

Sansón, M. (2008). 3. Arrecifes y manglares: ecosistemas en la frontera entre la tierra y el mar. En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Naturaleza amenazada por los cambios en el clima*. pp. 69-104. Actas III Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. ISBN: 978-84-612-6456-8.

3. Arrecifes y manglares: ecosistemas en la frontera entre la tierra y el mar

Marta Sansón

Departamento de Biología Vegetal (Botánica), Universidad de La Laguna.
msanson@ull.es

Gracias a la invitación del Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, y especialmente de Julio Afonso, he tenido el honor de participar en la III Semana Científica dedicada a D. Telesforo Bravo (12 al 16 de noviembre de 2007). Aunque no lo tuve como profesor durante mi licenciatura, sí que disfruté de sus enseñanzas, de su amor por la Naturaleza, su rigor científico y su espíritu divulgador durante las Semanas Científicas “Flora y Fauna en América y Canarias” que anualmente se celebraban dirigidas por D. Telesforo. Esta tercera Semana Científica ha estado dedicada a la “Naturaleza amenazada por los cambios en el clima”, sin duda uno de los temas más candentes en la actualidad debido a los numerosos problemas que el cambio climático está provocando en todo el planeta. Durante las últimas décadas, toda la comunidad científica ha alzado una voz de alerta ante este problema. Los científicos que conocemos la gran riqueza natural que nos rodea, sentimos más que nunca la necesidad urgente de divulgar nuestro conocimiento con el propósito de concienciar a la población para tomar medidas que frenen en lo posible esta amenaza global. Las líneas que siguen a continuación van dirigidas en este sentido, pretendiendo describir la gran belleza y diversidad de unos ecosistemas, quizás aún poco conocidos por el gran público, que se encuentran muy amenazados por los efectos del actual cambio climático. Los ecosistemas que les voy a mostrar son aquellos que se sitúan en la frontera entre la tierra y el mar en todas las costas del mundo, dedicándole una especial atención a dos ecosistemas característicos de las regiones tropicales muy sensibles a estos cambios medioambientales: los arrecifes y los manglares.

De todos es conocido que aproximadamente un 72% de la superficie de la Tierra está cubierto por los mares y los océanos. El medio marino, junto con la atmósfera, juega un papel fundamental en la regulación de la temperatura en el planeta. Entre otros factores ambientales, las condiciones de temperatura en las diferentes regiones de la Tierra permiten la existencia de una gran diversidad de climas y una elevada variedad de ecosistemas y organismos. La temperatura es un factor especialmente importante en los procesos vitales y en la distribución de las especies, que se ven muy afectadas cuando sus hábitats son alterados. Aunque a lo largo de sus 4.600 millones de años, la Tierra ha sufrido grandes variaciones en sus climas, actualmente está ocurriendo un calentamiento global mucho más rápido de lo esperado. Los resultados de las numerosas investigaciones científicas que se han realizado en los últimos años, permiten decir que las actividades generadas por el hombre son responsables en gran medida de este aumento en la temperatura, especialmente las emisiones de dióxido de carbono resultado de la quema de combustibles fósiles, y de otros gases de efecto invernadero hacia la atmósfera que, de acuerdo con los datos recientes publicados, han aumentado más de un 70% en los últimos treinta años. Las emisiones medias de CO₂ son de 5,5 toneladas por habitante y año, siendo superiores en los países más industrializados. Mediante el efecto invernadero, ciertos gases atmosféricos atrapan las radiaciones que emite el suelo caliente y evitan que se pierdan en el espacio exterior. Sin estos gases se estima que el promedio de la temperatura de la superficie terrestre rondaría unos -19°C, en lugar de los actuales +14°C. Los gases de efecto invernadero suponen menos del 1% del conjunto de gases presentes en la atmósfera, pero atrapan el calor de manera muy efectiva.

El calentamiento global ya está mostrando sus efectos en paisajes naturales de todo el mundo. Uno de los efectos más evidentes es el gran deshielo que está ocurriendo en los glaciares de montañas y en los grandes casquetes polares, lo que está elevando el nivel de los océanos y alterando el clima en muchas regiones del planeta. Los fenómenos climatológicos extremos, como lluvias torrenciales, inundaciones y olas de calor se han hecho más frecuentes, afectando a las poblaciones en todo el mundo. Los impactos del cambio climático incluyen aspectos como la salud, el abastecimiento de agua, la agricultura y otros sectores económicos, siendo las previsiones especialmente desfavorables para los países más pobres.

Los datos mostrados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001), formado por un grupo de más de 2.500 científicos organizado por Naciones Unidas, son realmente alarmantes. La temperatura media global en la superficie terrestre ha aumentado 0,6°C en el último siglo, habiéndose registrado desde 2001 siete de los ocho años más cálidos conocidos. Aunque las emisiones de gases se reduzcan considerablemente, en 2100 la temperatura habrá subido 2°C; y, si las emisiones continúan,

aumentará entre 3 y 5°C. Entre otras consecuencias, este incremento de la temperatura será el responsable directo de la fusión de los casquetes polares y la mayoría de los glaciares. La tierra se calienta más deprisa que el agua, una de las razones por las que el aumento de la temperatura ha sido mayor en el hemisferio norte, donde se ha perdido más de un 5% de nieve en los últimos treinta años. A medida que los océanos se calientan, su volumen aumenta, lo que contribuye al ascenso del nivel del mar. El nivel del mar seguirá subiendo durante más de un siglo, aunque se eliminaran totalmente las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo. En los últimos cincuenta años, el nivel se ha incrementado unos 0,8 mm al año; así, para final de siglo habrá subido unos 50-100 cm y 4-6 metros en los próximos siglos. Tal es la preocupación que existe sobre el efecto y las consecuencias del cambio climático que, en los últimos años, se han publicado numerosísimos artículos científicos y divulgativos. Entre ellos, les remito a los artículos publicados en National Geographic en 2007, donde se recogen muchas de las evidencias científicas que informan y alertan sobre los cambios fundamentales en el mundo tal como hoy lo conocemos (Appenzeller, 2007; Nicklen, 2007; Miller, 2007; van den Berg, 2007).

Los ecosistemas situados en la frontera entre la tierra y el mar son especialmente vulnerables a todas estas alteraciones ambientales. En la frontera tierra-mar se dan unas condiciones medioambientales particulares, muchas veces de elevado estrés para la gran diversidad de organismos que ahí habitan, a las que han tenido que adaptarse durante su larga historia evolutiva. Cuando me refiero a estos ambientes fronterizos estoy incluyendo las zonas litorales afectadas por las mareas así como las zonas sumergidas más superficiales de los continentes e islas, hasta unos 50-200 m de profundidad según las regiones del mundo. En esta estrecha franja, si la comparamos con las grandes profundidades de los océanos, viven *organismos terrestres*, principalmente hierbas, arbustos, árboles y fauna asociada, adaptados a tolerar el intenso estrés hídrico al que se ven sometidos regularmente por las oscilaciones de las mareas; y numerosos *organismos marinos* (algas, hierbas marinas y animales) que necesitan crecer en el mar y que constituyen ecosistemas de los más productivos del planeta.

De forma similar a lo que ocurre en el medio terrestre, los ecosistemas litorales y marinos del mundo constituyen biomas o grandes formaciones, con sus floras y faunas características, que se distribuyen en las diferentes latitudes principalmente en función de la temperatura del agua del mar y de razones paleo-históricas. Esta distribución latitudinal me va a permitir, a continuación, mostrarles un recorrido por los principales biomas que podemos observar en la frontera tierra-mar, desde las regiones polares hasta las regiones tropicales. Mi propósito es enseñarles sus singularidades, la riqueza de organismos que los componen, así como la fragilidad y

vulnerabilidad de algunos de estos ecosistemas frente al actual cambio climático.

