiología del plancton, biogeoquímica y flujos de carbono en el sistema pelágico marino.



Dunas sobre dunas, detrás de la playa La Calavera. Foto: DC.



¿Qué es la Oceanografía?

Llamamos **Oceanografía** al área del conocimiento que se interesa por los múltiples aspectos del funcionamiento de los mares y océanos, o como se le llama frecuentemente, del **sistema oceánico**. Una característica sobresaliente del océano es su extensión. *A priori* uno podría pensar en el océano como una masa de agua extremadamente vasta y más o menos uniforme, sin fronteras internas precisas. Pero si observamos con más atención es posible encontrar una gran riqueza de patrones y formas cuyo origen y consecuencias no son inmediatamente obvios (ver ejemplo en figura 1). Estas estructuras resultan del movimiento del agua en todas las escalas, desde miles de kilómetros – la dimensión de las grandes cuencas oceánicas – hasta milímetros, la escala en la cual la energía del movimiento se disipa como calor por acción de la viscosidad.

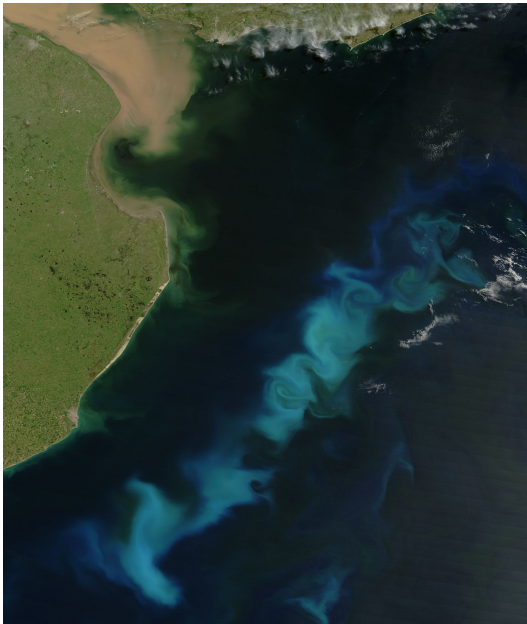
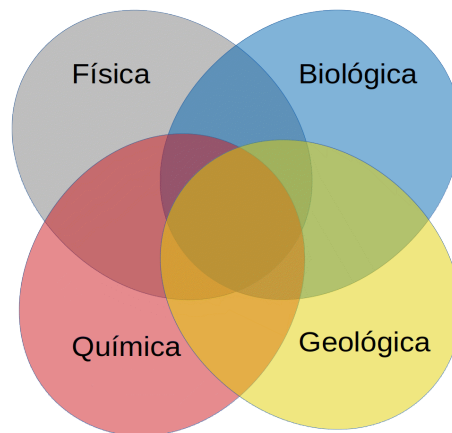


Figura 1.- Imagen satelital de una porción de la plataforma continental del Atlántico Sud-Occidental frente a la región bonaerense, al sur del Río de la Plata. Las aguas marrones del estuario son visibles en el extremo superior izquierdo. Las manchas azul-turquesa en sentido SW-NE indican concentraciones altas de fitoplancton, los productores primarios marinos. Observando con atención pueden verse patrones de remolinos y filamentos que acompañan el movimiento del agua y dan idea de las formas complejas que adopta la circulación marina en escalas intermedias (decenas a cientos de km). Esta es una imagen de color del océano obtenida el 15 de febrero de 2006 por el satélite MODIS-Aqua de la Agencia Espacial Norteamericana NASA.

<https://earthobservatory.nasa.gov/images/6296/south-atlantic-in-summertime-bloom>

Tradicionalmente pensamos la Oceanografía como la confluencia de cuatro grandes componentes: las *Oceanografías* Física, Química, Biológica y Geológica (figura 2). Las *Oceanografías* se relacionan íntimamente con disciplinas como la Ecología, Ciencias de la Atmósfera, Biología pesquera, Paleo-oceanografía, Biogeoquímica, Biología molecular, y tantas otras, incluso muchas de corte humanístico. Cada una de las cuatro principales componentes aborda aspectos más específicos del funcionamiento del océano. Por ejemplo, la **Oceanografía Física** estudia la circulación marina y la distribución de propiedades del agua de mar en los océanos (por ejemplo, de la sal y el calor), así como los procesos hidrodinámicos que generan y modifican esas distribuciones y dan lugar a estructuras como giros, frentes, anillos y otros. La **Oceanografía Biológica** se interesa por la distribución de los seres vivos en el océano, y como los procesos del ambiente afectan y son a su vez afectados por las actividades de los organismos. Por ejemplo, la Oceanografía Biológica se plantea preguntas como: ¿cuáles son las especies que viven en determinado sector del océano, y cómo éstas especies son afectadas por corrientes, cambios en la temperatura, la cantidad de sal o la composición química del agua, incluyendo la contaminación?; ó, ¿cómo intervienen los organismos en el funcionamiento del sistema oceánico, por ejemplo a través de sus impactos en los ciclos de diferentes elementos y materiales como Carbono, Nitrógeno y Oxígeno?. Análogamente para la **Oc. Química** y la **Oc. Geológica**. Vale recordar que estas divisiones tienen mucho de arbitrario y los límites entre ellas no son necesariamente precisos o claramente definidos. Lo más apropiado es pensar en la Oceanografía como un área del conocimiento esencialmente multi- e interdisciplinaria.

Figura 2.- Esquema de la confluencia de los cuatro principales componentes que conforman el área del conocimiento multidisciplinaria al que llamamos Oceanografía.



Un ejemplo claro del carácter interdisciplinario es el estudio del transporte vertical de materiales entre la superficie del océano y zonas más profundas. Dicho flujo vertical es un proceso crítico para el funcionamiento del sistema oceánico, y en particular en el ciclado de elementos químicos y sustancias como Carbono, Nitrógeno, Fósforo, Sílice, Oxígeno, y de la materia orgánica, entre otros. El metabolismo de los organismos (en particular del plancton) tiene un papel importante en estos procesos. Para caracterizar estos flujos (por ej., utilizando **trampas de sedimento**, ver figuras 3 y 4), y los factores que regulan su magnitud y variabilidad deben tenerse en cuenta aspectos de la física (estructura de la columna de agua, corrientes), la química (composición elemental de la materia orgánica, cantidad y tipo de compuestos como ácidos grasos, aminoácidos, composición isotópica) y de la biología (comunidades vegetales y animales, y sus tasas vitales).



Figura 3.- A la izquierda: Toma de una muestra de agua mediante botella. En este caso la maniobra se realiza manualmente desde la borda de una lancha en aguas del Río de la Plata frente a Montevideo. Foto: DC.

Abajo: Maniobra para recuperar trampas de sedimento a bordo del Buque Oceanográfico B/O Arne Tiselius en una zona costera del Mar del Norte (Skagerrak, Suecia). Ver también la figura 4, en la página siguiente. Foto: LRG.



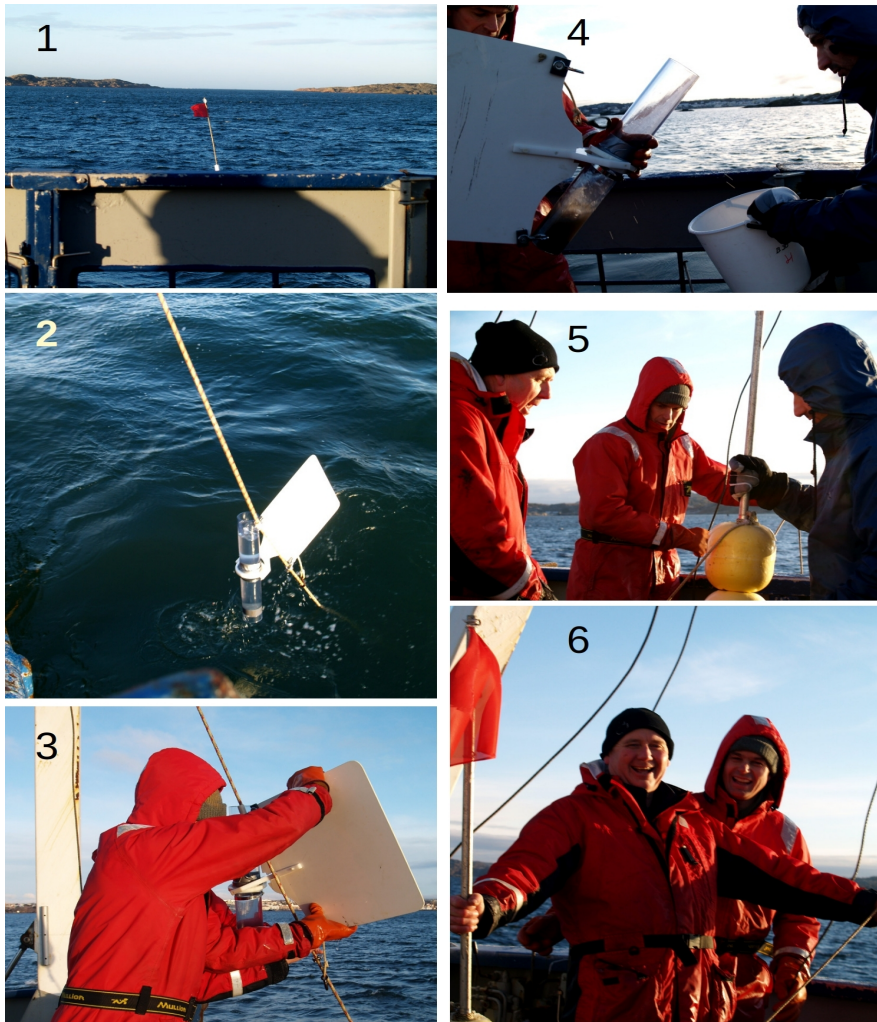


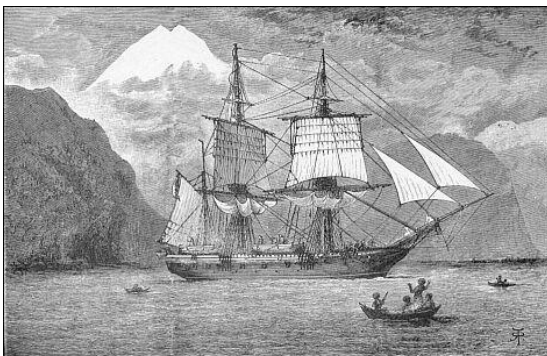
Figura 4.- Recuperación y toma de muestra de una trampa de sedimento. En su versión más sencilla una trampa de sedimento consiste de un tubo de sección y volumen conocidos que mediante un anclaje se coloca a una cierta profundidad durante un período de tiempo variable entre 24 h y algunos meses. Una parte del material que se hunde lentamente desde la superficie hacia capas profundas (por ejemplo, organismos muertos, *pellets* fecales, mudas, otros) va quedando depositado dentro de la trampa. Una vez recuperada, estos materiales son sujetos a análisis químicos y biológicos para estimar flujos y velocidades de sedimentación. Las fotos ilustran una secuencia (pasos 1 a 6) en el trabajo con estas trampas, desde el acercamiento del buque (**foto 1**: la trampa está marcada con boya y bandera para facilitar su localización en el mar), **2 y 3**: izado a bordo, **4**: colecta de muestra, **5**: preparación de la trampa para ser devuelta al mar, y ... **6**: la alegría por un trabajo bien hecho!. Fotos: LRG.



Orígenes de la Oceanografía como área de conocimiento científico

Los orígenes de la Oceanografía pueden rastrearse hasta los antiguos pueblos que cultivaron la navegación en mares y océanos como actividad central en sus respectivas culturas, por ejemplo Polinesios, Fenicios, Chinos, más tarde Vikingos, entre otros. Para estos pueblos el conocimiento de la geografía y de las corrientes marinas, pero también nociones de astronomía e incluso de la biología del océano fueron elementos esenciales de su cultura y subsistencia. De dicho período, que podría considerarse la pre-historia de la Oceanografía, contamos con pocos registros materiales que documenten el conocimiento alcanzado, y no hay una clara continuidad en el proceso de acumulación de conocimiento en relación a desarrollos posteriores. Dos excepciones notables son la brújula (China) y el astrolabio (árabe), instrumentos fundamentales para la navegación hasta épocas recientes. Sin embargo, dado lo que sabemos acerca de múltiples aspectos de dichas culturas, no caben dudas de que alcanzaron altos grados de sofisticación en las técnicas de navegación y conocimiento de océanos y mares.

Los comienzos de la Oceanografía como área del conocimiento científico se asocian a los grandes viajes de descubrimiento promovidos por monarquías europeas durante el Renacimiento, orientados a buscar nuevas rutas para el comercio, al establecimiento de enclaves de ultramar, la extracción de bienes, y la explotación de nuevos territorios bajo un régimen colonial.



H.M.S. *Beagle* in Straits of Magellan. Mt. Sarmiento in the distance.

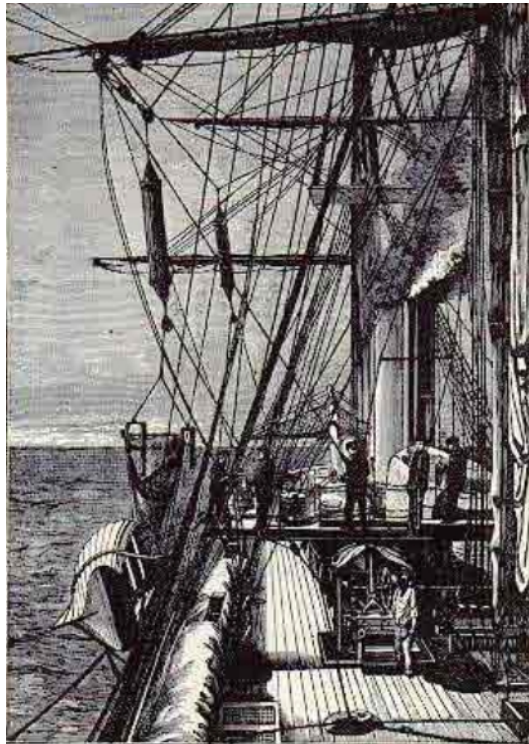
Figura 5. El HMS Beagle en el estrecho de Magallanes, ca. Mayo de 1834. Imagen obtenida de *A Naturalist's Voyage Round the World: The Voyage Of The Beagle*, de J. Murray sobre notas de C. Darwin y dibujos de R.T. Pritchett. Edición Ilustrada de 1889. En edición electrónica (2012) del Proyecto Gutenberg
<http://www.gutenberg.org/files/3704/3704-h/3704-h.htm#chxi>

Estas expediciones dieron lugar a las primeras cartas náuticas, trazado de líneas de costas y una descripción aproximada de la distribución de las masas continentales en el planeta (siglos XV a XVII). Personajes e hitos destacados de este período fueron “Enrique el Navegante” (Portugal) quien fundó la primera escuela de navegación e inició la exploración de las costas africanas; Colón y su llegada a las costas de América; los primeros viajes de circunnavegación global de Magallanes-Elcano, y más tarde por parte del inglés John Cook.

Figura 6. Sondeo de profundidad y virado de rastra a bordo del *HMS Challenger*. Tomado de *Reports of the Scientific results of the voyage of the HMS Challenger*, por J Murray, 1891.

Tomado de :

https://escholarship.org/uc/sio_lib_challenger



A mediados del S. XIX los también británicos John Murray y Edward Forbes comenzaron los registros sistemáticos de océanos y mares; el primero condujo mediciones de corrientes, batimetrías y vientos; el segundo estudió la fauna de los fondos marinos en las plataformas de Europa. En ese mismo siglo dos expediciones cambiarían radicalmente el estado del conocimiento de los océanos, y más allá: el viaje del *HMS Beagle* (1831 a 1836) con el joven Charles Darwin a bordo, y el del *Challenger* a cargo de Wyville Thomson (1872-1876) (figuras 4 a 8).

Como nota interesante, estas dos últimas expediciones pasaron por el territorio que actualmente conocemos como Uruguay, y sus reportes incluyen observaciones sobre su cultura, geografía, flora y fauna. Estas travesías contaron con instrumental avanzado para la época que permitió realizar registros, observaciones y toma de muestras en sitios y profundidades nunca antes alcanzadas.



Figura 7.- Derrota del HMS Challenger entre Islas Malvinas y Montevideo, cubierta entre el 6 y el 15 de Febrero de 1875. Ligeramente modificado de *Reports of the Scientific results of the voyage of the HMS Challenger*, por Murray, 1891. https://escholarship.org/uc/sio_lib_challenger

Estas travesías permitieron describir miles de nuevas especies para la ciencia e iniciaron la caracterización química de los océanos. El volumen y calidad de la información generada fueron extraordinarios. Los reportes del *HMS Challenger* se publicaron a lo largo de varios años en (finalmente) 50 volúmenes cuyas ilustraciones son verdaderas obras de arte y son aún hoy referencias importantes. Observaciones y registros realizados por el *HMS Beagle* dieron lugar - años después - a uno de los trabajos científicos más influyentes: “El origen de las especies” donde Darwin propuso una teoría de evolución biológica por selección natural que está en los fundamentos de disciplinas como Biología, Ecología, Zoología y tantas otras.