Principales biomas en la frontera entre la tierra y el mar

Durante algo más de diez años, he tenido la fortuna de poder viajar a diversos países situados en diferentes latitudes del planeta, siempre atraída por la diversidad paisajística y biológica de estos lugares. Acompañada por Javier Reyes, autor de las fotografías que incluyo en este texto, hemos tenido la oportunidad de visitar lugares muy entrañables e interesantes por diferentes motivos pero, sobre todo, porque nos ha permitido entrar en contacto y disfrutar directamente de la riqueza y diversidad de los biomas que les voy a mostrar a lo largo de mi exposición. Estos biomas, localizados en la frontera entre la tierra y el mar, contribuyen en gran medida a la asombrosa biodiversidad de nuestro planeta, y están caracterizados en la mayoría de las regiones del mundo por su vegetación dominante, a la que me referiré especialmente en esta ponencia. No obstante, también haré referencia a la fauna asociada y trataré con cierto detalle algunas formaciones animales, como los espectaculares arrecifes de coral que se forman en las regiones tropicales.

En las regiones polares, la vegetación marina es muy reducida. En la región ártica, no se observa vegetación permanente en cientos de kilómetros, ni en la zona de mareas ni en los primeros metros de profundidad, debido al efecto del hielo. Los bloques de hielo sí aparecen con frecuencia coloreados de marrón por el crecimiento de una biota microscópica constituida por bacterias, pequeños crustáceos y principalmente microalgas del grupo de las diatomeas. Bajo el hielo, sin embargo, algunas macroalgas polares pueden sobrevivir un tiempo considerable, ya que están bien adaptadas a crecer durante largos períodos en condiciones de baja temperatura y poca iluminación, y aprovechar las cortas ventanas de luz de que disponen durante el verano. En el sur de la región ártica, las condiciones son ya menos estresantes. Las especies que viven en la zona de mareas, aunque quedan cubiertas por el hielo cada año, pueden sobrevivir; y también las especies que crecen siempre sumergidas, que en estas latitudes no están afectadas por el estrés mecánico de la congelación-descongelación de la masa de agua. En algunas localidades de Groenlandia, con temperaturas inferiores a 3°C y con 1-2 metros de hielo desde septiembre a mayo, algunas algas verdes efímeras crecen en la zona de mareas durante los meses sin hielo, mientras que hasta unos veinte metros de profundidad existe una vegetación pobre en especies, dominada por algas rojas costrosas. Más hacia el Sur, en los primeros metros de profundidad, aparecen las primeras especies de *Laminaria*, grandes algas pardas que forman bosques submarinos. Aunque en estas latitudes las

condiciones de estrés se reducen, cuando uno visita los paisajes litorales en las regiones más frías del planeta, como tuvimos ocasión de hacerlo en las costas del Norte de Noruega, uno puede ver y sentir las duras condiciones a las que aún así tienen que enfrentarse los organismos que allí habitan. En el hemisferio Sur, las condiciones ambientales son similares; sin embargo, las floras y faunas de la Antártida son bastante más ricas, siendo el número de especies de los mayores grupos de organismos bentónicos de 1,5 a 6 veces superior en la Antártida que en el Ártico. En la Antártida, tal como describen Amsler *et al.* (1995), dominan otras especies de algas pardas, como *Desmarestia* y géneros afines. Por supuesto, las aves (pingüinos y pájaros) y los mamíferos (osos, focas, leones marinos, cetáceos...) que habitan en las regiones polares son los organismos más conspicuos del hielo, y son los que atraen a un público interesado en el turismo y la explotación de estas regiones, y a científicos preocupados por su conservación. Precisamente, el cambio climático global en estas regiones polares está afectando de forma notable a estos animales. El deshielo del Ártico y el retroceso de la banquisa sitúa a los osos polares al borde de la extinción, disminuye la fuente de alimentos de las ballenas y deja a las focas sin un lugar donde parir y descansar (Nicklen, 2007). Las últimas estimaciones indican que hacia el 2050, no habrá casi hielo estival en el Océano Ártico, lo que tendrá efectos muy negativos sobre esta biota polar (ver Kaiser *et al.*, 2005).

En las regiones templado-frías, las oscilaciones de las mareas son amplísimas, variando habitualmente entre cinco y diez metros, encontrándose paisajes litorales diferentes según la exposición al oleaje y la naturaleza rocosa o sedimentaria de las costas. En las costas rocosas, los ambientes protegidos frente a la hidrodinámica marina, aparecen cubiertos por densas poblaciones de algas pardo-amarillentas, que durante las bajamareas quedan al descubierto desprendiendo un intenso olor muy característico. En las costas protegidas al noroeste de Noruega y en Islandia, pudimos observar como estas bandas de algas realmente forman parte del paisaje de los fiordos, bordeando las aguas tranquilas y cristalinas en las que se reflejan las altas montañas. En la zona de mareas aparecen las bandas de fucales (algas pardas de los géneros *Pelvetia*, *Fucus*, *Ascophyllum*), con individuos de hasta medio metro de longitud, mientras que en los primeros metros de profundidad las amplias poblaciones son de *Laminaria*, con especímenes de hasta tres metros. Lüning (1990), en su trabajo sobre la biogeografía de las algas, realiza muy buenas descripciones de estos paisajes en diferentes partes del mundo.

En las aguas más profundas, aparecen los denominados fondos de *mäerl*, es decir grandes acumulaciones de algas rojas costrosas calcificadas que viven libres y son arrastradas por las corrientes marinas hasta ese lugar. En los ambientes expuestos, sin embargo, las bandas de fucales son sustituidas

por poblaciones densas de algas rojas (*Porphyra*, *Mastocarpus*, *Chondrus*) y, en las zonas sumergidas, las laminarias son sustituidas por otras algas pardas muy similares (*Alaria*).



Los ambientes protegidos frente al oleaje en las regiones templado-frías del mundo aparecen cubiertos por densas poblaciones de algas, que durante las bajamareas quedan reposando sobre las rocas o parcialmente flotando en las orillas. Estas amplias bandas de algas ocupan gran parte del litoral en las tranquilas aguas de las Islas Lofoten (arriba), situadas al noroeste de Noruega, y en los fiordos de la gran península noroccidental de Islandia (abajo).



En los fiordos situados al Noroeste de Islandia, en los que como en un espejo se reflejan las altas montañas, las amplias y densas bandas de algas frondosas fucales aparecen como una parte más del paisaje. Estas poblaciones de algas, formadas por individuos de color pardo-amarillento y de más de medio metro de longitud, bordean las aguas tranquilas y cristalinas de los fiordos. En bajamar (arriba) quedan emergidas, en pleamar (abajo) flotan hacia la superficie.

En las costas sedimentarias, la zona de mareas está ocupada por formaciones de marismas. Las marismas se desarrollan en lugares protegidos del oleaje, con escasa pendiente, donde existe deposición de sedimentos y aportes de agua dulce. El aspecto general de una marisma es similar en todo el mundo. El paisaje está dominado por hierbas, juncos y arbustos, de géneros como *Spartina*, *Limonium*, *Juncus* y *Salicornia*, que presentan rasgos morfológicos muy parecidos, con tallos horizontales y fascículos de raíces que las ayudan a fijarse al sustrato arenoso-lodoso en el que crecen. Estas plantas terrestres suelen quedar sólo parcialmente sumergidas aunque, en ocasiones, el agua de mar las cubre totalmente. La mayoría de las plantas de las marismas han desarrollado adaptaciones morfológicas y anatómicas que les permiten tolerar la elevada salinidad. Cuando uno visita una marisma, enseguida detecta que la vegetación marina está muy empobrecida, en comparación con la de las costas rocosas próximas. Las especies más comunes son algas verde-azules, verdes y diatomeas, aunque también pueden crecer esporádicamente algunas algas pardas fuciales. Ciertas especies de hierbas marinas, conocidas como fanerógamas marinas, pueden formar praderas en la zona de mareas (*Zostera noltii*) o en los fondos someros próximos (*Zostera marina*).

Aunque estos biomas de las regiones templado-frías son comunes en ambos hemisferios, en algunas costas la composición de especies es diferente. Así, por ejemplo, en las costas del noreste del Pacífico, desde Alaska hasta California, destacan los bosques submarinos conocidos en la literatura como bosques de quelpos, en los que las algas pardas gigantes *Macrocystis* y *Nereocystis*, que pueden alcanzar hasta cien metros de longitud, son las protagonistas (Steneck *et al.*, 2002). Los quelpos son los mayores vegetales que pueden encontrarse en los mares, formando un hábitat muy parecido a un bosque terrestre, actuando a modo de grandes árboles entre cuyas ramas viven otras algas y numerosos animales marinos, como nutrias, peces y cetáceos, entre otros.

Las oscilaciones de las mareas en las regiones templado-cálidas son mucho más reducidas que en las templado-frías, alcanzando entre medio metro y tres metros de amplitud. Los paisajes litorales están ocupados por poblaciones de algas costrosas o densos céspedes muy ricos y diversos, con individuos de tamaño mucho menor que en las regiones más frías. En las costas rocosas, estas formaciones costrosas y cespitosas siempre se disponen formando varias bandas horizontales, sobre todo en la zona de mareas. Las especies que forman estas bandas son muy diferentes de unos lugares a otros, sobre todo dependiendo de la exposición al oleaje, por lo que es muy difícil en este caso darles un patrón general. En los primeros metros de profundidad, sí que destacan los paisajes dominados por densos bosques de algas pardas arborescentes (*Cystoseira*, *Sargassum* y géneros afines). Los fondos de *mäerl* o de rodolitos (“piedras rojas”) también son

comunidades particularmente abundantes en estas regiones templado-cálidas, formando bosques en miniatura con una elevada biodiversidad, dominados por algas rojas calcáreas que se acumulan por las corrientes marinas en fondos de sedimentos, desde casi la superficie hasta más de cien metros de profundidad. En las costas arenosas, las praderas de fanerógamas marinas (*Zostera*, *Cymodocea*, *Posidonia*) dominan los paisajes, sobre todo ocupando los fondos iluminados poco profundos hasta unos cuarenta metros de profundidad. Luque & Templado (2004) tratan de forma muy amena y detallada los bosques y praderas marinas de las costas tanto atlánticas como mediterráneas de Andalucía, que reflejan en buena medida cómo son los paisajes litorales en algunas de las regiones templado-cálidas. Las marismas también están presentes en la zona de mareas en ciertas localidades, ocupando el mismo tipo de ambientes que ya comenté en las regiones protegidas más frías del mundo.

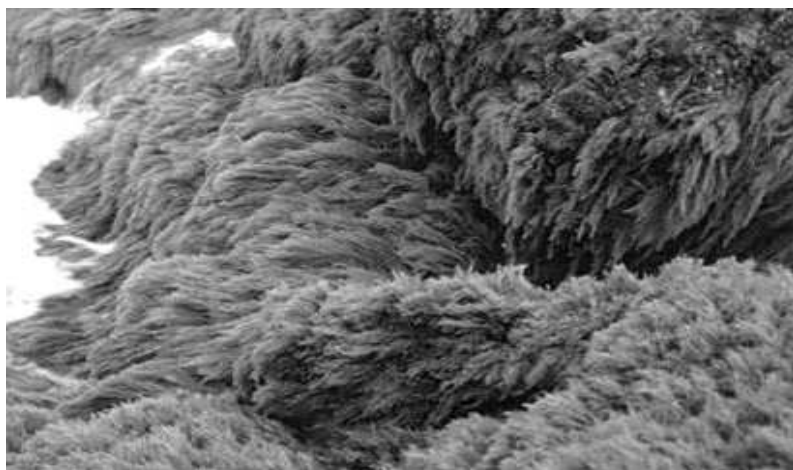
Las islas Canarias presentan paisajes litorales que concuerdan con el modelo general de las regiones templado-cálidas, pero con singularidades en la composición de especies que dominan en los diferentes niveles del litoral. En pocas líneas, es difícil de resumirles las particularidades de la flora marina canaria, pero intentaré mostrarles un patrón general en función de las características del litoral y del diferente grado de exposición al oleaje. Si el lector quiere más detalles sobre algunos aspectos de la flora marina de las islas pueden consultarlos en Sansón *et al.* (2001) y Gil-Rodríguez *et al.* (1992). En la zona de mareas en las costas rocosas existe un predominio de poblaciones cespitosas y costrosas, con gran número de especies, dispuestas en sucesivas bandas horizontales. En las costas rocosas expuestas al oleaje, la banda más alta o frontera litoral está caracterizada por la abundancia de algas verde-azules y del ‘chirrimil’ *Littorina*. A continuación, se distinguen tres bandas diferentes que, en conjunto, forman el denominado eulitoral. La superior está siempre dominada por el ‘canutillo de mar’ *Chthamalus stellatus* y diversas algas verde-azules (la ‘verruquita gelatinosa’ *Calothrix* y el ‘piche de mar’ *Brachytrichia*), aunque en algunas localidades pueden aparecer poblaciones del ‘fideo de mar’ *Nemalion helminthoides* en primavera. La banda media está ocupada principalmente por costras del alga parda *Ralfsia verrucosa* y del ‘caliche de La Orotava’ *Neogoniolithon orotavicum*. La banda inferior está dominada por algas rojas calcificadas (el ‘caliche tropical’ *Hydrolithon onkodes* y la ‘coralina rosa’ *Corallina elongata*) y otras especies acompañantes. El comienzo del sublitoral, es decir de la zona que siempre queda sumergida durante las bajamareas, está señalado por la presencia de tres bandas estrechas sucesivas: la superior del ‘mujo amarillo’ *Cystoseira abies-marina*, la media del ‘gelidio rojo’ *Gelidium arbuscula* y la inferior del ‘gelidio negro’ *Gelidium canariense*. Las costas rocosas protegidas del oleaje son escasas en nuestras islas. En estos ambientes, la frontera litoral está colonizada por algas verde-azules. El

eulitoral superior está ocupado por el ‘canutillo de mar’ y algunas algas verde-azules (la ‘verruguita gelatinosa’ y el ‘verdín resbalón’ *Schizothrix*), el eulitoral medio está dominado por céspedes de la ‘coralina rosa’, mientras que el sublitoral comienza con poblaciones del ‘abanico pavorreal’ *Padina pavonica*, la ‘escoba de mar’ *Stypocaulon scoparium* y la ‘janía’ *Jania rubens*.

Los fondos rocosos suelen estar dominados por especies de mujo, en especial el ‘mujo amarillo’, que habitualmente forma poblaciones muy densas sobre las rocas bien iluminadas de los ambientes expuestos y semiexpuestos. En muchas ocasiones, en estos fondos intervienen otras algas pardas, como los ‘sargazos’ *Sargassum*, las ‘cintas de mar’ *Dictyota*, el ‘abanico de Tournefort’ *Zonaria* y el ‘abanico marrón’ *Lobophora*. En Canarias, por debajo de los 10 m de profundidad, las comunidades de algas son generalmente más pobres en especies. Sin embargo, en determinados ambientes se desarrollan poblaciones de algas muy bellas y singulares, como los ‘penachos de fondo’ *Sporochnus* y las ‘babas’ *Dudresnaya*, entre otras. Los fondos más profundos y poco inclinados albergan comunidades de algas constituidas, con frecuencia, por un estrato costroso de especies calcáreas sobre el que crecen especies erectas, como las ‘lechuguitas de mar’ *Microdictyon* y ‘el abanico marrón’, en ocasiones ligados a las poblaciones del ‘coral negro’ *Antipathes wollastoni*. Las paredes verticales y extraplomos suelen estar ocupados por algas rojas costrosas y otras especies típicas de ambientes poco iluminados, que comparten el sustrato con esponjas y cnidarios. A mayor profundidad son comunes los fondos de *mäerl*, que fueron descritos con detalle por Ballesteros (1993). En los fondos arenosos protegidos del oleaje, la ‘seba’ *Cymodocea nodosa* forma extensas praderas o ‘sebadales’ en aguas poco profundas, mientras que la ‘hojitas de arena’ *Halophila decipiens* crece a mayor profundidad en fondos más lodosos (Reyes *et al.*, 1995; Gil-Rodríguez *et al.*, 2007).

El modelo general de biomas que les he mostrado para las regiones templado-cálidas del hemisferio norte es similar en el hemisferio sur, sobre todo en el dominio de densas comunidades de algas cespitosas. Sin embargo, igual que para las regiones templado-frías, las comunidades de algas en ambos hemisferios se diferencian en su composición florística, que está dominada en cada caso por especies endémicas de esas regiones.