Figura 8.- Laboratorio de Zoología a bordo del *HMS Challenger*. Tomado de *Reports of the Scientific results of the voyage of the HMS Challenger*, por J Murray, 1891. https://escholarship.org/uc/sio_lib_challenger

Entre fines del S. XIX e inicios del S. XX ocurrieron otros desarrollos claves: el zoólogo alemán Victor Hensen comenzó un estudio sistemático de pequeños organismos de vida libre en el Mar del Norte y el Mar Báltico, y acuñó para éstos el término **plancton** (ver cuadro 1: ¿qué es el plancton?). Hensen, junto al ya mencionado Forbes son considerados fundadores de la Oceanografía Biológica.

Simultáneamente con estos desarrollos comenzó la primera ola de creación de estaciones de Biología Marina en Europa y América del Norte, por ejemplo la Estación Biológica de Roscoff (Francia 1872); la Estación Zoológica de Nápoles (Italia 1873); el Laboratorio Woods Hole en Massachusetts (Estados Unidos de América 1873); el Laboratorio de Biología Marina de Kristineberg (Suecia 1877); el Instituto Scripps de Oceanografía en California (EUA 1905), entre varios otros (figura 9). Y hacia 1915 el alemán Alfred Wegener propuso la teoría de la Tectónica de Placas utilizando, entre otra, información colectada por el *HMS Challenger*.

Desde entonces, entendemos que no sólo la biología tiene un comportamiento dinámico, sino también el planeta todo, en su fase sólida y acuosa: la forma, el tamaño y la distribución de las masas continentales, de las cuencas oceánicas y de los mares evolucionan en el tiempo. La historia, las características del planeta y de la vida en él no podrían entenderse sin estas dos grandes ideas: Evolución Biológica y Tectónica de Placas.

Cuadro 1: ¿Qué es el plancton?

Plancton es el nombre genérico que identifica al conjunto de organismos acuáticos de vida libre (es decir, suspendidos en el agua) y que no disponen de capacidad de locomoción, o cuya movilidad no es suficiente para oponerse al movimiento de las corrientes. El término deriva del griego *planctos* que quiere decir errante, o vagabundo. El plancton entonces incluye organismos de muy diferente origen filogenético, tamaño y grado de complejidad (por ejemplo, unicelulares y pluricelulares) pero todos tienen en común un tipo de vida libre (vs. sésil) y ser transportados con las corrientes. Si bien el organismo planctónico típico es pequeño, el rango de tamaños individuales que ocupan los integrantes del plancton es inmenso, y abarca desde fracciones de micrómetro (por ej., bacterias) hasta metros en el caso de algunas especies de medusas. En las figuras 15 a 47 pueden observarse representantes del plancton de Cabo Polonio.

Dentro del plancton se encuentran organismos autótrofos (**fitoplancton** o plancton vegetal): son aquellos que elaboran la materia orgánica que forma sus cuerpos, generalmente mediante fotosíntesis; y heterótrofos (**zooplancton** o plancton animal): aquellos que deben consumir materia orgánica -producida previamente por los autótrofos- como fuente de energía y materiales para elaborar sus tejidos. Pero existe también una tercera categoría intermedia entre vegetales y animales!: los **mixótrofos** que pueden comportarse como autótrofos o como heterótrofos, según les resulte más conveniente de acuerdo a las circunstancias.

Aquellos organismos que cumplen todo su ciclo vital como parte del plancton son conocidos como **Holoplancton** (*Holo* = todo, o total). Sin embargo, muchas especies viven como plancton solamente durante parte de su vida, generalmente durante las primeras etapas: huevo y/o larva, para luego ser parte de otras comunidades o tipos de hábitat. A estos se les conoce como **Meroplancton** (*Mero* = parte); tal es el caso de la enorme mayoría de las especies de peces (en esa etapa planctónica se los denomina **ictioplancton**), así como la mayoría de aquellas especies que viven enterrados o sobre los sedimentos (cangrejos, gusanos, almejas), o adheridos a las rocas (balanos, erizos, mejillones, lapas).

En resumen, plancton es un término que agrupa a los organismos que comparten un estilo de vida: libres y errantes, son los bohemios del mar.

Figura 9.- Stazione Zoologica Anton Dohrn en Nápoles (actual Italia). Construcción original como se veía en el entorno de 1890. Actualmente al edificio original se han agregado cuerpos adicionales. Foto sin información de autor. Dominio público. Tomada de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stazione_zoologica_Dohrn.jpg.



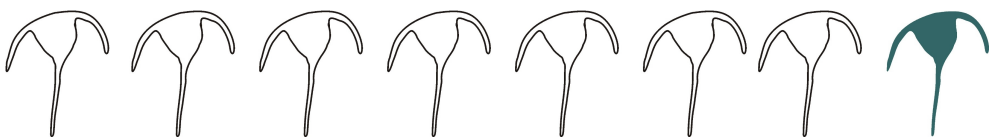
En el S. XX el desarrollo de la Oceanografía se aceleró notablemente: los hitos fueron múltiples y con implicaciones profundas, en gran medida facilitados por avances tecnológicos: sonar y radar, buceo, sumergibles de investigación, perfiladores de alta precisión, despliegue de instrumental autónomo montado sobre “drones acuáticos” (*gliders*), sobre boyas ancladas en el océano profundo (por ejemplo: programas PIRATA en el Océano Atlántico: <http://www.goosbrasil.org/pirata/>, TRITON y TAO en el Pacífico: <http://www.pmel.noaa.gov/tao/global/global.html>, RAMA en el Índico <https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/pmel-theme/indian-ocean-rama>); y sobre plataformas en la órbita terrestre (Oceanografía satelital). En el extremo opuesto, asistimos al desarrollo de técnicas para colecta, identificación y enumeración automática de organismos mediante análisis de imágenes asistidas por inteligencia artificial, secuenciación masiva de ADN ambiental y la implementación del “código de barras genético”. Estas tecnologías apuntan - entre otros objetivos - a incrementar la capacidad de mapear la biodiversidad del océano.

En conjunto, estos desarrollos han permitido conocer (aún parcialmente) múltiples aspectos del funcionamiento del océano, desde escalas muy pequeñas hasta globales: las intrincadas vías para el flujo de la energía por las redes tróficas o alimentarias y el ciclado de los elementos químicos, la génesis, mecanismos y consecuencias de osciladores climáticos como El Niño-Oscilación del Sur, y el rol del océano en procesos como el cambio climático.

Actualmente el conocimiento que resulta de investigaciones en Oceanografía y áreas relacionadas sigue teniendo un interés claro y de aplicación directa: por ejemplo, comprender los mecanismos físicos y biológicos que regulan la

variabilidad de poblaciones sujetas a explotación pesquera puede contribuir a un uso inteligente y responsable de la naturaleza. O, si logramos conocer el funcionamiento de los océanos con el detalle adecuado podremos comprender, e incluso predecir, cómo responderán al cambio climático (por ej., cómo cambiará la temperatura, las corrientes, el nivel del mar, la composición química), y cómo éstos cambios afectarán la vida en diferentes regiones del planeta. Estos conocimientos - correctamente utilizados - contribuyen al uso racional y moralmente aceptable de los componentes vivos y no-vivos que se obtienen del mar, y también podrían ayudar a prepararnos para mitigar los efectos del cambio climático.

Al mismo tiempo, la Oceanografía sirve a motivaciones menos “prácticas” pero quizás más profundas relacionadas con la curiosidad innata del ser humano por conocer e intentar comprender el mundo que nos rodea. Porque de muchas maneras el océano sigue siendo un misterio: es un ambiente muy vasto, de difícil acceso y pese a los esfuerzos continuados algunos sectores permanecen casi inexplorados. Existe algo de razón al afirmar que sabemos menos acerca del océano profundo que de la superficie de la Luna. Por otra parte, desde siempre el mar ha ejercido una fascinación importante sobre el ser humano al punto que es objeto privilegiado de contemplación y fuente de inspiración artística. Y cuando lo contemplamos desde la orilla o nos aventuramos en él resulta imposible dejar de preguntarse qué hay más allá de esa pequeña porción de la superficie hasta donde alcanza nuestra mirada, ¿qué tipos de seres habitan y se mueven en las zonas invisibles, muchos metros bajo la superficie?; ¿qué se esconde más allá de la línea del horizonte?; ¿a qué obedecen los cambios dramáticos en su color, aroma, o en el estado de sus aguas, a veces calmas, otras agitadas y destructivas?. Casi con certeza, preguntas como éstas ya estaban en la mente de los primeros exploradores del océano. Y muchos de quienes hoy en día nos dedicamos a estudiarlo comenzamos por hacernos preguntas de este tipo, movidos por su misterio y belleza.



¿Porqué Cabo Polonio?

Cabo Polonio forma parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, SNAP, y reúne características interesantes para la investigación en oceanografía costera. El Parque Nacional Cabo Polonio incluye el centro poblado e instalaciones históricas como faro y loberías, sistema de dunas móviles, playas arenosas, litoral rocoso, bosque nativo, pequeños humedales y... 21167 há de mar circundante e islas como Castillo Grande y de Torres. La combinación de puntas rocosas, arcos de playa e islas en el entorno del Cabo Polonio suponen diversidad de ambientes y cierta complejidad hidrográfica, los cuales sugieren una importante diversidad biológica. Esta área ha sido considerada de relevancia por sus valores paisajísticos, arqueológicos y de biodiversidad, así como para la actividad pesquera local. Todo ello concurrió para designarla Parque Nacional e integrarlo al SNAP; sin embargo, el conocimiento acerca del sector estrictamente marino del Parque Nacional Cabo Polonio es muy limitado. Ciertamente no es posible gestionar un ecosistema del cual se desconocen buena parte de sus componentes, y la manera como funciona. Esta fue una motivación para desarrollar investigaciones en este sitio: contribuir a la buena gestión del Parque Nacional Cabo Polonio a través de la generación de conocimiento relevante sobre el funcionamiento y biodiversidad del sector marino.

Otro motivo, esencialmente práctico pero muy relevante, es que en Cabo Polonio existen facilidades operativas básicas que posibilitan los trabajos planteados. Las instalaciones de la antigua planta de faena de lobos marinos hoy reconvertidas como estación experimental de acuicultura disponen de agua de mar circulante (fundamental para trabajos experimentales), espacios que pueden hacer las veces de pequeños laboratorios, y una pequeña embarcación para la toma de muestras.



Faro y parte del poblado de Cabo Polonio vistos desde la espumosa playa La Calavera. Foto: DC.

¿Qué hicimos en Cabo Polonio, y cuáles son los resultados?

Las investigaciones en Cabo Polonio buscaron contribuir con tres grandes objetivos: **1)** evaluar las características del ambiente costero marino y su variabilidad a lo largo del año, y en años sucesivos; **2)** generar conocimiento sobre la diversidad biológica en el sistema marino que circunda Cabo Polonio, con énfasis en el plancton; y **3)** evaluar el balance metabólico del sistema pelágico (ver cuadro 2: *¿qué es el metabolismo ecosistémico?*). Con estas metas, en el mes de setiembre de 2016 iniciamos un plan de trabajo que implicó salir al mar una vez por mes durante cuatro años consecutivos.

En las salidas al mar recogimos muestras de diferente tipo y realizamos mediciones para caracterizar diversos aspectos físicos, químicos y biológicos del mar costero. A continuación explicaremos con más detalle cuales fueron las actividades principales, y que resultados obtuvimos.

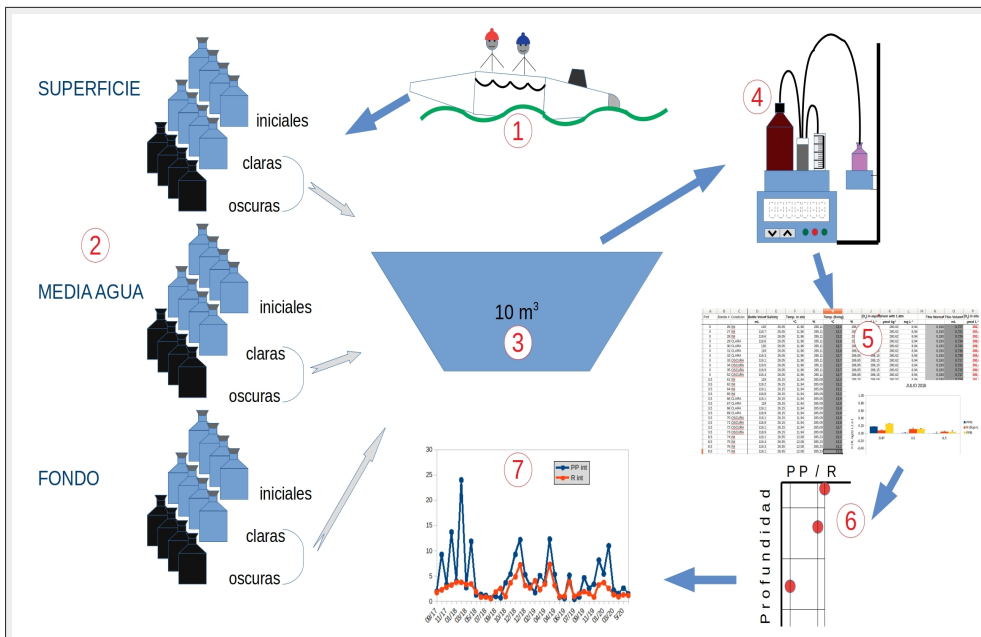


Figura 10.- Carta náutica de Cabo Polonio. La cruz indica la Estación Ensenada de la Calavera, donde se realizaron las mediciones y colecta de muestras. La figura es un modificación de la carta ROU18 tomada de <http://www.velerolaargentina.com/Ozi/Uruguay/ROU18.jpg>.

Cuadro 2: ¿qué es el metabolismo ecosistémico?

El concepto de balance metabólico (B) en un ecosistema refiere a la relación cuantitativa entre los flujos de entrada de **energía química metabólicamente útil** y aquellos flujos que implican pérdidas de dicho tipo de energía (nota: recordemos aquello de que “la energía no se pierde sino que se transforma”. Ello es válido; “pérdida” en este contexto refiere a la transformación de energía metabólicamente útil, en otra forma no directamente utilizable por parte de los organismos, por ejemplo: calor). El balance metabólico de un sistema puede darnos una idea acerca de si éste se comporta como una fuente o un sumidero de Carbono, como veremos más adelante. En el océano los procesos responsables de entradas y pérdidas de energía son, respectivamente, la producción primaria (fundamentalmente a cargo del fitoplancton) y la respiración (a cargo de toda la comunidad, incluido el fitoplancton). La relación cuantitativa entre ellos, o balance metabólico (B), se expresa generalmente como un cociente entre producción primaria (P) y respiración (R), tal que $B = P/R$. De acuerdo a esta definición, cuando P es mayor a R y por tanto $P/R > 1$, decimos que el sistema bajo estudio tiene un balance neto de tipo **autótrofo** (es decir, predominan los procesos de producción sobre los procesos de destrucción de materia orgánica); cuando P es menor a R y por tanto $P/R < 1$, decimos que el sistema tiene un balance neto **heterótrofo** (predominan los procesos de destrucción de materia orgánica sobre la producción); puede ocurrir también una tercera posibilidad cuando $P = R$, $P/R=1$, frente a lo cual decimos que el sistema presenta un **balance neutro**.