Voy a terminar este recorrido mostrándoles los paisajes más característicos de las regiones tropicales. En general, la vegetación marina de los trópicos presenta una elevada biodiversidad, debido fundamentalmente a que constituyen los hábitats marinos más antiguos del planeta. En estas regiones, coexisten numerosas especies de algas verdes, pardas y rojas, entre las que dominan formas calcificadas, muchas de ellas exclusivas de estas regiones tropicales. Además, las costas tropicales constituyen el lugar de origen y diversificación de las fanerógamas marinas.

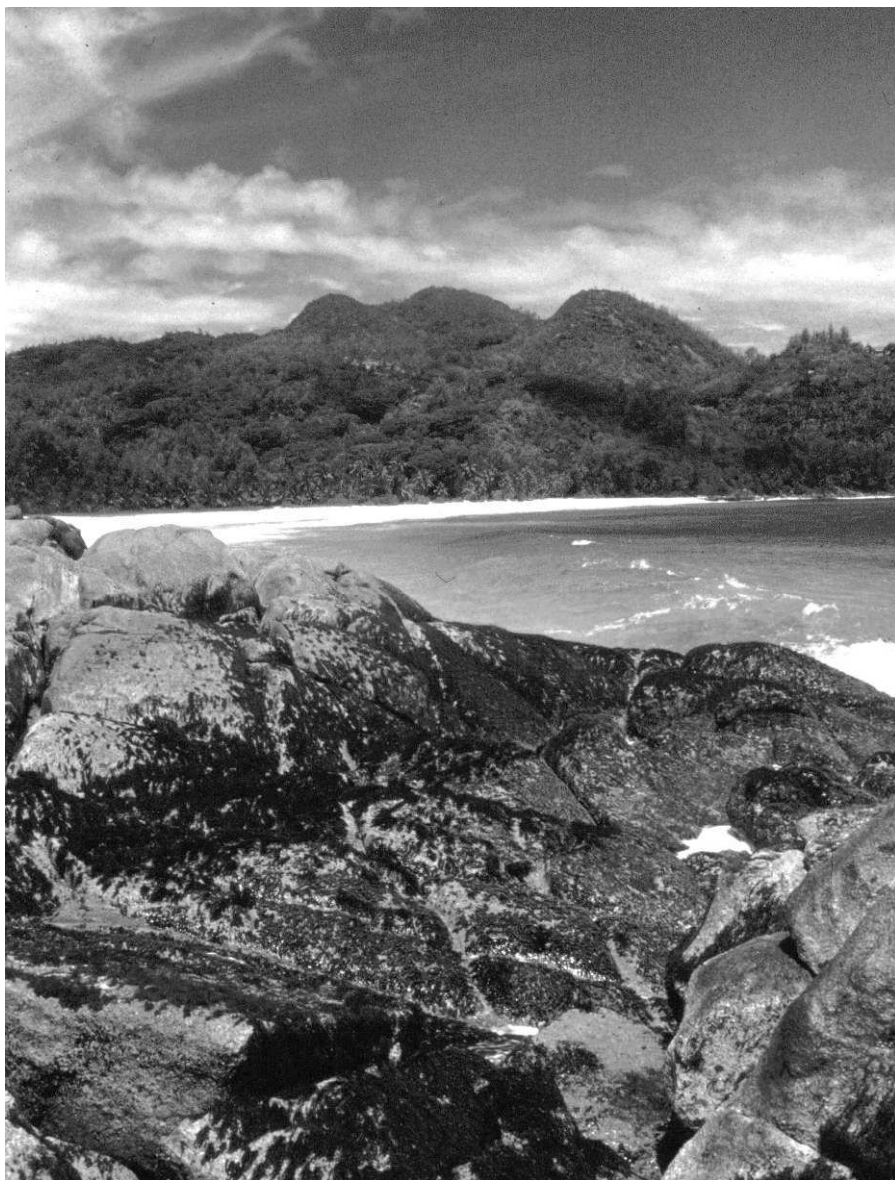


En regiones templado-cálidas, el límite de las mareas y los fondos rocosos bien iluminados, suelen estar dominados por poblaciones densas de diferentes algas pardas. En las islas Canarias, el 'mujo amarillo' *Cystoseira abies-marina* forma orlas (arriba izquierda) o extensas praderas (abajo) sobre las rocas en fondos someros. Los ambientes submarinos oscuros están, por el contrario, dominados por algas rojas costrosas y otras especies esciáfilas, que crecen con esponjas y cnidarios. En la Reserva Marina del Mar de las Calmas en El Hierro (arriba derecha), puede observarse el típico puzzle que forman los organismos que comparten paredes rocosas sumergidas y poco iluminadas.

La vegetación de las costas del Caribe nos sirve como ejemplo para analizar las características principales en estas regiones cálidas. Al caminar por las plataformas rocosas litorales en estos lugares con oscilaciones de mareas inferiores a un metro de amplitud, uno se da cuenta enseguida de la reducción en tamaño que sufre la vegetación marina en estas latitudes, donde forman pequeñas almohadillas o pulvínulos aislados, especialmente en las zonas emergidas durante las bajamares en las que las algas quedan expuestas a temperaturas elevadas. En las costas rocosas expuestas hay algas verde-azules y abunda la diminuta alga roja *Herposiphonia* en la banda más alta del litoral y, por debajo, viven los balanos y crecen grupos muy variados de pequeñas algas (*Cladophoropsis*, *Herposiphonia*, *Centroceras*, *Caulerpa*). En las costas rocosas protegidas, la banda más alta está ocupada por algas verde-azules y la pequeña alga roja *Bostrichia*, mientras que por debajo abundan almohadillas de algas pardas de pequeño porte (*Sphacelaria*, *Hincksia*). El alga verde *Valonia* es la protagonista en el nivel inferior. En ambas situaciones, expuestas y protegidas, los fondos poco profundos suelen estar ocupados por arrecifes coralinos. Las costas rocosas desprovistas de arrecifes presentan densas poblaciones de algas pardas, como los sargazos y géneros afines. Las aguas más profundas, en algunos casos hasta más de doscientos metros cuando las aguas son muy claras y cristalinas, muestran una variada vegetación en la que, además de algas rojas calcáreas, intervienen especies exclusivas de estos hábitats. Estas algas con formas muy bellas y espectaculares han sido estudiadas por muchos autores, y les remito a la guía publicada por Littler & Littler (2000) en la que se incluyen descripciones y muy buenas fotografías de muchas de estas especies de algas tropicales.

Las costas sedimentarias y arenosas, protegidas del oleaje, presentan una vegetación litoral dominada por los manglares, y los fondos están cubiertos por amplias praderas de fanerógamas marinas. Estos paisajes que les he mostrado para las costas del Caribe también nos sirven como patrón general de los biomas de la región tropical del Indo-Pacífico, aunque en ésta hay una mayor biodiversidad, tanto de algas como de fanerógamas marinas.

Aunque uno está acostumbrado a bucear en fondos cubiertos por hierbas marinas, ya que en Canarias poseemos frondosos sebaales, cuando buceas en los fondos de arena en los trópicos, como tuvimos la fortuna de hacerlo en el Caribe y en las islas Seychelles, la sensación es bastante diferente. Las fanerógamas marinas, que son las únicas plantas vasculares creciendo en las arenas submarinas, allí forman extensas praderas muy iluminadas, de color verde intenso, que contrastan con las arenas blanquecinas y las aguas azul turquesa tan espectaculares en estas costas del mundo. De las más de doscientas mil especies de plantas con semillas conocidas, tan sólo se han descrito 58 especies de fanerógamas marinas a nivel mundial. Este número reducido de especies es debido a su origen muy reciente.



Las plataformas rocosas litorales en las regiones más cálidas del mundo están colonizadas por una vegetación marina muy reducida. Como observamos en esta fotografía de las costas de Mahé (islas Seychelles), las algas son de pequeño porte y forman pulvínulos aislados, sobre todo en las rocas que quedan emergidas y expuestas a temperaturas elevadas durante las bajamares.



En Canarias, los fondos arenosos protegidos del oleaje presentan densos 'sebadales' de *Cymodocea nodosa* (izquierda). Estos ecosistemas, dominados por fanerógamas marinas, existen tanto en regiones templadas como tropicales. Son hábitats muy importantes para el refugio y puesta de peces e invertebrados. También, sus hojas en forma de cintas constituyen un lugar estable para el crecimiento de muchas especies epífitas (derecha).