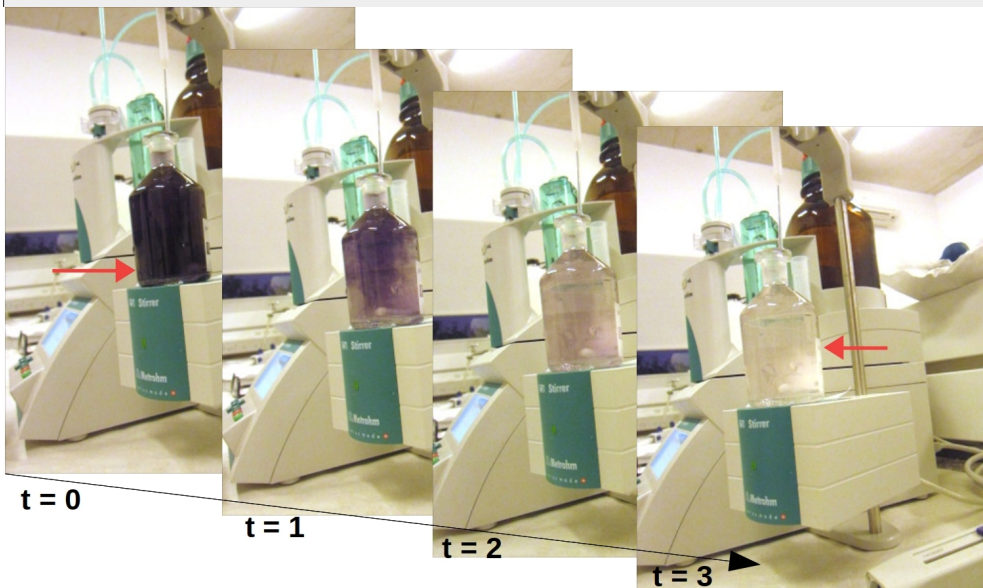
Tanto la producción como la respiración pueden variar en períodos cortos (horas, días, semanas). Por ello caracterizar el comportamiento del balance metabólico en un ecosistema requiere de una serie de mediciones en una escala de tiempo de al menos un año, de ser posible más. Si en una escala de tiempo anual o superior un sistema se caracteriza como autótrofo, se interpreta que la ganancia de biomasa (resultado de la producción primaria) supera a las pérdidas; ello implica que al cabo de un año se generó un exceso de biomasa que quedará disponible para **exportación** sin que se afecte la integridad del sistema. En este contexto, exportación representa la salida de biomasa del sistema y puede involucrar la traslocación de esa biomasa hacia sistemas adyacentes, por ejemplo ecosistemas de aguas más profundas o más alejados de la costa, o hacia los sedimentos. De esta forma el sistema analizado subsidiaría energéticamente sistemas adyacentes. Recíprocamente, si en una escala anual el sistema es heterótrofo, esto quiere decir que para funcionar de manera estable en el tiempo requiere de un subsidio energético.



Cuadro 2 (continuación): Pasos seguidos para estimar la producción primaria (P), la respiración (R) y el cociente P/R (pag, anterior). 1) Colecta agua de mar de tres profundidades (superficie, 3.5 y 8.5 m) en estación La Calavera-Cabo Polonio. 2) El agua se distribuye en 36 botellas **iniciales**, **claras** y **oscuras (cubiertas)**. 3) Las botellas claras y oscuras se incuban por 24 h en tanques exteriores con agua de mar circulante que asegura que cada una mantenga las condiciones de temperatura, irradiancia y fotoperíodo naturales. 4) Se mide el oxígeno en todas las botellas mediante una técnica denominada titulación de alta precisión. 5) En base a esa información se realizan los cálculos para encontrar los valores de P y R para cada profundidad. 6) Los valores de las diferentes profundidades se integran verticalmente para obtener un único valor que representa la condición de P y R para toda la columna de agua. 7) Este nuevo dato de P y de R (y el correspondiente balance) se incorpora a la serie de mediciones a lo largo del año.

Existen varias aproximaciones empíricas para estimar el balance metabólico en ecosistemas acuáticos. En general todas se basan en medir la variación en el tiempo de la concentración de oxígeno en el agua de mar. Recordemos que el oxígeno es un producto de la reacción de fotosíntesis (y por tanto indicador de producción primaria) y a su vez se utiliza para obtener energía cuando esa materia orgánica es respirada; por lo tanto el oxígeno se emplea como “trazador” de estos flujos. La aproximación metodológica que utilizamos en Cabo Polonio implica tomar muestras de agua e incubarlas en botellas bajo condiciones controladas de temperatura, irradiancia y fotoperíodo que simulan las naturales (ver esquema en este cuadro). De hecho se incuban dos sets; un set de botellas claras (o transparentes) y uno de botellas oscuras (cubiertas con una doble capa de papel de aluminio de forma que no entre luz). Se mide la concentración de oxígeno inicial y la final luego de 24 h. Luego de algunos

cálculos relativamente simples podemos conocer la producción primaria total, la respiración, la producción primaria neta (donde se descuenta el consumo de oxígeno por respiración de la comunidad biológica encerrada en la botella) y el balance metabólico. En todos los casos, el procedimiento para obtener resultados válidos y útiles radica en utilizar un buen diseño experimental, tener mucho cuidado en todas las manipulaciones, y contar con la capacidad instrumental para realizar mediciones muy precisas del oxígeno disuelto.

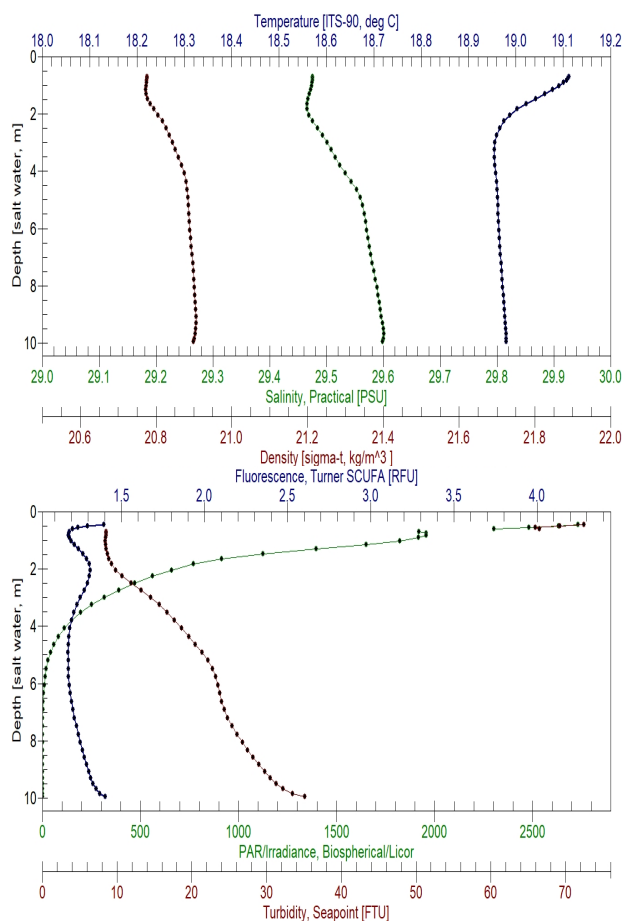


Cuadro 2 (continuación) Titulación Winkler para determinación de oxígeno disuelto en agua de mar. En la jerga química titulación es un proceso analítico mediante el cual se determina la cantidad de un elemento en una muestra (“elemento problema”, en este caso el oxígeno disuelto). Ello se logra mediante la adición de una cantidad perfectamente conocida de otra sustancia con la cual el elemento problema reacciona en forma y según proporciones conocidas, generando un cambio en el color u otras propiedades (por ej., pH). La fotografías muestran cuatro momentos del proceso de titulación ($t = 0$ o inicial, hasta $t = 3$ o final). Notar el cambio de color de la muestra en la botella señalada con flecha roja: inicial= azul oscuro, final= transparente que indica el punto final de titulación. El equipo empleado es una bureta automática para microtitulaciones. Fotos: LRG.

1.- Variabilidad del ambiente marino costero:

Para conocer mejor el sector marino de Cabo Polonio y su variabilidad seleccionamos algunos indicadores que describen aspectos clave del ambiente: la temperatura del agua, la salinidad, la fluorescencia de la clorofila-a, y la turbiedad. En estos casos es importante conocer la distribución vertical de estas condiciones, y no simplemente sus valores cerca de la superficie. Para ello, estas condiciones (que técnicamente llamamos de forma genérica “variables”, por asumir valores potencialmente diferentes en cada momento) las medimos utilizando un instrumento clásico en oceanografía: el perfilador oceanográfico tipo CTD (o simplemente CTD, ver cuadro 3).

Figura 11.- Condiciones ambientales en función de la profundidad en el sitio de muestreo La Calavera-Cabo Polonio. Arriba: Temperatura (°C), Salinidad y Densidad (esta última expresada como Sigma-t). Abajo: Irradiancia ($\mu\text{moles cm}^{-2} \text{s}^{-1}$), Fluorescencia (RFU) y Turbiedad (NTU). Estos registros fueron obtenidos el 13 de mayo de 2019.



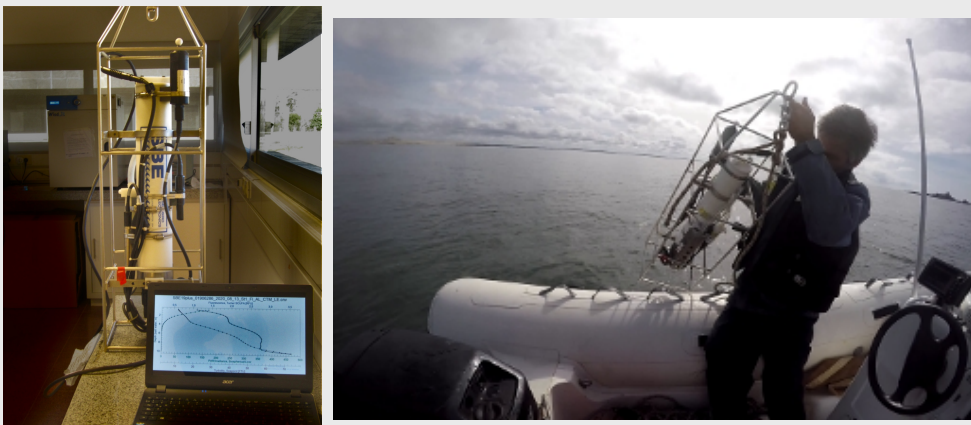
Cuadro 3: CTD

CTD, perfilador, o *sonda tipo CTD* es un instrumento de uso extendido y básico en Oceanografía. CTD es el acrónimo de *Conductivity, Temperature, Depth*, por ser éstas (conductividad, temperatura y presión, por profundidad) las variables básicas que registra. A partir de la conductividad, temperatura y presión se derivan la salinidad y la densidad. La presión hidrostática (debida al agua de mar) es medida en una válvula calibrada (*strain-gauge sensor*), en tanto temperatura y conductividad son medidas en función de la conductividad eléctrica del agua. El CTD puede incorporar sensores adicionales para medir variables como Oxígeno disuelto en agua, pH, Irradiancia en el espectro visible (es decir luz), Fluorescencia, Turbiedad, ente los más usados.

El CTD es el estándar para mediciones en oceanografía gracias a:

- 1- **Alta precisión:** en una configuración típica esto implica: Conductividad: $0,0005 \text{ S m}^{-1} \sim 0,003$ unidades de salinidad; Temperatura: 0.005°C ; Profundidad: 0,2 m.
- 2- **Alta frecuencia,** 4 Hz (equivalente a 4 mediciones por segundo), o superior.
- 3- **Integración electrónica de señales** de diferentes sensores: permite obtener resultados como si cada variable se midiera exactamente sobre la misma parcela de agua. Proporciona una matriz $\{\text{valores} \times \text{variable}\}$ donde cada línea de datos representa el set completo de variables a una profundidad específica, o cada 0,25 s.

En condiciones normales y de acuerdo con una configuración típica para un perfil oceanográfico este instrumento provee una resolución vertical del orden de 15 cm.



Perfilador CTD: a la izquierda el instrumento en el laboratorio durante la descarga de datos. A la derecha, el CTD es izado en la estación de trabajo en la Ensenada La Calavera, Cabo Polonio. Fotos: DC (izquierda) & JG (derecha).

La información resultante se muestra en la figura 11, que es la forma estándar de presentar este tipo de resultados: un eje de ordenadas (o eje x) que representa una o más de las variables bajo consideración, y un eje de abscisas (eje y) que representa la profundidad y se presenta en sentido invertido respecto al uso corriente en otros contextos (es decir, aumenta hacia abajo). Esta representación describe lo que en general llamamos “**estructura de la columna de agua**”. Esta estructura es un elemento clave para el funcionamiento del sistema oceánico.

Para representar la variabilidad de la columna de agua en el tiempo (es decir, agregar la variable *tiempo* a la representación anterior), una forma sencilla es mediante gráficos de “campos” o “secciones”. En este caso se trata de secciones imaginarias donde el eje de ordenadas representa el tiempo y las abscisas representan la profundidad; en una escala de colores se representa aquella variable que nos interesa analizar. Veamos algunos ejemplos:

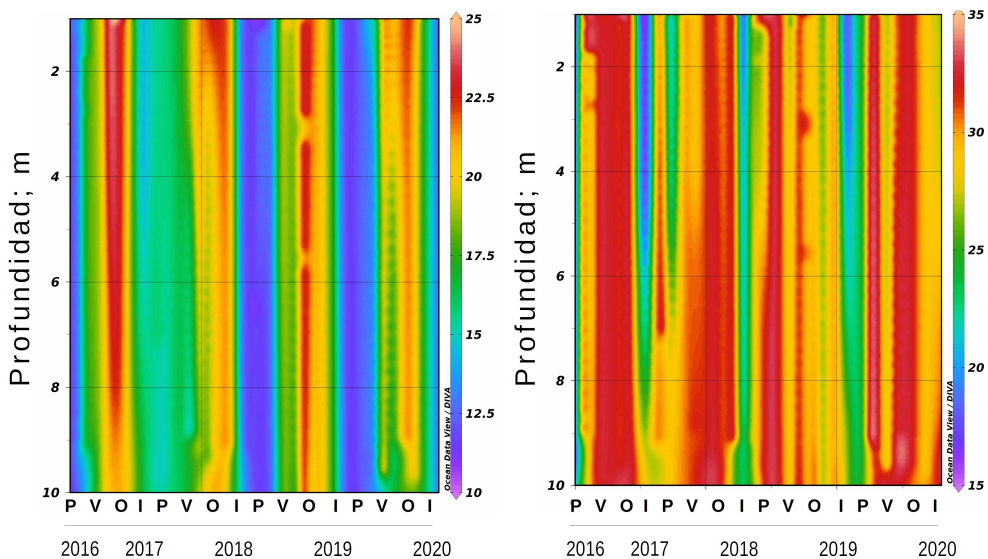


Figura 12.- Secciones de Temperatura (izquierda) y Salinidad (derecha) en el sitio de muestreo La Calavera-Cabo Polonio entre 2016 y 2020. El eje x representa el tiempo y el eje y la profundidad. Los valores en el gráfico corresponden con la escala de colores que se muestra a la derecha. P: primavera, V: verano, O: otoño, I: invierno.

Temperatura: La temperatura más alta registrada en el mar frente a Cabo Polonio durante el período 2016 – 2020 fue 24,23°C, y la más baja 11,42°C. En la figura 12 (izquierda) vemos una sección vertical de la columna de agua a lo largo del tiempo. El patrón de bandas verticales en la figura es un indicador claro de que la variación de la temperatura sigue un patrón estacional y que la variabilidad vertical, es decir

con la profundidad, es de menor importancia. En suma, la variabilidad de la temperatura se repite con características similares cada año aunque no exactamente igual todos los años. En general las temperaturas más altas se registran en el mes de marzo, y las más frías en julio o agosto.

Salinidad: La salinidad es la variable más característica del agua de mar, que la distingue de las aguas “dulces” o continentales de arroyos, ríos, lagos y acuíferos (ver cuadro 4: **Todo sobre la sal**). En el océano la salinidad del “agua promedio” es 35. Frente al Polonio, en el período estudiado la salinidad varió entre 15,01 y 33,14. También en este caso se percibe una alternancia de períodos de mayor y menor salinidad. En general valores más altos ocurren en verano y otoño, y valores más bajos en invierno; sin embargo este patrón de cambios estacionales de la salinidad es menos regular que aquel que encontramos en la temperatura: por ejemplo, en primavera a veces encontramos valores de salinidad altos y otras veces bajos. Estos cambios de salinidad resultan fundamentalmente de la dilución del agua marina por el aporte de agua dulce que llega desde la tierra. Y ese flujo de agua dulce no es otra cosa que el exceso de lluvia que precipita sobre las cuencas costeras y que no es retenido por el suelo o por los vegetales, ni es evaporado. En Uruguay las precipitaciones están distribuidas de forma más o menos similar a lo largo de todo el año, es decir, no tenemos una estación seca y otra lluviosa como ocurre en otras regiones. Pero la capacidad de retención del agua por el suelo y la evaporación son mayores en el verano, y por tanto el flujo de agua hacia el mar tiende a ser menor durante ese período. Por ello, en principio la dilución del agua marina costera es menor en verano, y su salinidad mayor.



Regreso a la Base Cabo Polonio desde el punto de muestreo en la ensenada La Calavera. En condiciones de buen tiempo la navegación entre la estación de trabajo y la Base insume unos 10 minutos, aproximadamente. Foto: JG.

De todas formas, episodios de lluvias muy intensas en cualquier momento del año pueden provocar una disminución fuerte de la salinidad, aún en el verano, como sucedió en enero de 2019. También, en aguas marinas costeras uruguayas la salinidad puede cambiar por el aporte de agua dulce que viene desde más lejos, en este caso desde la cuenca del Río de la Plata. El estuario del Río de la Plata es alimentado por una cuenca inmensa (más de 3 millones de km²) que cubre todo el territorio de Paraguay y parte de Argentina, Brasil, Uruguay y que alcanza hasta Bolivia. Cuando sobre esa cuenca se producen precipitaciones muy abundantes, el efecto de la descarga del Río de la Plata puede detectarse en Cabo Polonio y de hecho ¡mucho más allá!.

Fluorescencia: La figura 13 (izquierda) representa la fluorescencia de la clorofila-a, la cual es utilizada como indicador de biomasa de fitoplancton (ver cuadro 5: *¿qué es la clorofila?*). Aquí las cosas ya son bien diferentes. Por una parte es notoria la ausencia de un patrón regular a lo largo del tiempo como habíamos visto para la temperatura, y en menor medida para la salinidad. Y en este caso sí hay diferencias importantes en la distribución de la clorofila con la profundidad.

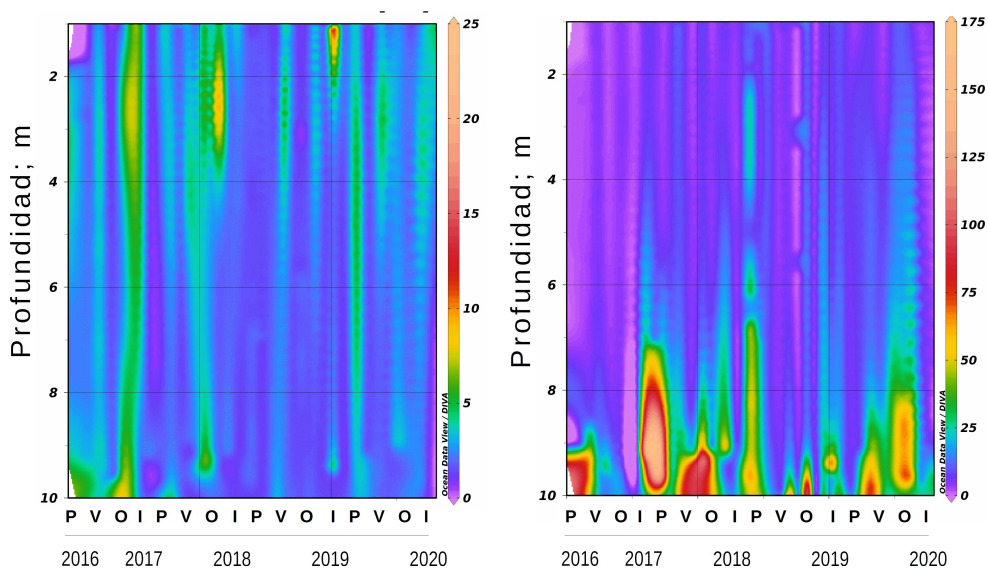


Figura 13.- Secciones de Fluorescencia (izquierda) y Turbiedad (derecha) en el sitio de muestreo en la ensenada La Calavera. Los valores en el gráfico corresponden con la escala de colores que se muestra a la derecha. P: primavera, V: verano, O: otoño, I: invierno.

Cuadro 4: Todo sobre la Sal

El agua de mar es salada. Pero, ¿cuál es la sal, o las sales presentes en el agua de mar?; ¿cuánta es?, ¿cómo se mide?, ¿de dónde sale la sal?; ¿tiene alguna relevancia?; ¿porqué?. Intentaremos responder estas preguntas muy brevemente.

El agua es una sustancia con características físico-químicas muy peculiares. Una de ellas es que actúa como **solvente universal**. Por ello en el agua de mar están en solución, en mayor o menor medida, prácticamente todos los elementos y sustancias que circulan por el planeta. Por ejemplo desde los elementos químicos simples (gases como el Nitrógeno y Oxígeno), hasta moléculas orgánicas complejas. Esto es válido para todas las sustancias naturales y, lamentablemente, también para las de origen artificial, muchas de las cuales constituyen poluentes.

Definición de salinidad: una historia en espiral

El contenido de sal en el agua marina se conoce como salinidad, y conceptualmente se define como la cantidad de solutos, medida en peso, en un kg de agua marina. Entonces:

$$\text{Salinidad (\%)} = \text{masa solutos (g)} / 1 \text{ kg agua mar}$$

El agua oceánica típica tiene una salinidad de casi 35‰ y el rango de variabilidad es bastante acotado: el 99% del volumen del océano tiene una salinidad entre 33,8‰ y 37,5 ‰. En el océano las variaciones importantes ocurren solamente cerca de los continentes, en los estuarios y mares marginales. Notar que el símbolo ‰ significa “por mil”, o “partes por mil”, en referencia a las unidades [g / Kg] implícitos en la definición dada. Sin embargo, como veremos en seguida la forma de medir la salinidad y las unidades para reportarla han sufrido diversas modificaciones a lo largo del tiempo.

La salinidad es una variable clave para diferentes procesos en el océano por lo que medirla con precisión es importante. La forma de medir y expresar sus valores ha cambiado radicalmente en la historia de la oceanografía. La forma antigua - que hoy puede parecer muy cruda - era evaporando un volumen (peso) conocido de agua de mar y pesando luego el material remanente; el resultado se expresaba con las unidades ya mencionadas (‰). Este método es impreciso, poco práctico y sujeto a errores importantes. A lo largo del tiempo se desarrollaron variaciones al método original que resolvían parcialmente algunos problemas (por ej., cuantificando la “clorinidad”, una aproximación análoga al método anterior pero referida únicamente al ion Cloruro, Cl⁻, el más abundante en el agua de mar).

Desde hace ya varias décadas la salinidad se mide a través del principio de inducción eléctrica, ya que la conductividad del agua se relaciona cuantitativamente con la concentración de iones disueltos. Este es un método sencillo, económico y muy preciso. En el año 1978 se llegó a un acuerdo internacional para adoptar una ecuación de estado del agua de mar (ecuación que da cuenta de la relación de la densidad con la temperatura, presión y salinidad) para la cual la salinidad del agua de mar se redefinió a partir del cociente entre la conductividad eléctrica de una muestra problema (aquella que queremos medir) y la conductividad de una solución estándar. Los valores resultantes se ajustan a la llamada **Escala Práctica de Salinidad**. Los valores de salinidad de la escala práctica son adimensionales ya que derivan de un cociente entre entidades con idénticas unidades (conductividad eléctrica). Cuando parecía que la escala práctica era el fin de esta historia, en 2010 la Comisión Oceanográfica Internacional (COI-UNESCO) redefinió la ecuación de estado para resolver leves inconsistencias internas en el sistema de ecuaciones vigentes. Y en este proceso propuso una nueva definición de la salinidad, la **Salinidad Absoluta** (S_A). S_A es la fracción de masa de materiales disueltos en una muestra de agua de mar dada su temperatura y presión; esta nueva S_A se expresa en unidades de g/ kg. Es decir, terminamos con las mismas unidades que al inicio, pero con resultados mucho más robustos y precisos.

¿Cuál es (o cuáles son) la(s) sales?, y, ¿cuál es su origen?

De todas las sustancias disueltas, aquellas presentes en mayor cantidad en el agua marina y que constituyen el grueso de la salinidad son los llamados **iones principales**, en orden decreciente: Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , Mg^+ , Ca^+ y K^+ . Estos representan más del 95% de todos los elementos disueltos en el agua de mar y tienen un comportamiento conservativo, es decir sus proporciones son constantes en todo el océano pese a que la salinidad absoluta cambie de un sitio a otro. Sin embargo, una receta de agua de mar para preparar una buena imitación de la natural superaría fácilmente los 80 ingredientes, sin contar aquellos de origen orgánico.

El origen de las sales disueltas en agua de mar es fundamentalmente la erosión, movilización y arrastre producido por el agua sobre los diferentes sustratos con los que ésta interactúa en las sucesivas etapas del **ciclo hidrológico** planetario. En este ciclo el agua se mueve por diferentes compartimientos: atmósfera, continentes, océano, sedimentos, rocas, manto terrestre y seres vivos. Esto quiere decir que si estuviéramos dispuestos a esperar el tiempo suficiente podríamos ver como una cierta molécula de agua pasa por todos estos compartimientos. ¡Pero deberíamos esperar un tiempo muy largo!: por ejemplo, el tiempo promedio que permanece una molécula de agua en el océano es cercano a los 3800 años. Por supuesto, completar todo el ciclo,

pasando por todos los compartimientos insume mucho más tiempo. Las sustancias disueltas en el agua de mar resultan entonces de la erosión de suelos y rocas continentales así como de componentes de la corteza terrestre. El vulcanismo y la actividad tectónica submarina son procesos adicionales por los cuales diversos elementos presentes en el manto terrestre se incorporan al agua marina.

Y, ¿cuál es la importancia de la salinidad?

La presencia de sales en el agua marina es de suma importancia para múltiples procesos físicos, químicos, geológicos y biológicos. En este caso señalaremos sólo dos: la circulación oceánica, y la distribución de la vida en océanos y mares. La salinidad es un factor primario que determina la densidad del agua de mar. Este efecto es descrito con precisión por la ecuación de estado; en términos generales a mayor salinidad, mayor densidad. Lejos de la superficie del mar donde el agua se mueve por acción del viento, el motor de las corrientes marinas profundas son los gradientes horizontales de densidad y presión. De esta forma grandes masas de agua se mueven por las cuencas oceánicas siguiendo los campos de presión, buscando su profundidad de equilibrio en función de la estructura vertical de densidad. Esta es conocida como **circulación termohalina**, e involucra la mayor parte del volumen del océano.

En el caso de los organismos vivos, cada especie acuática ha evolucionado adaptándose a un cierto rango de **presión osmótica** (la presión osmótica es una medida de la concentración de materiales disueltos, o solutos, en un medio líquido; es decir, podemos pensarla como una medida de la salinidad). Cuando dos líquidos con diferente presión osmótica están separados por una membrana permeable o semi-permeable al agua y sus solutos, éstos difunden través de esa membrana de forma tal que luego de cierto tiempo ambos compartimientos alcanzan idéntica concentración de materiales disueltos. Este mismo fenómeno ocurre entre el medio interno de un organismo y el medio externo (o sea, el agua de mar), y representa un potencial problema ya que puede generar deshidratación aguda (si el medio externo es más rico en solutos) o una inflamación extrema por ingreso excesivo de agua si el medio externo es más diluido. En cualquier caso la vida del organismo queda comprometida. Muchas especies han desarrollado estrategias fisiológicas que permiten mantener una condición osmótica interna diferente a la del medio externo. Otras, las menos, han desarrollado la capacidad de tolerar cambios grandes en la presión osmótica interna. Pero la mayoría no pueden sobrevivir esos cambios. Esto lo vemos en la imposibilidad de (casi todas) las especies de agua dulce para vivir en el mar, y viceversa. De esta forma, la distribución de la salinidad en el océano determina los lugares aptos para la vida de las diferentes especies.

Cuadro 5: ¿Que es la clorofila?

Es un tipo de molécula presente en los vegetales y que pertenece a un grupo de compuestos conocidos como **pigmentos fotosintéticos**. Estos pigmentos permiten captar la energía lumínica para formar compuestos orgánicos. En las células estos pigmentos, y en particular la clorofila, están unidos a proteínas formando los **fotosistemas**, las unidades funcionales que sirven de “antena” para captar la energía en forma de radiación lumínica. La energía de los fotones que inciden sobre los fotosistemas inician una “cascada de electrones” que dan lugar a la formación de moléculas de alto contenido energético (por ej., Adenosin-tri-Fosfato, ATP). De esta forma la energía lumínica se transforma en energía química. El ATP se utiliza luego para elaborar carbohidratos – azúcares simples – que es la forma de almacenar energía en el “largo plazo” y que servirá para diversos procesos metabólicos; por ejemplo, para sintetizar compuestos como proteínas, lípidos, otros. Los organismos fotosintetizadores son los responsables de generar el flujo de energía metabólicamente útil que sostiene el funcionamiento de los ecosistemas y que entre otras muchas cosas proveen nuestro alimento. Estos organismos son conocidos como **autótrofos** (*auto*= a sí mismo; *trofos* = alimento o nutrición; autótrofo = que se alimenta a sí mismo, sin consumir materia orgánica). Vale notar que existen mecanismos para generar materia orgánica por vías alternativas a la fotosíntesis, en general en ambientes “extremos” como en el mar profundo, donde nunca llega la luz.

La **clorofila-a**, una de las variantes de esta molécula, es el pigmento fotosintético más común y abundante en los vegetales y en particular en el fitoplancton, el tipo de productor primario más importante del océano. Por ello, la clorofila-a es ampliamente utilizada como indicador de biomasa autótrofa. Este absorbe energía preferentemente en longitudes de onda correspondientes a los colores azul ($\lambda \sim 430$ nanómetros; nm) y rojo ($\lambda \sim 662$ nm), y refleja los colores complementarios (en particular el verde). Por eso, el agua rica en fitoplancton se ve de color verde.

Una propiedad importante de la clorofila es que cuando absorbe la energía de un fotón, la molécula fluoresce, es decir emite energía en una longitud de onda diferente (mayor). La fluorescencia de la clorofila es la propiedad que utilizamos rutinariamente para medir su concentración en el agua de mar con gran precisión y altísima sensibilidad; así, la fluorescencia permite cuantificar la clorofila incluso en concentraciones extremadamente bajas.

La abundancia de clorofila (o biomasa de fitoplancton) en un momento y lugar determinados dependen de la interacción de factores que actúan en sentidos opuestos: crecimiento de fitoplancton (producción primaria, factor que suma), su consumo por herbívoros planctónicos (factor que resta) y el transporte por corrientes (puede sumar o restar, de acuerdo a las características de las zonas aledañas). Por ello, determinar los mecanismos que explican la variación de la clorofila requiere investigaciones específicas que consideren todos estos factores.

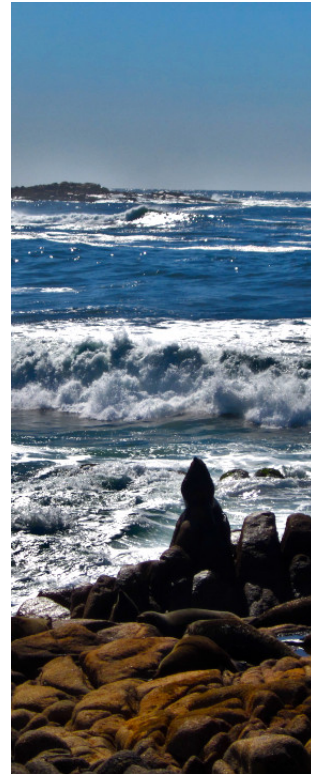
En nuestro caso la mayor concentración de clorofila no ocurre en la superficie ni en el fondo, pero en profundidades intermedias, excepto en algunos casos donde sí encontramos valores relativamente altos cerca del fondo. Esto último no tendría mucho sentido dado que allí no hay luz disponible, y por tanto no esperaríamos encontrar fitoplancton viviendo. Una pista de lo que ocurre la encontramos al observar el último gráfico, el de la turbiedad (figura 13, derecha).

Turbiedad: La turbiedad es una medida de la opacidad del agua al pasaje de la luz, y depende, entre otros, de los materiales disueltos y en forma de partículas suspendidas. Como podemos ver el comportamiento de la turbiedad es radicalmente diferente a las restantes variables: el agua parece tener baja turbiedad prácticamente todo el tiempo y en la mayor parte de la columna de agua, excepto cerca del fondo (a unos siete metros de profundidad por debajo de la superficie), donde casi siempre es muy alta. Alta turbiedad cerca del fondo es un indicador que existen sedimentos muy finos que se mantienen en suspensión (es decir, “flotando” cerca del fondo), seguramente por efecto de las corrientes y otros movimientos del agua. Este material en suspensión puede también fluorescer si se trata de fitoplancton “viejo” que sedimentó y quedó acumulado sobre el fondo, sujeto a la resuspensión por movimientos del agua. Esto explica la señal de alta fluorescencia que en algunos casos se encontró cerca del fondo y que fuera mencionado en párrafos anteriores. Pese a tener pigmentos en cierta medida funcionales es muy poco probable que estas células puedan contribuir con la producción de nueva materia orgánica para el ecosistema, ya que a esa profundidad no existe luz suficiente (ver figura 11).



2.- Diversidad del plancton en Cabo Polonio

La expresión *biodiversidad marina* suele remitir a imágenes de peces grandes y pequeños, ballenas, delfines, lobos marinos, tortugas, y quizás invertebrados como caracoles ricamente ornamentados. Ello es lógico, aquellos suelen ser los componentes más visibles y carismáticos; y ello también es correcto en el sentido que ese tipo de animales ciertamente hacen parte de la diversidad marina. Pero ésa es una imagen muy parcial, porque también es cierto que los organismos grandes y carismáticos representan una fracción ínfima y ciertamente poco representativa de la diversidad marina. En esto - como enseñó Saint-Exupéry por boca del Principito - *lo esencial es invisible a los ojos*; o al menos, al ojo desnudo. Porque la inmensa mayoría de las especies y organismos en el océano son suficientemente pequeñas para pasar desapercibidas; de hecho cuando uno entra al agua, alrededor nuestro nadan decenas, miles, o millones de pequeños organismos, aunque en general no lo notemos ni pensemos en ello.