Las arenas submarinas de las regiones tropicales también están colonizadas por extensas praderas de fanerógamas marinas, que se forman desde muy próximas al nivel del mar hasta mayores profundidades. A la izquierda, se observa una extensa pradera superficial, en el sur de República Dominicana. El entramado de tallos horizontales y verticales que estas plantas desarrollan (derecha) estabilizan los sedimentos, de forma similar a cómo lo hacen las plantas de las dunas.

Hace apenas unos 70 millones de años que sus ancestros retornaron al mar, a partir de plantas xerófitas de marismas. La colonización de los fondos marinos por estas plantas con flores, con una serie de dispositivos innovadores como las raíces y los sistemas vasculares, supuso la aparición de unos nuevos competidores para las algas, protagonistas hasta ese momento de la vida vegetal marina. Mientras las algas se sitúan principalmente sobre los sustratos rocosos o duros, las fanerógamas se adaptaron para ocupar los fondos sedimentarios, bien iluminados. Desarrollaron la capacidad para vivir totalmente sumergidas, la tolerancia a la elevada salinidad del agua de mar y un sistema eficaz de anclaje a los sustratos sedimentarios, que son muy inestables en el medio marino. Todas las fanerógamas marinas son muy parecidas. Constan de tallos horizontales, que contribuyen a la expansión de las praderas; tallos verticales, para evitar que la planta quede enterrada por el sedimento; fascículos de raíces, con las que la planta se ancla al sustrato y a través de las cuales absorben nutrientes; y hojas acintadas, ovaladas o cilíndricas, agrupadas en haces, a través de las cuales realizan la fotosíntesis. Quizás lo que más puede llamar la atención al lector es que estas hierbas marinas florecen bajo la superficie de los océanos. Sus flores son diminutas, inconspicuas y difíciles de observar, pero han supuesto una fantástica adaptación al medio marino permitiéndoles una exitosa reproducción.

Las praderas de fanerógamas cubren en todo el mundo, sobre todo en estas regiones tropicales, aproximadamente unos 600.000 km² de los fondos marinos someros. La importancia de estas formaciones vegetales sumergidas no sólo estriba en la elevada producción de estos ecosistemas, comparable a la de los bosques lluviosos tropicales, sino también porque desempeñan un papel importante en la biología y dinámica costeras. La elevada densidad de hojas en las praderas favorece el depósito de partículas en suspensión y, por ello, la transparencia de las aguas. Su complejo entramado de rizomas y raíces estabilizan los sedimentos en estos fondos, como lo hacen las plantas de las dunas. Además, atenúan la hidrodinámica y la erosión costera. Son responsables de una elevada producción de oxígeno y de materia orgánica. Y, constituyen el hábitat para numerosas especies vegetales y animales, que viven sobre sus hojas o entre ellas, muchas de las cuales utilizan estos ambientes como lugar de reproducción y refugio para sus fases juveniles. La apasionante biología de las fanerógamas marinas está muy bien tratada en Larkum *et al.* (1989), quienes editaron un libro en el que recopilan numerosos aspectos de este interesante grupo de plantas, con especial referencia a la región Australiana donde crece la mayoría de las especies descritas hasta el momento.

El futuro de los ecosistemas de las costas rocosas y arenosas del mundo depende de la perspectiva temporal que consideremos pero, en general, no es demasiado positivo. Una serie de análisis realizados para predecir las

amenazas sobre estos hábitats en los próximos veinte años han destacado que, muchos de los impactos antropogénicos sobre las costas de las regiones templadas y tropicales, seguirán aumentando de forma continuada, sobre todo con los proyectos de incrementar las poblaciones costeras en todo el mundo. Brown & McLachlan (2002), Kennish (2002) y Thompson *et al.* (2002) analizaron el futuro de algunos de estos ecosistemas litorales. Pero, además, el incremento acelerado del nivel del mar en los próximos 50-100 años como consecuencia del cambio climático tendrá impactos a gran escala en todas las costas del mundo. Las predicciones apuntan hacia cambios severos en las corrientes y oleaje, provocando eventos catastróficos más frecuentes (IPCC, 2001). En la actualidad, se desconoce cómo las comunidades litorales responderán a estos cambios, pero se sabe que muchas especies tendrán grandes dificultades para adaptarse, sobre todo debido al probable descenso en sus tasas de reproducción y reclutamiento.

Aunque todos los biomas que les he mostrado son ecosistemas irremplazables, con unas singularidades y biodiversidad únicas, voy a dedicar por último una especial atención a dos de los más valiosos hábitats marinos del mundo, por su elevada productividad y riqueza en especies: los manglares y los arrecifes de coral. En primer lugar, les voy a enseñar las principales características ambientales y biológicas de estas formaciones, y el importante papel que desarrollan; y, después, les mostraré cómo las alteraciones de estos hábitats, sobre todo las relacionadas con el cambio climático, les están afectando situándolos entre los ecosistemas más frágiles, sensibles y vulnerables del planeta, con mayor peligro de extinción.

Manglares

Los manglares son biomas característicos de las costas sedimentarias de las regiones tropicales. Estas formaciones están dominadas por árboles (mangles) y arbustos, y sustituyen a las marismas en las regiones más cálidas del planeta. Principalmente se forman en lugares protegidos del oleaje, con escasa pendiente, donde existen grandes depósitos de sedimentos y aportes de agua dulce. El suelo fangoso en el que se desarrollan es profundo, oscuro, rico en bacterias, pobre en oxígeno, y constantemente inundado durante las pleamares. Cuando llegas por primera vez a un manglar, además de notar esa sensación de humedad sofocante típica en los trópicos, lo que más te impacta es precisamente el intenso olor que desprende el suelo, difícil de describir y de olvidar. Es la primera sensación que me viene a la cabeza, cuando recuerdo por ejemplo mi visita a los espectaculares manglares en la costa pacífica de Costa Rica.

Los manglares se sitúan geográficamente a ambos lados del ecuador, hasta la isoterma de 20°C. No obstante, aunque se les considera formaciones

tropicales, también se forman en latitudes más templadas, favorecidos por las corrientes marinas y las condiciones de temperatura locales.



Los manglares se forman en costas tropicales sedimentarias, protegidas del oleaje, llanas, inundadas durante las pleamares y con constantes aportes de agua dulce (arriba). El suelo fangoso del que sobresalen numerosísimas raíces (abajo, neumatóforos en bajamar), llama mucho la atención en estos hábitats. Las dos fotografías fueron tomadas en un manglar en la costa pacífica de Costa Rica.

La mayor diversidad de especies en estos bosques ocurre en el Indo-Pacífico occidental, decreciendo considerablemente en el resto de las regiones. Probablemente, esto se debe al gran aumento de la diversidad en el Indo-Pacífico después de la deriva de los continentes (ver Kaiser *et al.*, 2005).

Existen diferentes tipos de manglares, según la forma de la costa, el grado de sedimentación, el régimen de salinidad del agua, y la influencia relativa de las mareas y del agua dulce. Los ‘manglares de ribera’, muy abundantes en costas tropicales asiáticas, se forman donde la amplitud de mareas es mínima y los aportes de agua dulce son dominantes, como en los deltas de los grandes ríos. Los ‘manglares de borde’ ocupan la zona de oscilación de mareas, con frecuencia en lugares expuestos, donde constituyen una barrera frente al oleaje. Por último, los ‘manglares de cuenca’ son los que se forman tierra adentro a partir de los manglares de borde, en condiciones de escasa oscilación de marea y oleaje, aunque con salinidad muy variable debido a la evaporación y a la lluvia.

Los manglares constituyen paisajes en los que dominan plantas terrestres, que pertenecen a unas dieciséis familias taxonómicas, dos de ellas con una elevada diversidad e importancia ecológica en todos los manglares del mundo: las aviceniáceas y las rizoforáceas. La primera está representada por ocho especies de mangle negro *Avicennia*; y la segunda incluye ocho especies de mangle rojo *Rhizophora* y otros tres géneros menos conocidos (*Bruguiera*, *Ceriops* y *Kandelia*). Otras familias importantes son las combretáceas, a la que pertenece el mangle blanco *Laguncularia* y las soneratiáceas. Tomlinson (1986) describe de una forma exquisita las plantas de estas formaciones. También habita una especie de palma (*Nypa*), cuyo polen y frutos han fosilizado tan bien en los manglares que han proporcionado una información excepcional sobre la evolución de las palmas y el cambio climático.