Lobos marinos en punta rocosa frente al faro de Cabo Polonio. Foto: LRG.

Y una cosa más: como ya vimos los pequeños suelen ser los más importantes en cuanto a las funciones ecológicas básicas, fundamentales: producción de materia orgánica (entrada de energía metabólicamente útil), respiración y remineralización.



Punta rocosa e islotes frente al faro vistos desde La Calavera, un día agitado. Foto: DC.



Senecio crassiflorus habita sobre dunas de La Calvera.

La diversidad biológica de un ecosistema suele describirse mediante diferentes índices. Aquí vamos a basar nuestra descripción en un indicador muy utilizado y a la vez extremadamente sencillo: la riqueza taxonómica. La riqueza taxonómica representa la cantidad total de taxones que se encuentran en un sitio determinado (**taxón** es un término técnico que identifica a un grupo de organismos filogenéticamente homogéneo, es decir emparentados evolutivamente). Por ejemplo, la riqueza taxonómica podría equivaler al número de especies presentes en una muestra, o en una colección de muestras.

Esto puede parecer una tarea sencilla, pero no todo es como parece. En todos los ecosistemas, incluidos los marinos, el espectro de tamaños individuales de los organismos comprende un rango muy amplio, desde

una fracción de micrómetro (1 micrómetro = 1/1000 milímetro) hasta metros. En el caso del océano y en términos de grupos biológicos esto equivale a hablar de virus y bacterias, pasando por fitoplancton y zooplancton hasta peces, aves, reptiles y mamíferos marinos. Por esta razón, realizar un inventario completo de la diversidad biológica de un ecosistema implica combinar multiplicidad de métodos de colecta y análisis, y requiere de la participación de grupos numerosos de investigadores que integren especialidades complementarias. Por ello, la riqueza taxonómica absoluta de un ecosistema es un atributo que rara vez logra medirse de manera exhaustiva.



Isla de Castillos vista desde La Calvera, otro día agitado. Foto: DC.

En el presente caso nos propusimos caracterizar la diversidad biológica representada en el plancton, en organismos cuyo tamaño individual se encuentra comprendido entre aproximadamente cinco micrómetros hasta algunos pocos centímetros. En términos biológicos esto incluye una miríada de grupos taxonómicos que abarcan (pero no se limitan a) categorías como fitoplancton (microalgas), protozoarios, crustáceos (ej. copépodos), quetognatos, medusas, y primeros estadios (huevos y larvas) de diversos grupos zoológicos como cangrejos, camarones, caracoles marinos, balanos, estrellas de mar, erizos de mar, bivalvos, gusanos, e incluso peces. La forma de obtener esta información es mediante colectas o muestreos de plancton, como muestra la figura 14.

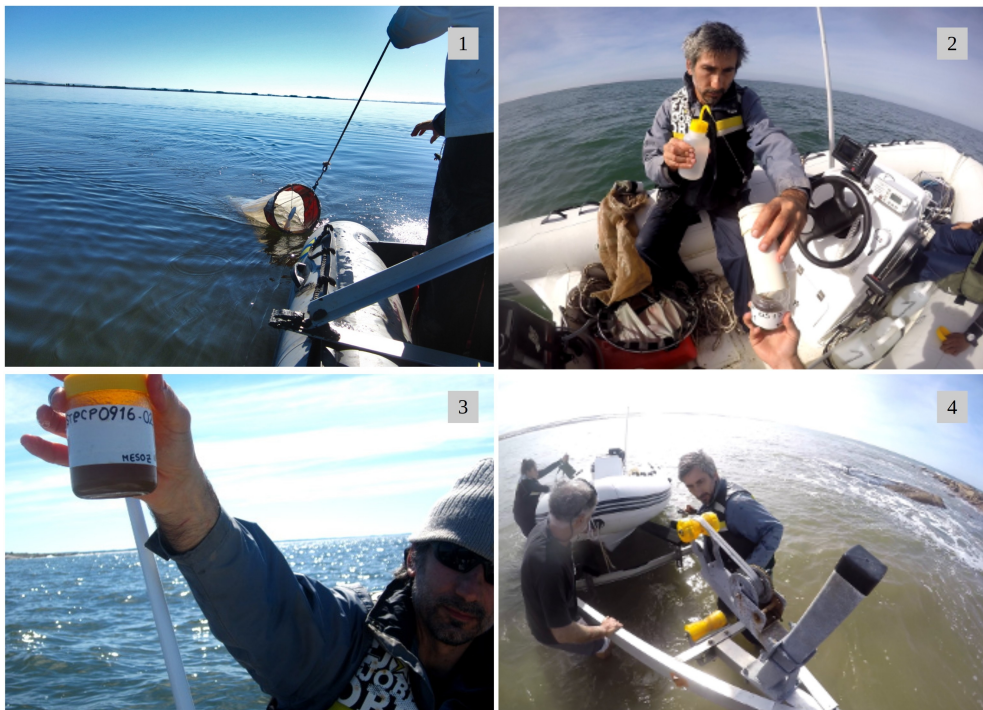


Figura 14.- Secuencia que ilustra colecta de una muestra de zooplancton en la estación en la ensenada La Calavera de Cabo Polonio. **1.** La red se arrastra por unos 3 minutos, aproximadamente; **2-** La muestra queda contenida en el colector (depósito) desde donde se transvasa a un frasco (**3**). **4.** Maniobra de izado del bote al llegar a tierra. Fotos: JG.

En consonancia con lo esperado inicialmente hemos encontrado que el plancton de Cabo Polonio tiene una riqueza biológica muy importante. Algunos números indicativos: dentro del fitoplancton y microzooplancton (con tamaños individuales entre cinco y 200 micrómetros, aproximadamente) se encontraron más de 100 especies; dentro del mesozoplancton (tamaño mayor a 0,2 mm y menor a 2 mm) unas 45 especies; y dentro de la categoría ictioplancton (ver cuadro 6: *Ictioplancton*) fueron identificadas unas 16 especies.

Los números referidos indican una riqueza de especies importante, aunque es difícil hacer una comparación rigurosa con otros ambientes de la costa uruguaya simplemente porque no existen estudios previos con la cobertura temporal ni de amplitud de grupos relevados comparables al presente estudio que puedan servir como referencia. Sin embargo, comparaciones parciales muestran que la diversidad biológica en Cabo Polonio es efectivamente mayor a la que podemos encontrar en otros sitios de la costa uruguaya como el Río de la Plata (por ej., para el caso de copépodos), el estuario del Arroyo Solís Grande (copépodos, fitoplancton), y la Laguna de Rocha (fitoplancton, copépodos, ictioplancton).



Faro y parte del poblado vistos desde el interior de La Calavera, un plácido día de otoño. Foto: DC.

Cuadro 6: Ictioplancton

El término ictioplancton (de *ictio* = relativo a los peces) hace referencia a los primeros estadios de desarrollo de los peces que típicamente forman parte del plancton, e incluye a los estadios huevo (que contiene un embrión) y larva. Ejemplos del ictioplancton registrado en aguas de Cabo Polonio pueden verse en las figuras 44 a 47.

En esta etapa los peces poseen nula o escasa capacidad de nadar activamente y por ello forman parte del plancton. Los peces, como la inmensa mayoría de los organismos marinos, tienen un **ciclo de vida complejo**. Esto quiere decir que durante su desarrollo cada individuo pasa por una serie de etapas donde el plan de organización corporal (la forma general del cuerpo y la disposición espacial de las estructuras corporales), su tamaño, estrategia de vida y relación en general con el ambiente físico y biológico son radicalmente diferentes a los de individuos adultos. Por ejemplo, la pescadilla (nombre latín: *Macrodon ancylodon*) es una especie que como adulto puede medir hasta aprox. 45 cm de largo y que se alimenta de crustáceos, gusanos y moluscos; vive en la plataforma interna, es decir en aguas de hasta aprox. 50 m de profundidad. Sin embargo su vida se inicia como un huevo de ca. 0,5 mm de diámetro del cual eclosiona una larva de unos tres mm de largo que vive como parte del plancton (en gran medida a la deriva) y su forma recuerda muy poco a la del pez adulto. Vive en aguas muy costeras, incluso en pequeños estuarios como el Solís Grande, se alimenta de microplancton y a su vez puede servir de alimento a muchos tipos de animales, incluso de algunos que podrán ser su comida cuando (si) llega al estadio adulto. Durante el transcurso de su desarrollo, esa larva pasará por una serie de transformaciones que involucran (además del tamaño y peso, obviamente) la aparición de nuevas estructuras óseas: mandíbula, dientes, espina dorsal; musculares y respiratorias asociadas a funciones fundamentales como la alimentación, digestión, osmoregulación, natación, entre otras.

Fitoplancton y microzooplancton

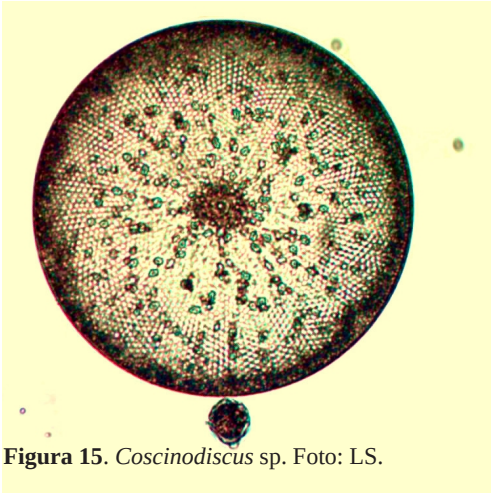


Figura 15. *Coscinodiscus* sp. Foto: LS.

En Cabo Polonio, diatomeas, dinoflagelados y ciliados fueron los grupos más abundantes dentro de esta gran categoría. Las diatomeas (Clase Bacillariophyceae, figuras 15 a 17) son responsables de buena parte de la producción que sostiene poblaciones de organismos grandes como peces, reptiles, aves y mamíferos marinos.

Fitoplancton y microzooplancton incluyen una enorme diversidad de organismos no relacionados filogenéticamente (es decir, no emparentados). Tienen en común la forma de vida planctónica y el estar muy cerca de la base de las redes tróficas, además del pequeño tamaño. La mayoría son unicelulares, y su metabolismo puede ser autótrofo, mixótrofo, o heterótrofo.

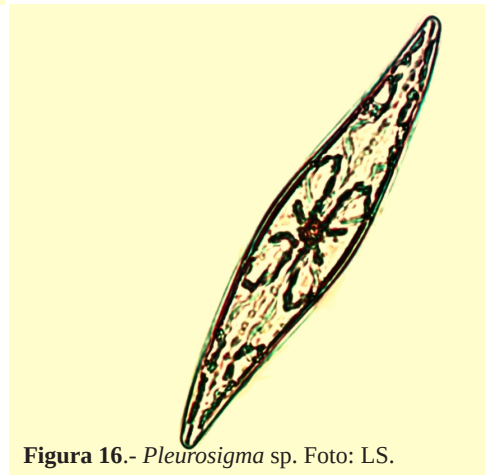


Figura 16.- *Pleurosigma* sp. Foto: LS.

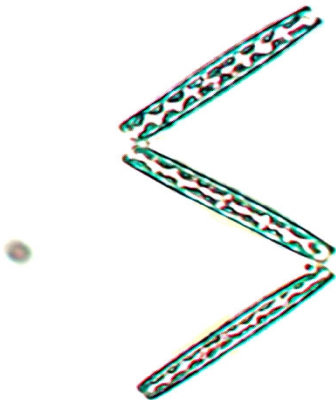


Figura 17. *Thalassionema nitzschioides*. Foto: LS.

Tradicionalmente y por un largo período las diatomeas fueron el arquetipo de fitoplancton. Hoy sabemos que son el único grupo estrictamente autótrofo dentro del fitoplancton, y desde ese punto de vista no podrían considerarse representativas del conjunto. De todas formas, aún son valoradas como un grupo esencial en las vías energéticas que sustentan la vida de los grandes consumidores.

Fitoplancton y microzooplancton

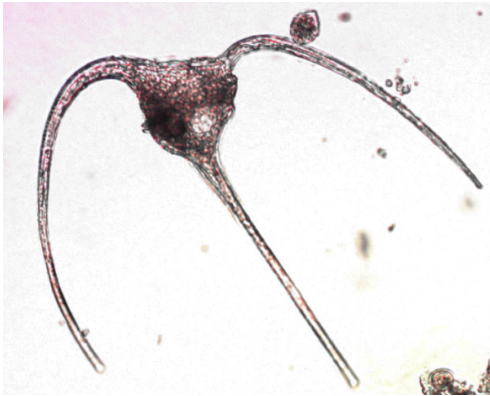


Figura 18.- *Triplos macroceros*. Foto: LS.

Dentro de este grupo se cuentan la mayoría de los representantes que pueden llegar a ser problemáticos por producir algún tipo de toxina, entre ellos los responsables de las antiguamente llamadas “mareas rojas”.

Un último conjunto a destacar son los ciliados (Phylum Ciliophora).

Ejemplos de dinoflagelados (Clase Dinophyceae) que viven en aguas de Cabo Polonio se ven las figuras 18 a 20. Este grupo contiene representantes con metabolismos autótrofos, heterótrofos y mixtos. Muchos de los componentes son especialmente llamativos por la forma de sus cuerpos y adornos presentes.

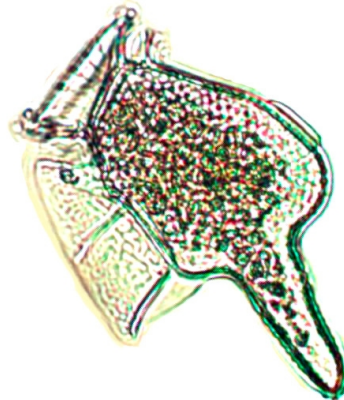


Figura 19.- *Dinophysis* sp. Foto: LS.

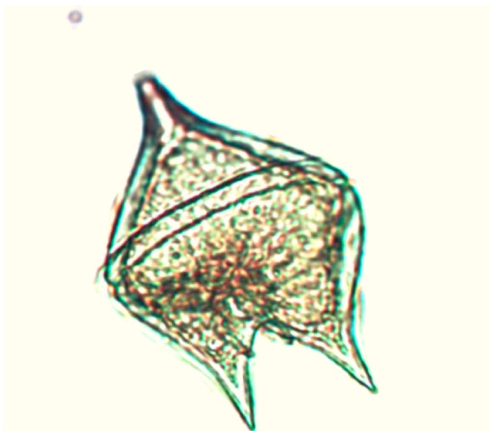


Figura 20.- *Protoperidinium claudicans*. Foto: LS.

En este coexisten dos grandes grupos : *loricados* (es decir, con lóricas, estructura externa de protección) y *desnudos*. Los primeros incluyen a los tintínidos, y es justamente la gran diversidad de formas de la lórica que hace de éste un grupo muy conspicuo. Ejemplos de tintínidos y otros ciliados pueden verse en la figura 21.

Fitoplancton y microzooplancton

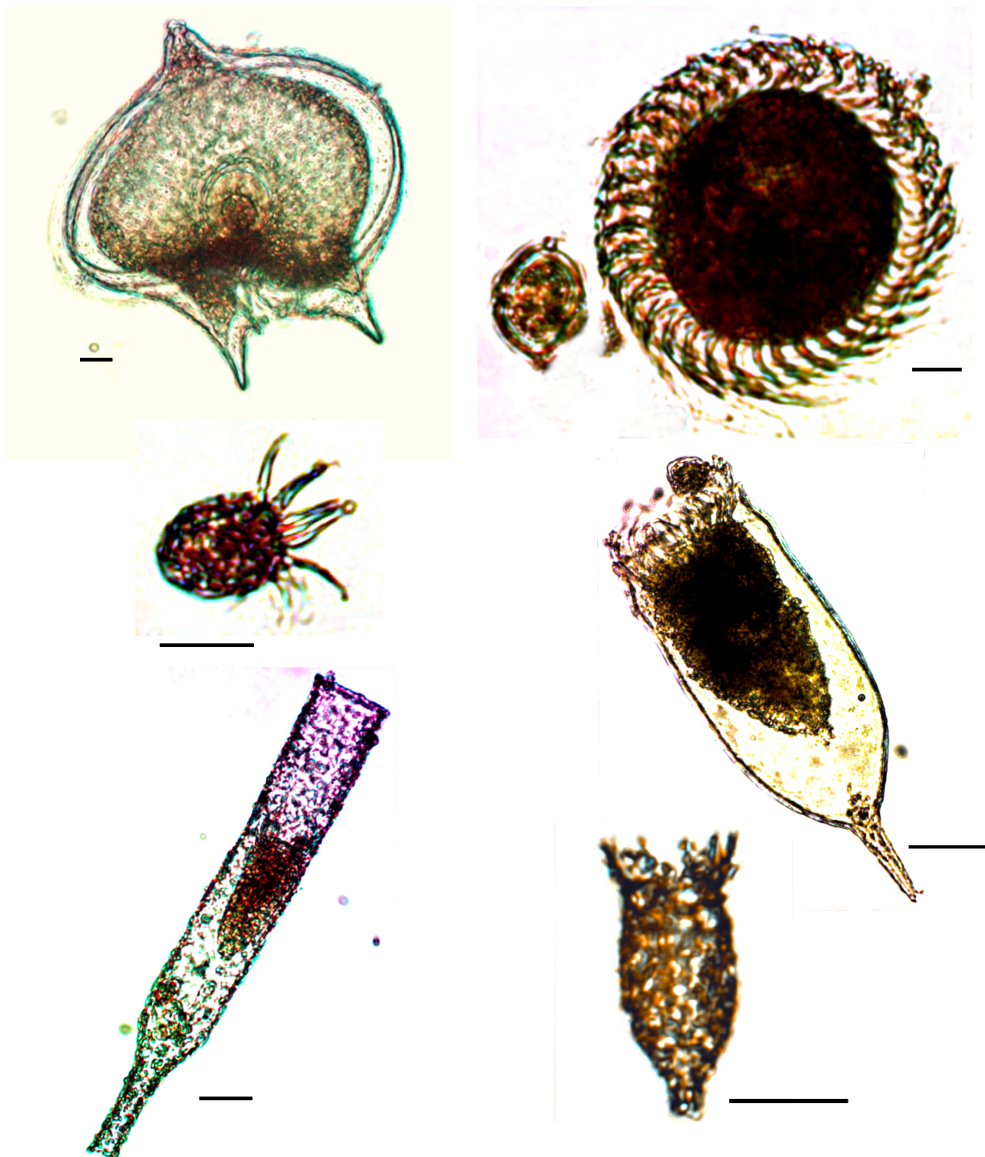


Figura 21. Microzooplancton de Cabo Polonio. De arriba hacia abajo e izquierda a derecha: dinoflagelado *Protoperidinium depressum*, ciliados *Lohmanniella oviformis*, *Tintinnopsis cylindrica*, *Strobilidium* sp., *Favella* sp. y *Tintinnopsis uruguayensis*. Identificaciones preliminares. Barras de referencia = 10 micrómetros. Fotos: LS.

Mesozooplancton



Figura 22. Larva de molusco cefalópodo de especie no determinada, probablemente de un pulpo. En el caso de los cefalópodos, estas larvas reciben el nombre de “**paralarva**”. El ejemplar en la fotografía mide aprox. 2.5 mm de largo. Foto: LRG.

El mesozooplancton es un grupo muy heterogéneo que incluye organismos cuyo tamaño está comprendido entre 0.2 y 2 mm. Algunas generalizaciones válidas son: todos sus representantes son metazoarios (es decir, animales multicelulares, con tejidos y órganos diferenciados, con un plan corporal relativamente complejo, etc.), y todos son estrictamente heterótrofos.

Este grupo juega un papel pivotal en el funcionamiento de los ecosistemas marinos ya que conecta la base de las redes marinas (productores primarios y microzooplancton) con los organismos mayores, por ejemplo peces.

Mesozooplancton

Luego de colectar las muestras, el trabajo se centra en identificar y enumerar los organismos presentes. Las fotografías en esta página representan dos ejemplos de muestras en vista general, a bajo aumento (el mismo en ambos casos). Las dos fueron colectadas con idéntica metodología, en el mismo punto geográfico, en diferentes momentos del año. Notar las diferencias en la densidad, tipo y tamaño de organismos presentes. En las siguientes páginas vemos en más detalle algunos grupos encontrados.

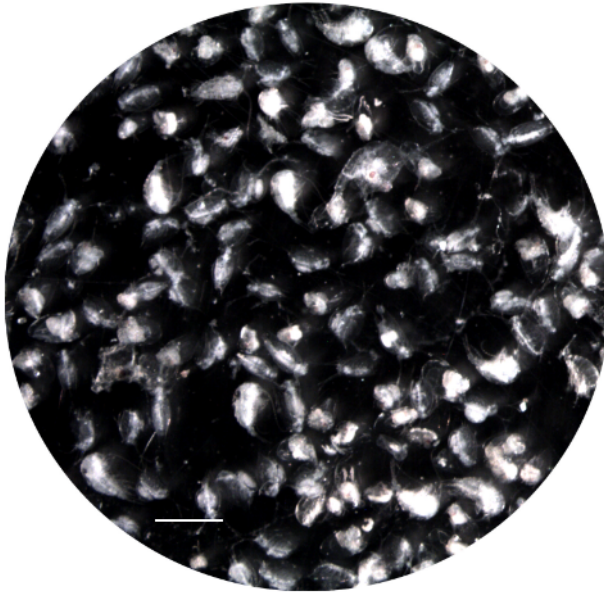
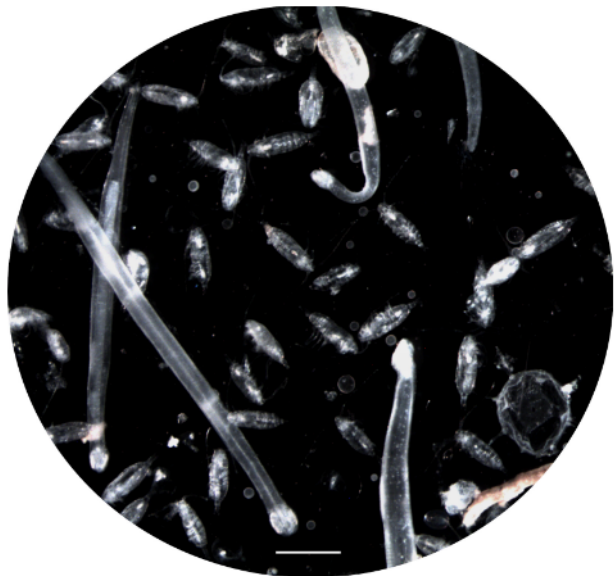


Figura 23. Vista general de una muestra de plancton tomada con una red de 500 μm en la Ensenada La Calavera, Cabo Polonio, en abril de 2019. Con un poco de atención puede observarse un predominio de copépodos pequeños (mayormente del genero *Temora*), algunos cladóteros y unas pocas larvas tipo zoea (de crustáceos como cangrejos o camarones). La barra de referencia es de 1 mm. Foto: DC.

Figura 24. Vista general de una muestra de plancton tomada con una red de 500 μm en la Ensenada La Calavera, Cabo Polonio, en julio de 2019. También en este caso puede observarse un predominio de copépodos un poco más grandes (individuos adultos de los generos *Acartia*, *Centropages* y *Temora*), “gusanos flecha” (*Sagita* sp.) y alguna que otra medusa (probablemente *Liriope*). La barra de referencia es de 1 mm. Foto: DC.



Mesozooplankton

En esta página pueden observarse tres especies de copépodos. Como vimos, este es un grupo dominante en el plancton marino. De hecho los copépodos son el grupo de metazoarios más abundante en los océanos, y probablemente en todo el planeta.



Figura 25.- *Labidocera fluviatilis* es una especie de tamaño mediano a grande que vive en aguas marinas costeras y tolera tenores de salinidad relativamente bajos. Una particularidad de esta especie es que ocasionalmente se asocia al **neuston**, la microcapa en la interface entre agua y aire. Escala 1 mm. Foto: DC.

Figura 26.- *Acartia tonsa* es quizás la especie más representativa y conocida del zooplancton costero uruguayo, y también de otras partes del mundo. Su característica más notable es la tolerancia a rangos muy amplios de salinidad, casi entre agua dulce y agua completamente marina. Escala 1 mm. Foto: DC.



Figura 27.- *Corycaeus amazonicus* es un pequeño copépodo que, pese a su nombre, es bastante común también en nuestras aguas costeras. Escala 500 μm . Foto: DC.

Mesozooplancton

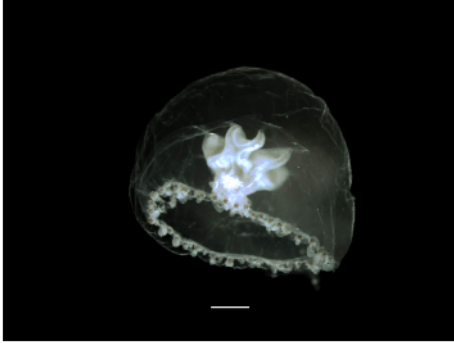


Figura 28. Medusa de la especie *Proboscicactyla mutabilis* colectada en Cabo Polonio. Escala 1 mm. Foto: DC.

Las medusas son típicos representantes del llamado “plancton gelatinoso”, en referencia a la consistencia de su cuerpo que recuerda a... una gelatina, por supuesto. Las medusas son importantes depredadores pasivos que se alimentan de zooplancton, incluyendo pequeños invertebrados, huevos y larvas de peces, e incluso (las más grandes) de peces adultos. Las medusas pueden ser de pequeño tamaño (unos pocos milímetros, como las que muestran éstas fotos), o más grandes como las que a veces se encuentran en las

playas; o incluso gigantes cuyos tentáculos alcanzan decenas de metros!. Las medusas son un grupo muy interesante desde diversos puntos de vista, pero destacamos dos características sobresalientes: una es la presencia de un tipo de células especializadas llamadas *cnidocitos* capaces de disparar una estructura tipo estilete que inyecta una toxina y es responsable de las bien conocidas “picaduras”.



Figura 29. Medusa de la especie *Liriope tetraphylla* colectada en Cabo Polonio. Escala 1 mm. Foto: DC.

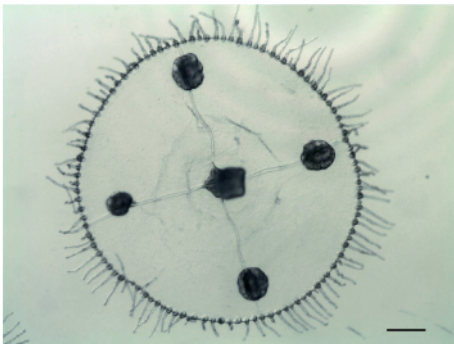


Figura 30. Medusa colectada en Cabo Polonio, probablemente perteneciente al género *Obelia*. Escala 1 mm. Foto: DC.

Otra característica es la capacidad para producir “explosiones poblacionales” (*blooms*) que permiten alcanzar abundancias sorprendentemente altas en tiempos cortos. Cuando esto ocurre, la combinación de ambas características puede suponer un problema para los habitantes del océano o para los visitantes ocasionales como los bañistas... pero para ellas definitivamente no.

Mesozooplancton

Buena parte de la diversidad del plancton de Cabo Polonio resulta de la presencia de meroplancton. En ésta y siguientes páginas vemos ejemplos de larvas de cangrejos, camarones, estrellas de mar y más adelante peces.

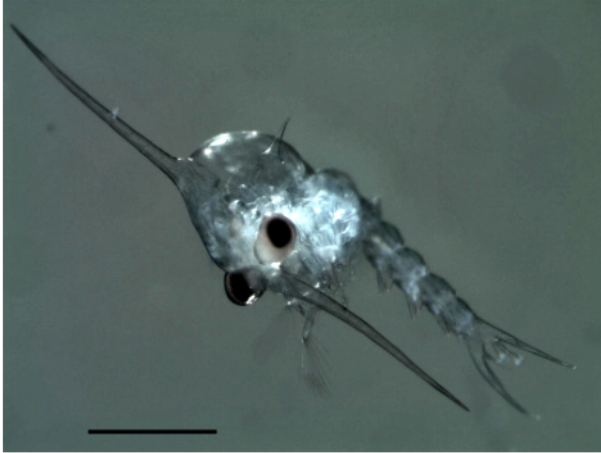


Figura 31. Larva tipo **zoea**, común entre crustáceos decápodos (ej., cangrejos, camarones). Representa una fase importante para la dispersión de las poblaciones. Elementos característicos de estas larvas son una región cefálica grande con ojos bien desarrollados y espinas. Escala 1 mm. Foto: LRG.

Figura 32. **Megalopa**, estadio donde ya es posible reconocer el tipo de organismo al que dará lugar. En esta etapa el individuo deberá tomar la decisión de “asentarse”: elegir el lugar donde pasará a vivir asociado a los sedimentos. Para ello capta señales físicas y químicas del fondo. Escala 1 mm. Foto: LRG.

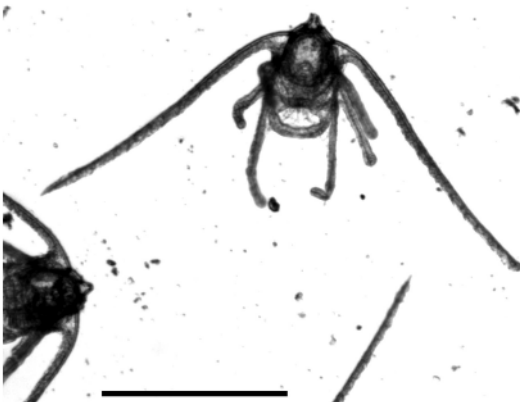


Figura 33. Larvas tipo **Pluteus** asemejan una nave espacial en ciertas películas de ciencia ficción de los '80; en realidad son estadios de desarrollo de equinodermos, como estrellas y erizos de mar. En ellos vemos un buen ejemplo de cambio radical en el plan de organización corporal entre estadio larval (simetría bilateral) y adulto (simetría radial). Escala 500 μm . Foto: LRG.

Mesozooplankton



Figura 34. Poliqueto planctónico del género *Tomopteris*. Los poliquetos son gusanos mayoritariamente bentónicos, pero también los hay planctónicos. Quizás puedan parecer poco *sexys*, pero en su favor puede decirse que es un grupo de gran importancia funcional: actúan como remineralizadores de la materia orgánica, oxigenan el sedimento, son alimento para peces e invertebrados, y resultan útiles como indicadores de calidad ambiental. Escala 1 mm.

Foto: LRG.

Figura 35. Decápodo **sergéstido**, individuo juvenil. Los sergéstidos son relativamente grandes y pueden representar una buena parte de la biomasa del zooplancton, especialmente en aguas oceánicas, lejos de la costa. Son fuente de alimento para peces, ballenas y en algunas regiones también para humanos. Escala 1 mm. Foto: DC.



Figura 36. Individuo juvenil de la especie *Promysis atlantica*, de un grupo denominado **misidáceos**. Estos alternan entre la columna de agua y los sedimentos. Se trata de un grupo muy abundante e importante en las redes alimentarias costeras, donde conectan flujos de energía bentónicos y planctónicos. Escala 1 mm. Foto: DC.

Mesozooplancton

Figura 37. Cladóceros del género *Podon*. Los cladóceros son un grupo importante en aguas dulces, pero pocas especies se han adaptado a la salinidad. Particularidades interesantes de los cladóceros: los del género *Podon* son depredadores y tienen un ojo relativamente complejo (¿cuál es el ojo?, esa estructura globular, arriba) que probablemente ayude a capturar presas. Escala 250 μ m. Foto: LS.

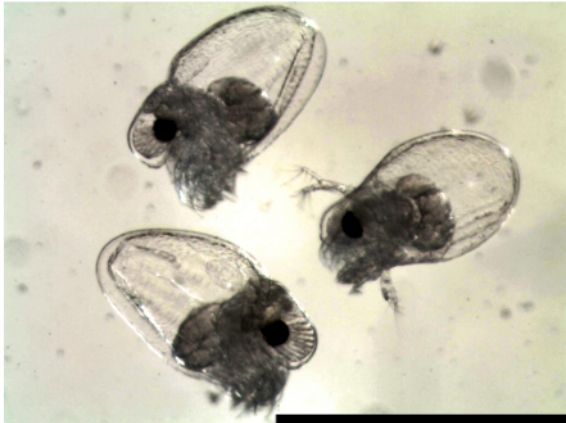
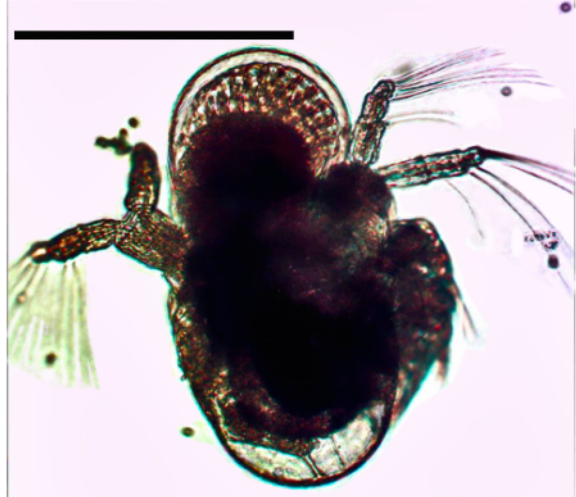
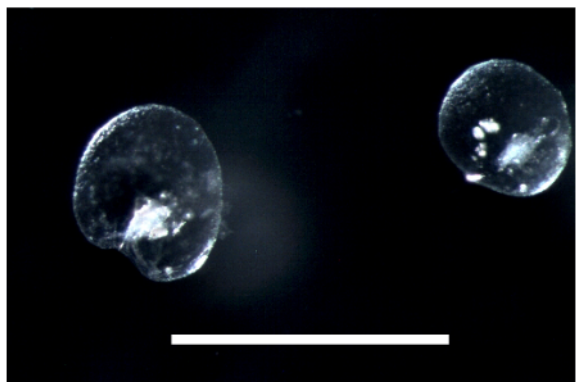


Figura 38. Cladóceros del género *Evadne*. Otro aspecto interesante de los cladóceros: son partenogénéticos, pueden reproducirse sin intervención del sexo, lo que permite tasas de crecimiento poblacional muy altas. Bajo condiciones favorables una población está conformada casi íntegramente por hembras partenogénéticas. En condiciones desfavorables aparecen machos, ocurre reproducción sexual y producen huevos de resistencia que sobreviven en el fondo a la espera de tiempos mejores. Escala 1 mm. Foto: LRG.