En los manglares las diferentes especies no aparecen al azar, sino que crecen siguiendo una distribución natural en función de la distancia al mar. Esta zonación está regulada principalmente por dos factores ambientales: la salinidad y la cantidad de agua en el sedimento. Las especies que están mejor adaptadas a crecer próximas al mar son generalmente los mangles rojos. A mayor distancia del mar habitan representantes de las otras familias típicas de estos bosques. En el Caribe, el mangle negro aparece en lugares pantanosos parcialmente sumergidos; y el mangle blanco prefiere lugares más elevados sobre el nivel del mar, donde el sedimento está menos anegado. Detrás de estos verdaderos mangles crecen otras especies acompañantes, generalmente árboles y arbustos que no soportan las condiciones excesivamente severas a las que están sometidos los mangles.

En general, las raíces de los árboles necesitan oxígeno para funcionar correctamente, por lo que este es el primer problema que han de resolver los mangles, que como ya dijimos crecen en suelos pobres en oxígeno.



La principal adaptación de los mangles a su hábitat es el sistema de raíces tan espectacular que desarrollan las diferentes especies, como vemos en estas fotografías en un manglar en el sur de Costa Rica. Obsérvese el entramado que constituyen las raíces zancudas del 'mangle rojo' *Rhizophora mangle*.



En los manglares occidentales, como en este manglar de Costa Rica, es muy frecuente observar entre las raíces zancudas del 'mangle rojo', las raíces o neumatóforos del 'mangle negro' *Avicennia*, que crecen verticalmente hacia arriba sobresaliendo del suelo.

Para ello, estos árboles han desarrollado adaptaciones morfológicas que permiten a sus raíces tomar el oxígeno necesario. Las principales adaptaciones están relacionadas con la forma y estructura de las raíces, que sobresalen del sedimento permitiendo la aireación a través de unos pequeños poros, conocidos como lenticelas. El mangle rojo, por ejemplo, forma raíces aéreas o zancudas que se originan en la base del tronco, a unos dos metros por encima del nivel del suelo, y que después penetran en el sedimento para dar soporte al árbol. El mangle blanco desarrolla raíces que van sobresaliendo de la superficie del suelo durante su crecimiento, dando lugar a estructuras en forma de arcos alrededor del tronco. El mangle negro forma un tipo de raíces muy peculiares, denominadas neumatóforos, que crecen verticalmente hacia arriba emergiendo del suelo cada quince o treinta centímetros a partir de raíces horizontales subterráneas. Precisamente, lo primero que te sorprende cuando llegas a un manglar, es este intrincado sistema de raíces que te encuentras sobresaliendo del suelo, en la base de los árboles, que sólo te permite caminar unos pocos metros tierra adentro.

La presencia de sal en el sedimento constituye el segundo gran problema para los mangles, ya que la sal desorganiza los mecanismos celulares y puede llegar a ser fatal para muchas especies. En este caso, los mangles han desarrollado diferentes adaptaciones fisiológicas para poder crecer en estos ambientes con elevada salinidad (Hogarth, 1999). Algunas especies impiden la absorción de sal por las raíces, otras toleran altas concentraciones de sal en los tejidos, otras excretan el exceso de sal a través de la corteza o se desprenden de las hojas donde se acumula la sal. El agua salada en el suelo dificulta además la absorción de agua por las raíces, ya que reduce la diferencia osmótica entre la raíz y el sedimento. El mangle rojo sólo absorbe agua en la capa más superficial del suelo donde se encuentra el agua dulce, menos densa que el agua de mar. El mangle negro se estima que impide la absorción de 90-95% de la sal en la superficie de sus raíces. En definitiva, los mangles absorben el agua con mucha dificultad, por lo que necesitan destinar gran parte de su energía para desarrollar un sistema de raíces mucho mayor que en otros árboles, en detrimento del crecimiento de la parte aérea del árbol o de la reproducción. La dificultad de absorber agua provoca otras importantes consecuencias. En general, todas las plantas tienden a regular la temperatura por transpiración, permitiendo la evaporación de agua a través de las hojas. Los mangles no pueden seguir esta estrategia, ya que el agua es para ellos un recurso limitado. El mangle rojo lo que hace es reducir considerablemente la evaporación orientando sus hojas hacia el sol con diferentes ángulos, según la posición de la hoja en el árbol. Las hojas más externas se colocan casi paralelas a la dirección de los rayos, evitando el recalentamiento, mientras que las situadas en el interior de la copa se orientan perpendiculares al sol para alcanzar la máxima tasa de fotosíntesis.

En relación a la reproducción, los mangles también se enfrentan a un tercer problema. Como cualquier planta con semillas, los mangles forman flores que requieren la polinización. La morfología de las flores y los métodos de polinización son muy variados. Así, por ejemplo, el mangle rojo forma flores muy pequeñas polinizadas por el viento, mientras que otras especies presentan grandes flores polinizadas por animales, como murciélagos, aves y mariposas. El problema, sin embargo, tiene que ver principalmente con la dispersión de las semillas, que deberían tolerar la inmersión en el agua de mar y la elevada salinidad en el sedimento. La mayoría de los mangles han conseguido adaptarse desarrollando algún grado de viviparismo, es decir, que la germinación de las semillas y el posterior crecimiento de los embriones se producen sobre el árbol, antes de desprenderse en forma de plántula o propágulo desarrollado. Los mangles invierten mucha energía en la producción de los propágulos. El ejemplo más evolucionado de viviparismo lo presenta el mangle rojo, cuyas plántulas al desprenderse caen directamente al agua de mar flotando horizontalmente. Los propágulos mantienen su flotabilidad bastante tiempo, siendo viables durante más de un año. Cuando las plántulas logran enraizar en el sedimento se orientan verticalmente y continúan creciendo.

Los manglares constituyen un hábitat biológicamente diverso y ecológicamente complejo. En estos bosques vive una mezcla única de animales terrestres y marinos (insectos, aves, reptiles, anfibios, peces, cangrejos), que han desarrollado de forma excepcional una alta tolerancia a la salinidad del agua y cuyas actividades contribuyen a la gran productividad de estos ecosistemas. Al caminar entre las raíces de los mangles, la presencia de numerosos cangrejos violinistas llama mucho la atención. Algunas especies, como los conocidos peces saltarines del lodo, muestran adaptaciones increíbles para poder vivir en este hábitat fronterizo entre la tierra y el mar. También, son particularmente abundantes las plantas terrestres epífitas en los mangles, sobre todo especies trepadoras, así como las algas e invertebrados marinos que crecen fijos a las raíces sumergidas de los mangles, formando comunidades únicas (Farnsworth & Ellison, 1996). Desde el punto de vista ecológico, en los manglares existe una elevada productividad y constituyen un lugar de refugio y puesta para especies de peces, moluscos y crustáceos importantes en las pesquerías locales y en los arrecifes de coral situados en sus proximidades. Son hábitat temporal de numerosas aves migratorias y santuarios para algunas especies en peligro de extinción, como el ibis escarlata, el manatí, el caimán de costa y varias tortugas marinas. Estos bosques mantienen el equilibrio en la interfase tierra-mar en estas regiones cálidas, sirviendo de entrada de nutrientes y de flujo de energía con los ecosistemas marinos próximos.



En la mayoría de los mangles, las semillas germinan y los embriones se desarrollan sobre el árbol originando plántulas o propágulos, antes de desprenderse. Esto se conoce como viviparismo. En el 'mangle rojo', los embriones se desarrollan formando plántulas alargadas y péndulas, como se observan en esta fotografía.



Cuando las plántulas ya desarrolladas del 'mangle rojo' se desprenden, inicialmente flotan, después enraízan (izquierda) y continúan creciendo hasta originar un nuevo mangle. Entre las raíces y hojarasca de los mangles, es muy habitual la presencia de numerosos 'cangrejos violinistas'. El cangrejo macho (derecha) se caracteriza por presentar una pinza delantera de gran tamaño. Cada individuo excava un túnel en el fango, donde permanece durante la pleamar.