Figura 39. Noctiluca scintillans, bien conocida por ser uno de los responsables de la fosforescencia en playas, cuando aparecen en grandes cantidades. Estrictamente las noctilucas son dinoflagelados unicelulares, más cercanas al “fitoplancton”. Pero éstas no tienen nada de vegetal ya que son depredadoras activas sobre plancton pequeño. Escala 1 mm. Foto: DC.



Mesozooplankton

Figura 40. Ctenóforo (probablemente *Pleurobrachia pileus*). Los ctenóforos son planctónicos y exclusivamente marinos. Son depredadores que nadan lentamente y capturan a sus presas de forma pasiva, por contacto con sus tentáculos. Su cuerpo es transparente, blando y con alto contenido de agua por lo que forman parte del “plancton gelatinoso”. Ocho filas longitudinales de cilias locomotoras (*ctenos* = peines) sirven para nadar y, de paso, les dan su nombre. Escala 1 mm. Foto: LRG.

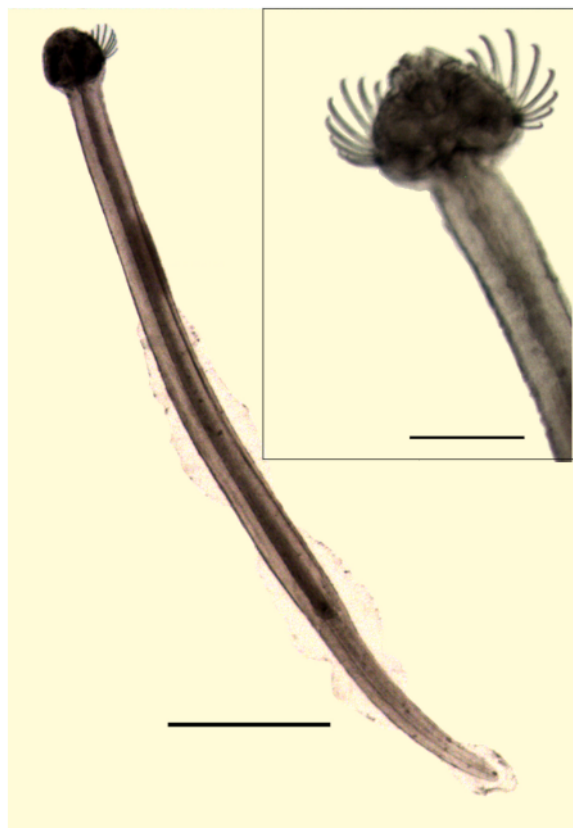


Figura 41. Quetognato o “gusano flecha” de especie aún no determinada. Los quetognatos son un grupo exclusivamente marino y planctónico. También los quetognatos son fuertes depredadores, en este caso depredadores al acecho: se mantienen inmóviles y atacan mediante un impulso corto y a gran velocidad. No tienen ojos, pero perciben su entorno y la presencia de presas gracias a hileras longitudinales de cilias sensitivas sobre su cuerpo (las cilias son pequeños “pelos” o proyecciones dérmicas sensibles a señales hidrodinámicas a microescala). La presa es capturada en un ataque fulminante y sostenida por la corona de ganchos o *quetas* en torno a la cabeza (de ahí el nombre del grupo, ver detalle en foto inserta), al tiempo que le inyectan una sustancia paralizante para ser ingerida entera; toda una belleza. Escala 1 mm; en el inserto la escala es de 250 μm . Fotos: DC.

Mesozooplancton

Figura 42. Anfípodo de la familia **Hyperidae**, de especie aún no determinada. Todos los anfípodos hipéridos son marinos, planctónicos y se caracterizan por tener ojos grandes y compuestos. La mayoría de los hipéridos son parásitos de plancton gelatinoso como medusas y salpas. Escala 1 mm. Foto: DC.



Figura 43. Pterópodo, probablemente *Creseis* sp. Los pterópodos (de *ptero*= alas y *podos* = pie; o sea pies alados, o pies como alas) son moluscos planctónicos de singular belleza (a la cual esta foto obviamente no le hace justicia). A diferencia de la gran mayoría de sus parientes que viven dentro o sobre los sedimentos o rocas (caracoles, almejas, etc.), los pterópodos son particularmente gráciles, delicados, y en ellos la concha ha desaparecido o, como en este caso, se ha transformado en una estructura muy delgada y transparente. Escala 1 mm. Foto: DC.

Ictioplancton

Huevos y larvas de peces hacen parte de una fracción del meroplancton conocida como **ictioplancton** (ver cuadro 6).



Figura 44. *Menticirrhus americanus*

es el nombre latín de la burriqueta. Las burriquetas son peces de hábitos costeros que viven en aguas de hasta 50 m de profundidad, aproximadamente. Son bien conocidos por los pescadores deportivos. Escala 1 mm. Foto: LRG.

Entre las especies de peces registradas como ictioplancton en Cabo Polonio hay unas cuantas bien conocidas como la pescadilla de calada o real (*Macrodon ancylodon*), la corvina negra (*Pogonias cromis*), la burriqueta (*Menticirrhus americanus*), el mero (*Acanthistius brasiliensis*), la anchoa (*Anchoa mitchilli*), y otros menos conocidos como la lengüita (*Symphurus plaguista*), el pez aguja (*Syngnathus folletti*), entre otros. La diversidad de huevos y larvas es un indicador de que la zona costera de Cabo podría ser muy relevante para el ciclo de vida de múltiples especies.

Ictioplancton

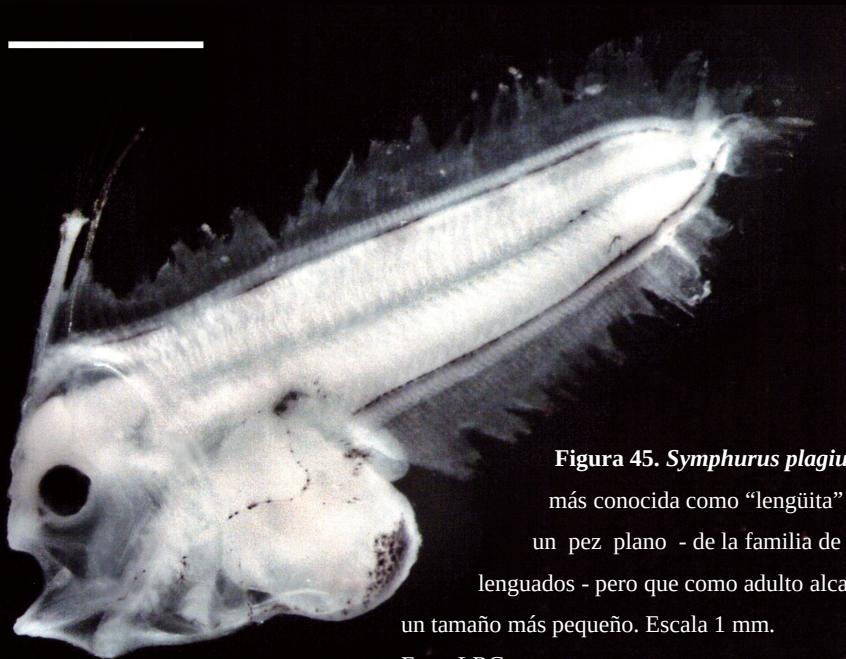


Figura 45. *Symphurus plagiusa*, más conocida como “lengüita” es un pez plano - de la familia de los lenguados - pero que como adulto alcanza un tamaño más pequeño. Escala 1 mm.

Foto: LRG

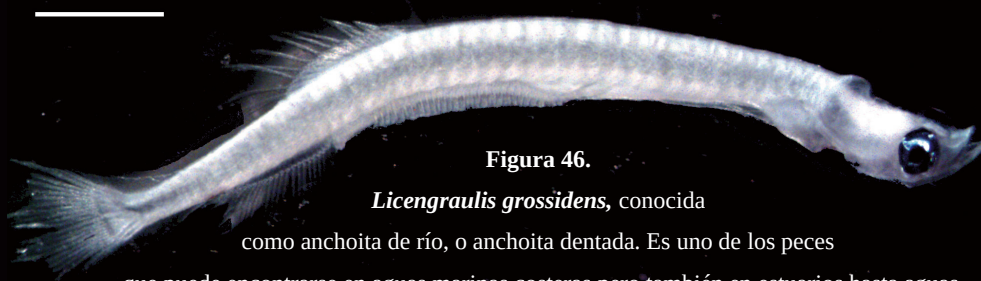


Figura 46.

Licengraulis grossidens, conocida como anchoita de río, o anchoita dentada. Es uno de los peces que puede encontrarse en aguas marinas costeras pero también en estuarios hasta aguas dulces, o casi. Escala 1 mm. Foto: LRG.

Ictioplancton

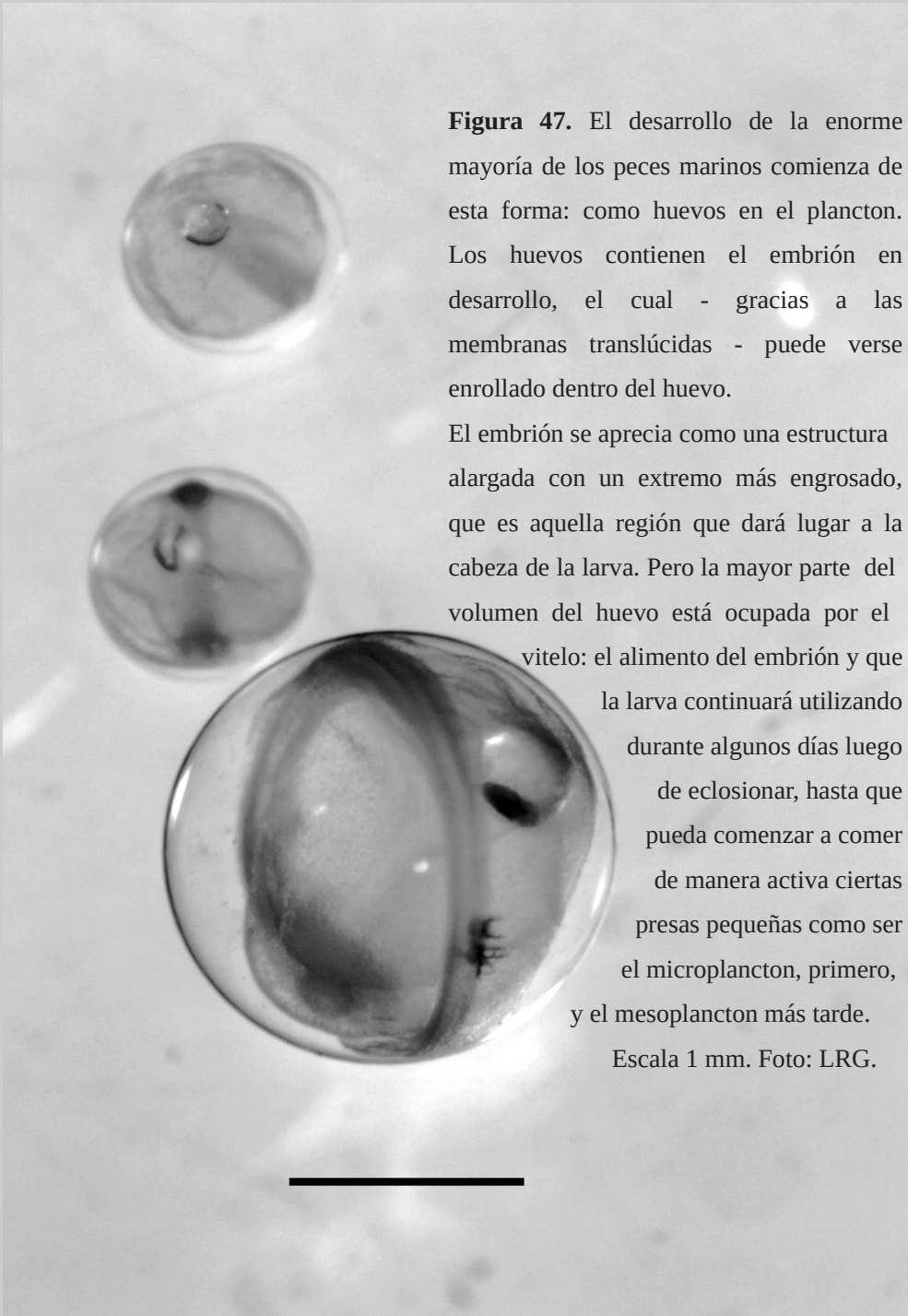


Figura 47. El desarrollo de la enorme mayoría de los peces marinos comienza de esta forma: como huevos en el plancton. Los huevos contienen el embrión en desarrollo, el cual - gracias a las membranas translúcidas - puede verse enrollado dentro del huevo.

El embrión se aprecia como una estructura alargada con un extremo más engrosado, que es aquella región que dará lugar a la cabeza de la larva. Pero la mayor parte del volumen del huevo está ocupada por el

vitelo: el alimento del embrión y que

la larva continuará utilizando

durante algunos días luego

de eclosionar, hasta que

pueda comenzar a comer

de manera activa ciertas

presas pequeñas como ser

el microplancton, primero,

y el mesoplancton más tarde.

Escala 1 mm. Foto: LRG.

La zona marina costera frente a Cabo Polonio parece albergar una riqueza importante en el plancton. Y no sólo eso, en muchos casos los organismos encontrados corresponden a especies que son fuente de alimento muy apreciado y de clara importancia comercial, como la pescadilla, corvina negra, anchoa, lenguado, burriqueta, entre otros. La presencia de estas especies durante sus etapas embrionaria y larval podría señalar la importancia de esta zona para el mantenimiento de las respectivas poblaciones, aunque esto es algo cuyo estudio que debe profundizarse. En resumen, y tomados en conjunto, los resultados dan cuenta de una importante diversidad biológica en el plancton de las aguas costeras de Cabo Polonio – mayor a la conocida hasta el momento para otros sectores de la costa uruguaya – y de la presencia de especies que resultan de particular interés por su importancia para actividades económicas y/ o recreativas como la pesca.

3.- El metabolismo pelágico frente a Cabo Polonio

El concepto de metabolismo de un ecosistema puede ser entendido por analogía al metabolismo de un ser vivo, y refiere a las características y forma en la que los flujos de energía son canalizados a través del ecosistema u organismo, y que sustentan su funcionamiento (ver cuadro 2: ***¿qué es el metabolismo ecosistémico?***). En el caso de un individuo, el ingreso de energía ocurre bajo forma de consumo de alimento; en un ecosistema el ingreso de energía corresponde a la producción primaria desarrollada por los vegetales, que en el océano son fundamentalmente microalgas y ciertas bacterias autótrofas (cianobacterias). Una segunda forma en que puede ingresar energía metabólicamente útil es la importación de materia orgánica desde ecosistemas adyacentes, por ej., desde el continente (en el caso de los sistemas marinos costeros).

Algunas preguntas relevantes sobre el metabolismo a nivel del ecosistema refieren a la cuantificación del flujo de entrada de energía y la forma en que ésta se reparte entre diferentes poblaciones de organismos; y dentro de estas poblaciones, cuánta energía se canaliza para el mantenimiento de las estructuras corporales, cuánto se utiliza para crecimiento, para reproducción, cuánta se deriva en productos de deshecho, y cuál es la eficiencia con la que se desarrollan estas u otras funciones. En el presente caso nuestro interés estuvo orientado a caracterizar el balance metabólico del **sistema pelágico**.