Los manglares protegen el litoral contra la erosión actuando de barreras naturales, tanto frente al oleaje y las mareas como frente a la erosión producida por el viento. Estas barreras ofrecen una protección muy efectiva frente a huracanes y maremotos, y por ejemplo resultaron cruciales reduciendo los daños causados por el tsunami en 2004 en las costas del Océano Índico. En algunas zonas costeras de Vietnam, Tailandia, India y Filipinas, se han realizado plantaciones de mangles con estos fines. Estos bosques purifican las aguas que son transportadas por los ríos y afluentes hacia el mar, inmovilizan grandes cantidades de sedimentos ricos en materia orgánica que llegan por escorrentía desde tierra, y actúan de filtro de sustancias contaminantes. Junto con las demás formaciones boscosas, constituyen los pulmones del planeta, fijando CO_2 y liberando oxígeno durante la fotosíntesis que realizan. Y, además, son importantes como responsables de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica mediante la oxidación o reducción del óxido nitroso, uno de los denominados gases de efecto invernadero.

Los manglares desempeñan, también, un papel esencial desde el punto de vista económico y socio-cultural. Estos ecosistemas son fuente de recursos para muchas poblaciones campesinas, especialmente en aquellas

regiones donde las tierras adyacentes a los manglares son áridas. Muchos manglares han sido explotados durante siglos para obtener carbón vegetal, leña, madera para la construcción, sal y taninos. La pesca, tanto industrial como artesanal, ha constituido siempre un recurso imprescindible para los habitantes de estas zonas, junto con la explotación de algunas especies de invertebrados marinos que crecen entre las raíces de los mangles, como la ostra, el cangrejo, el langostino y el camarón del mangle. Más recientemente, se han convertido en lugares muy apreciados y explotados para el turismo.

Arrecifes de coral

Los arrecifes de coral constituyen otro ejemplo de los biomas más diversos y productivos y, para científicos como yo dedicados a estudiar los organismos marinos, son sin duda los ecosistemas más idílicos del planeta. Los arrecifes de coral se desarrollan en fondos someros muy iluminados. En muchos lugares, debido a la protección que los arrecifes ofrecen frente al oleaje, ayudan a la conservación de los manglares y praderas de fanerógamas marinas en océanos que, sin la existencia de los arrecifes, serían profundos y pobres en nutrientes. A pesar de la gran extensión que ocupan, los arrecifes están incluidos entre los hábitats marinos más sensibles a las alteraciones ambientales; de hecho, se trata del ecosistema marino más amenazado por la degradación provocada por el hombre, sobre todo por la sobrepesca, la contaminación y el actual cambio climático.

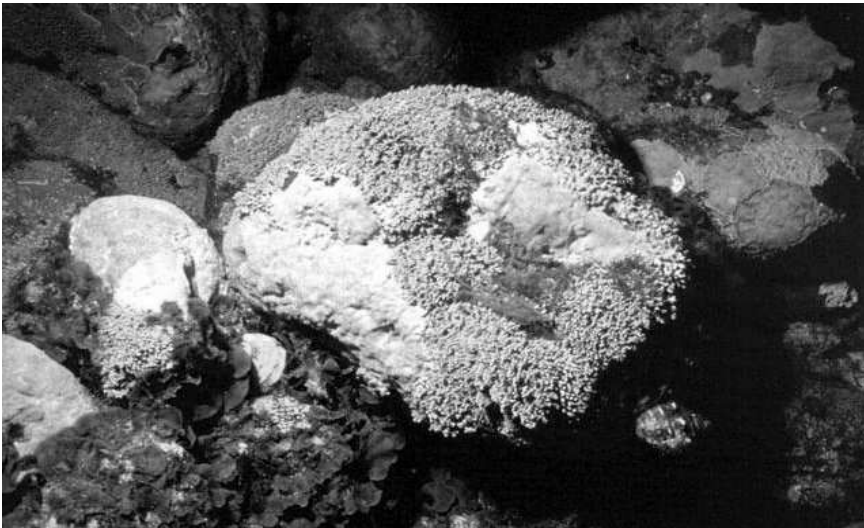
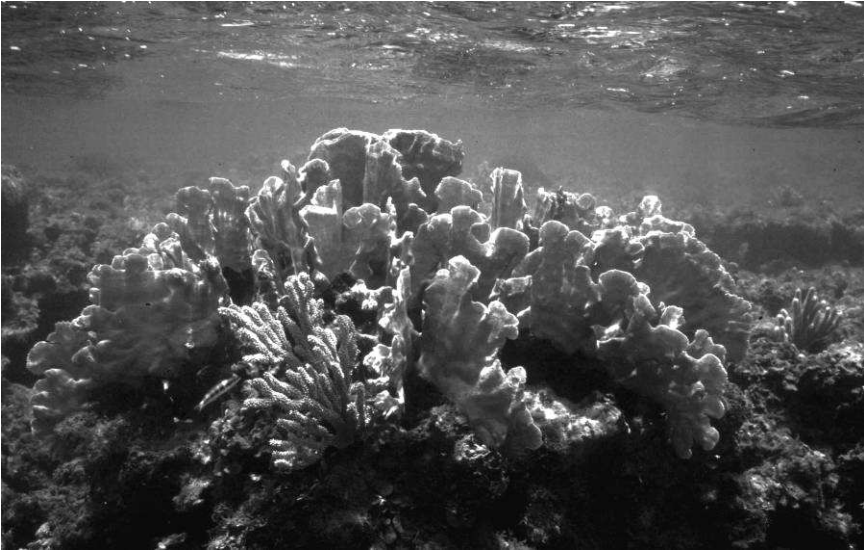
Los arrecifes de coral son estructuras biogénicas, es decir, están contruidos por organismos vivos. Los corales y las algas calcáreas tienen la capacidad de fijar el calcio disuelto en el agua, depositando carbonato cálcico y originando a través de los años enormes estructuras calizas que llegan a ocupar miles de kilómetros de costa y cientos de metros de profundidad. La extensión mundial de los arrecifes de coral es de unos 290.000 km², lo que significa tan sólo un 3% del área total de la plataforma continental tropical; no obstante, son hábitats con una extraordinaria biodiversidad. El arrecife de mayor longitud es la Gran Barrera de Arrecifes localizada en Queensland (Australia), una de las construcciones naturales más grandes del mundo con más de 2.000 km y una superficie de 48.000 km² (Kaiser *et al.* 2005). A pesar de que los pequeños pólipos que forman los corales tienen apenas unos milímetros de diámetro y sólo son visibles bajo un microscopio, las formaciones de arrecifes coralinos se observan claramente desde el espacio. Probablemente, los arrecifes de coral sean los responsables de que algunos de nosotros hayamos iniciado nuestros estudios en biología marina. Tal es la variedad de organismos, con multitud de formas y colores, que conviven en estos hábitats de aguas cristalinas, que bucear en un arrecife de coral es una experiencia inolvidable.

La mayoría de los arrecifes presentan una distribución geográfica entre los 30°N y 30°S, coincidiendo en gran medida con la distribución de los manglares. Su extensión latitudinal se corresponde con un rango de temperatura entre 18 y 36°C, aunque el desarrollo óptimo del arrecife tiene lugar a 26-28°C. La temperatura del agua de mar ayuda a explicar la ausencia de arrecifes en la mayor parte de las costas tropicales de América y África occidental, donde la existencia de afloramientos de aguas frías impide el crecimiento de los corales. En lugares donde las temperaturas varían mucho en espacio y tiempo, los arrecifes muestran un crecimiento intermitente, como ocurre por ejemplo en las islas Galápagos, lugar de encuentro de diversas corrientes oceánicas con distintas temperaturas. La mayor riqueza de especies se encuentra en el Indo-Pacífico, especialmente en el Sudeste de Asia, siendo mucho menor en el Atlántico.