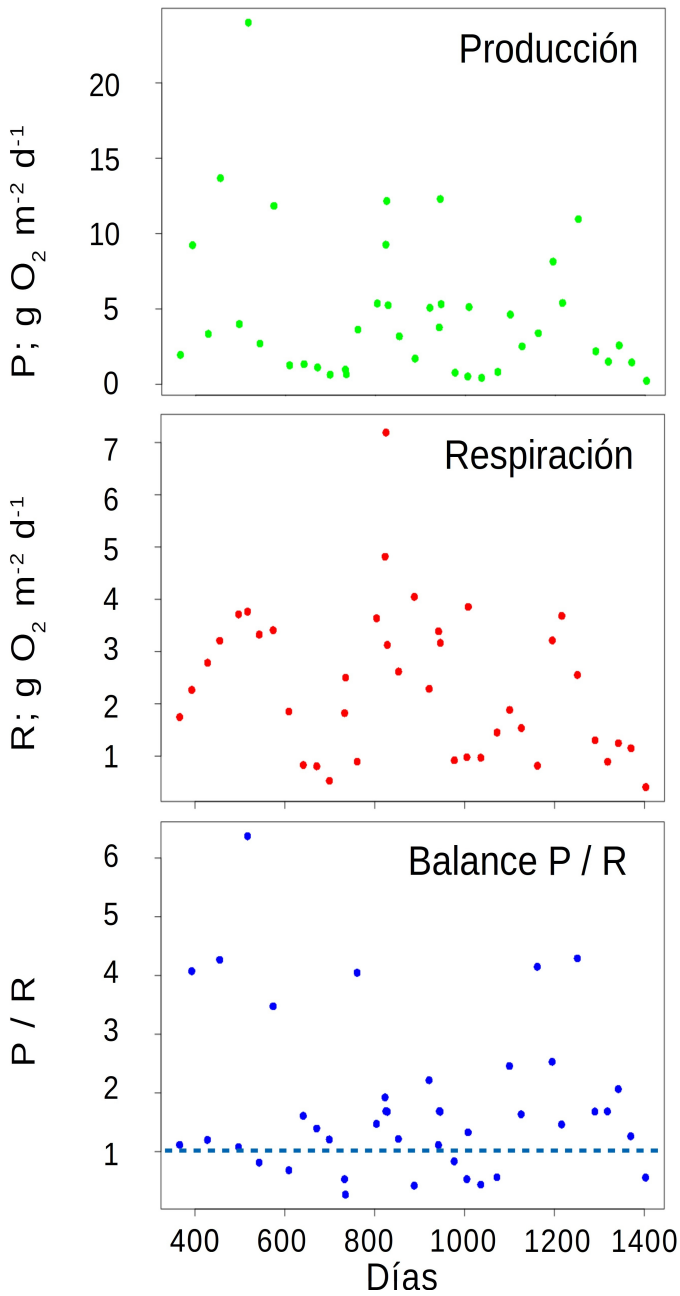
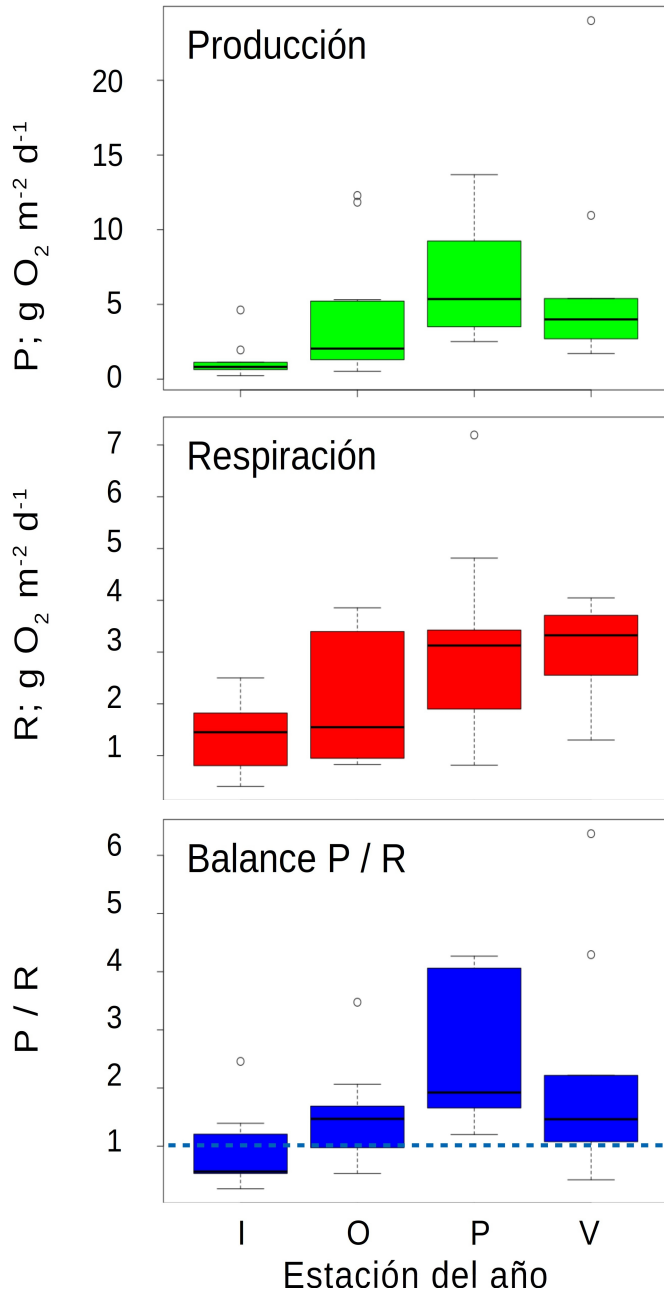


Figura 48. Producción primaria total o bruta (arriba), respiración (al centro) y balance P/R (abajo) en la ensenada de La Calavera entre 2017 y 2020. La línea punteada en el gráfico inferior indica el valor $P/R = 1$, o la situación de balance neutro. Los resultados que se ven aquí representan tasas integradas verticalmente en toda la columna de agua, es decir entre superficie y el fondo. El tiempo está medido como días corridos desde setiembre de 2017.

Figura 49.- Gráfico de cajas que compara la producción primaria total o bruta (arriba), respiración (al centro) y balance P/R (abajo) en la ensenada de La Calavera de Cabo Polonio. Los valores corresponden al promedio de datos de tres años (2017 – 2020) Las barras de error representan los desvíos estándar. La línea punteada en el gráfico inferior indica el valor $P/R=1$, o la situación de balance neutro. I: invierno, O: otoño, P: primavera, V: verano.



Los resultados obtenidos demuestran que el sistema pelágico costero frente a Cabo Polonio tiene un comportamiento de tipo autótrofo neto (figuras 48 y 49); es decir, el promedio general de tres años de observaciones indica que el cociente entre la producción primaria P y la respiración R de toda la columna de agua (**cociente P:R**) es significativamente mayor a 1. Este resultado se verifica consistentemente para cada uno de los años estudiados.

La variabilidad del cociente P:R a lo largo del tiempo muestra que el exceso de producción en relación a la respiración cambia a lo largo del año; donde en general los meses de primavera y verano (en ese orden) tienen un mayor exceso de producción que aquellos correspondientes a otoño e invierno (figura 49).



Naturaleza muerta/ Naturaleza viva en La Calavera. Un organismo muerto es también una oportunidad de vida. Esta carcasa de lobo marino fue sustento para invertebrados llegados desde el mar y desde tierra, de insectos que depositaron sus huevos en ella y aseguraron una nueva generación, de aves que se nutrieron de la carcasa y de sus huéspedes. Y también de miles de millones de bacterias. Ciertos componentes del lobo habrán infiltrado hacia la arena, llegado a la napa superficial y escurrido con ella al mar, ya como material inorgánico. Así, en poco tiempo los procesos bio-físicos ayudaron a despejar la playa de restos malolientes y desagradables a la vista, ¡todo un servicio ecosistémico!. En un mirada más profunda se aprecia que los constituyentes de lo que una vez fue un lobo marino pasaron a formar parte de otros organismos que se entierran, arrastran, caminan, vuelan o nadan hacia sitios más o menos distantes donde, a su tiempo, sus propios cuerpos pasarán a ser parte de otros seres, o de compartimientos inanimados. Este es un ejemplo ínfimo de cómo los ciclos de los elementos vinculan a los seres vivos entre sí, y a éstos con los restantes componentes del planeta: una de las bases materiales de la unidad funcional de la naturaleza. Foto: DC.

Los resultados referidos al balance metabólico tienen implicaciones relevantes: el exceso neto de biomasa producida por el sistema marino costero frente a Cabo Polonio representa la biomasa exportable que puede subsidiar energéticamente (alimentar) a otros sub-sistemas marinos, por ejemplo, aquellos más alejados de la costa. O también, que puede ser acumulada dentro de los sedimentos. En este último caso, el exceso de producción puede contribuir al secuestro de carbono, el cual es uno de los mecanismos por los cuales el océano remueve el exceso de carbono en la atmósfera producto de las actividades humanas, y por tanto contribuye con la regulación del clima. Si estos resultados fueran generalizables para toda la costa marina uruguaya representarían evidencia firme de que estos ecosistemas, que hacen parte del territorio que habitamos, están funcionando en el sentido de contribuir con la mitigación de uno de los problemas globales más acuciantes: el cambio climático. Definitivamente estas son buenas noticias. Sin embargo, aún es muy temprano para celebrar: la generalización de estos resultados no es tarea trivial y va a requerir importante esfuerzo y recursos sostenidos en el tiempo.



La Juanita y La Nena - las barcas de pesca artesanal que operan desde Cabo Polonio - descansan sobre el extremo SW de la playa La Calavera una tarde tranquila de otoño. Foto: DC.

Perspectivas

El proceso de investigación científica tiene mucho de inabarcable: una investigación exitosa ofrece respuestas a las interrogantes que le dieron origen. Algunas veces estas respuestas son las esperadas; otras veces nos señalan que estábamos equivocados y que las explicaciones que creíamos más acertadas son erróneas. En contra de lo que pudiera parecer lógico, estos últimos suelen ser los casos más interesantes, ya que obligan a repensar la manera de entender el problema bajo análisis y ello puede dar lugar a ideas y resultados diferentes, particularmente innovadores. Por otra parte - las más de las veces - por cada respuesta encontrada se plantean nuevas preguntas que nos desafían y exigen continuar con el trabajo.

En nuestro caso la situación fue mixta: algunos resultados coincidieron con lo esperado, por ejemplo aquellos relacionados a la diversidad del plancton. En otros casos los resultados mostraron ciertos desvíos respecto de lo esperado: *a priori* pensábamos que el metabolismo pelágico tendría un comportamiento global neutro o marginalmente autótrofo, alternando períodos autótrofos (primavera hasta otoño temprano) y otros netamente heterótrofos (parte del otoño e invierno). Como vimos, los resultados señalan que el balance anual es fuertemente autótrofo, y sólo durante el invierno predominan condiciones levemente heterótrofas.



Detalle de playa La Calavera, Cabo Polonio. Vista desde muy cerca el sustrato en algunos sectores de playa está formado por un manto de conchillas. Este es un ejemplo de cómo la vida contribuye a moldear la estructura del ambiente físico. Foto: DC.

A partir de estos resultados surgen diversas interrogantes. Algunas ya esbozadas al final de la sección anterior tienen que ver con dilucidar si el comportamiento observado en Cabo Polonio es representativo de lo que ocurre en el mar costero uruguayo. A pesar de ser un litoral costero relativamente corto en extensión lineal (unos 600 km de línea de costa), éste se compone de sectores donde predominan condiciones ambientales contrastantes: pensemos en las costas del Río de la Plata cerca de Montevideo *versus* las costas Atlánticas de Rocha.

Tan relevante como las diferencias a lo largo de la costa son aquellas en el sentido costa – océano, ya que al alejarnos de la costa y aumentar la profundidad, la fracción total de la columna de agua que recibe irradiación suficiente para la producción primaria cambia drásticamente, y con ella los balances entre producción y respiración. Paralelamente, un problema crucial tiene que ver con los procesos ambientales que modulan la variabilidad de la producción, la respiración y su balance.

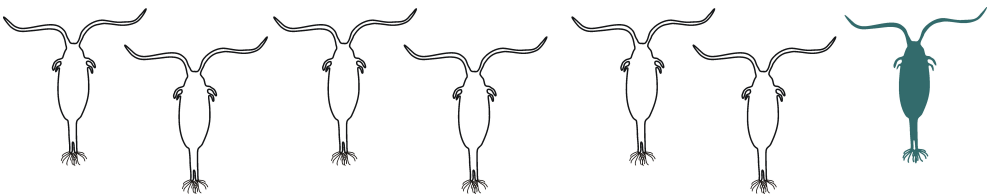
Existen diferentes mecanismos que hipotéticamente podrían afectar el balance entre estos procesos y que podríamos agrupar en: i.- aquellos relacionados a la circulación en escalas medias (por ejemplo, ¿cómo afecta al balance entre producción y respiración el flujo de agua y nutrientes aportados por el Río de la Plata, la circulación forzada por el viento, y los cambios de masas de agua y temperatura?); ii.- aquellos relacionados a procesos locales de interacción entre mar y continente (por ej., ¿cómo afectan las descargas de las pequeñas cuencas costeras, y aquellos aportes antrópicos causantes de contaminación y polución?; y iii.- aquellos vinculados a procesos de regulación interna y auto-organización a nivel del ecosistema (por ej., relaciones de depredación, y flujos biogeoquímicos no trofodinámicos como el hundimiento de la materia orgánica por efecto de la gravedad).



Cabo Polonio, faro y parte del centro poblado vistos desde las dunas de La Calavera.
Foto: LRG.

Al respecto, preguntas relevantes refieren a la conexión entre usos del suelo en las cuencas costeras, la calidad del agua dulce que estas cuencas descargan en el mar, la estructura de las comunidades y la actividad del plancton marino, la producción y la respiración. Existen fundamentos para pensar en la posibilidad de vínculos causales entre los procesos mencionados, aunque con el conocimiento disponible no sea posible tener certeza acerca de la forma ni la magnitud de la respuesta de las comunidades marinas frente a este tipo de forzantes en la costa uruguaya.

Otras preguntas guardan relación con el uso que hacen de los ecosistemas costeros algunas especies de particular interés, por ejemplo aquellas que son fuente directa de alimento. Estas y otros tipo de preguntas podrán ser abordadas en futuras investigaciones; para ello será muy importante contar con devoluciones e insumos de la sociedad en general que permitan alinear expectativas e intereses acerca de lo que debería ser priorizado en el trabajo científico¹.



1 Comentarios pueden ser enviados a Danilo Calliari, dcalliar@fcien.edu.uy



Impreso y encuadernado en Mastergraf SRL
Bvar. Artigas 4678 - Tel.: 2303 4760
CP 11700 - Montevideo - Uruguay
e-mail: administracion@mastergraf.com.uy
Depósito Legal: 379.907
Comisión del Papel
Edición amparada al Decreto 218/96

Oceanografía Biológica de Cabo Polonio: apuntes sobre investigaciones recientes

ofrece una muy rápida recorrida por los orígenes de la oceanografía como área del conocimiento científico y las actividades que investigadores de la Facultad de Ciencias y del Centro Universitario Regional del Este, ambos de la Universidad de la República, desarrollan en la zona marina costera de Cabo Polonio.

Cabo Polonio es interesante desde diversos puntos de vista: histórico, arqueológico, sociológico, paisajístico, ecológico. Durante el siglo XX fue epicentro de la explotación de la mayor población de lobos marinos del Atlántico Sur. Rastros de ese pasado se conservan en la infraestructura de la Base que alojaba a los trabajadores: comedor-cocina, galpones y dormitorios, caldera industrial y un gran bote a remo; implementos para la faena: garrotes, cuchillas, estaqueaderos de cueros... Aún es posible encontrar en ciertos boliches o almacenes del Cabo a veteranos de aquellas lides y - con un poco de suerte - aprender de sus historias.

El valor paisajístico de Cabo Polonio ha impulsado el crecimiento del centro poblado gracias al influjo del turismo estival y de no pocos que llegaron de visita y decidieron quedarse. Esto plantea enormes desafíos para la conservación de un sitio que no dispone de facilidades como agua potable y saneamiento, electricidad, caminería, y cuya biodiversidad - uno de sus grandes atractivos - es muy sensible a los cambios en el paisaje.

La biodiversidad del área es uno de los elementos que llevó a incluir a Cabo Polonio en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Sin embargo, el conocimiento de la fauna y flora marinas, así como de los procesos biofísicos que sustentan esa biodiversidad son muy poco conocidos. El trabajo que aquí se presenta busca contribuir a dicho conocimiento e - indirectamente- al buen uso y manejo de este sitio.



Versión electrónica distribuida bajo licencia de Creative Commons