Los arrecifes de coral son de varios tipos, según el sustrato disponible, los cambios en el nivel del mar, el grado de iluminación y la hidrodinámica marina. En la mayoría de las islas tropicales, la línea de costa se caracteriza por presentar plataformas rocosas a modo de repisas, en las que se desarrollan los denominados 'arrecifes de borde'. En estos arrecifes, los corales crecen hacia la superficie y originan una plataforma muy próxima al nivel del mar, que después de miles de años incluso sobresale durante las bajamares. En ese momento, el crecimiento en altura no continúa, ya que los corales no toleran la desecación ni la acción intensa del oleaje. Sin embargo, el arrecife continúa creciendo horizontalmente mientras las condiciones ambientales lo permiten. Los 'arrecifes en parches' tienen poca extensión, crecen en lagunas costeras y con frecuencia están rodeados por arena. Pueden crecer en vertical justo hasta el nivel del agua en marea baja, pero generalmente son más profundos. Los 'arrecifes de barrera' rodean muchas islas tropicales, están separados de la costa por lagunas, y son visibles desde tierra como una línea donde rompe el oleaje. Estos arrecifes se desarrollan rápidamente, ya que la exposición de los corales a las corrientes dominantes favorece su crecimiento. Por último, los 'atolones' son el clásico ejemplo de un arrecife de coral, constituyendo anillos de diez o más kilómetros de diámetro, que rodean a una laguna central formada por hundimiento de una isla volcánica.

Los corales son animales muy sencillos, que pertenecen a los cnidarios antozoos. Existen diferentes tipos de corales, principalmente incluidos en dos grandes grupos. Los corales hermatípicos, mejor conocidos como corales duros o pétreos (*Scleractinia*), son los constructores o formadores del arrecife y sólo crecen en los trópicos. Los corales ahermatípicos, blandos o córneos, presentan una amplia distribución mundial. En los arrecifes del Indo-Pacífico se han identificado unas 700 especies de corales, mientras que en el Atlántico se conocen unas 145 especies; en el Caribe, se han descrito 60 especies de corales pétreos (Spalding *et al.*, 2001). Algunas

de las especies de coral más conocidas son el ‘coral cerebro’ *Symphyllia*, el ‘coral rojo’ *Corallium rubrum*, el ‘coral negro’ *Antipathes*, el ‘coral hongo’ *Fungia*, el ‘coral de fuego’ *Millepora*, el ‘coral córneo’ *Acropora* y los ‘corales blandos’ *Plexaura*, *Eunicea* y *Pseudopterogorgia*.

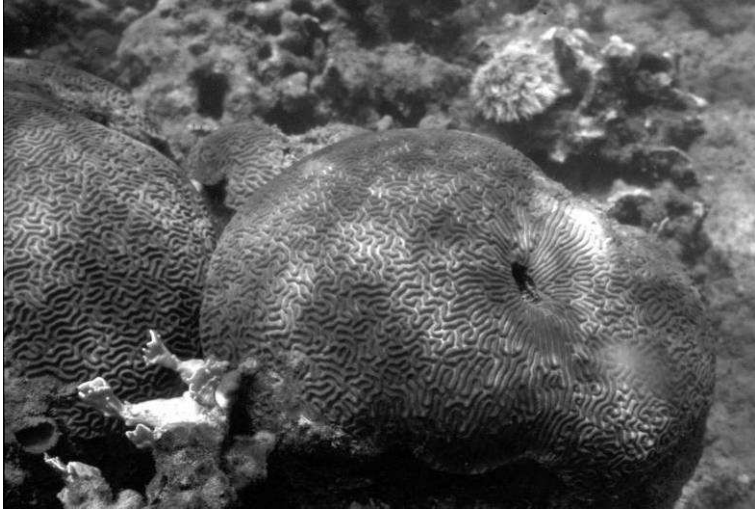


Los arrecifes de coral están contruidos principalmente por corales, como el ‘coral de fuego de cuchillas’ *Millepora complanata* (arriba), y por algas calcáreas (abajo). Estos dos grupos de organismos fijan calcio disuelto en el agua de mar, depositan carbonato cálcico y originan así enormes estructuras calizas, que ocupan miles de kilómetros de costas en regiones tropicales.

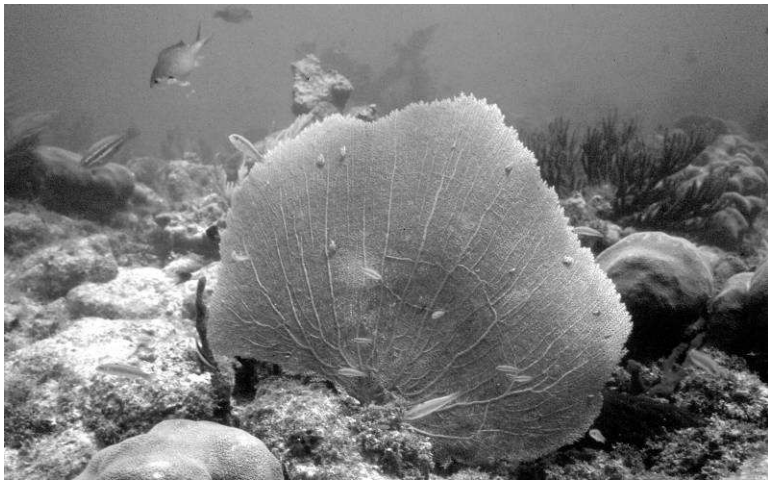
Los pólipos de los corales hermatípicos generalmente contienen unas microalgas, denominadas zooxantelas, que realizan la fotosíntesis y proporcionan energía a los pólipos. La relación entre ellos es una simbiosis, ya que los pólipos ofrecen a las zooxantelas protección y nutrientes, mientras que las zooxantelas fijan carbono y producen energía para los pólipos de los corales. Esta simbiosis puede romperse y, por último, provocar la muerte de los corales bajo condiciones de estrés, como valores de temperatura, luz ultravioleta y niveles de nutrientes muy elevados. Las zooxantelas son dinoflagelados, la mayoría pertenecientes al género *Symbiodinium*. Pueden vivir independientemente del coral, en forma de célula flagelada de vida libre; sin embargo, en los pólipos pierden sus flagelos y su movilidad. De acuerdo con Muller-Parker & D'Elia (1997), las zooxantelas se pueden transmitir durante la reproducción del coral, pero los corales también pueden obtenerlas directamente del agua de mar. Las aguas tropicales son pobres en nutrientes, por lo que los pólipos del coral obtienen los nutrientes necesarios capturando zooplancton, y a partir de los productos de la fotosíntesis de las zooxantelas. Las zooxantelas son autótrofas, es decir necesitan nutrientes, luz y dióxido de carbono para fijar carbono. Los nutrientes los obtienen reciclando productos de desecho del coral, directamente del zooplancton capturado por los pólipos o del agua de mar. Durante la fotosíntesis, a partir del dióxido de carbono producen materia orgánica. Cuando la tasa de fotosíntesis es alta, la toma rápida de CO₂ estimula la precipitación de carbonato cálcico en la base de los pólipos.

El éxito en la reproducción y reclutamiento de los corales es esencial para el desarrollo de los arrecifes. La reproducción asegura la formación de nuevos individuos y el reclutamiento es el proceso por el cual los corales jóvenes se unen a la comunidad. Los corales se reproducen asexual y sexualmente. Muchas colonias de corales se multiplican por gemación, es decir, formando yemas. Los pólipos también pueden desprenderse de algunas colonias y dar lugar a otras nuevas. Los corales ramificados, por ejemplo, pueden fragmentarse y originar nuevas colonias. No obstante, la dispersión a larga distancia se logra mediante la reproducción sexual. Muchas especies son hermafroditas. Las células sexuales, huevos y esperma, son expulsadas al mar, siguiendo ritmos relacionados con ciclos lunares. La fecundación es externa, muchas veces sincrónica, y las puestas son tan numerosas que llegan a teñir las aguas. Cuando esto ocurre es todo un espectáculo, como el lector ha podido observar alguna vez en algunos documentales. Aunque muchos huevos son devorados por los peces, se producen tantos que la mayoría sobrevive. Los huevos fecundados se desarrollan en una larva con cilios, denominada plánula, que puede impulsarse y alcanzar grandes distancias antes de fijarse. Estas larvas generalmente adquieren las zooxantelas después de fijarse y sufrir la metamorfosis, durante la cual secretan en su base una placa calcificada y

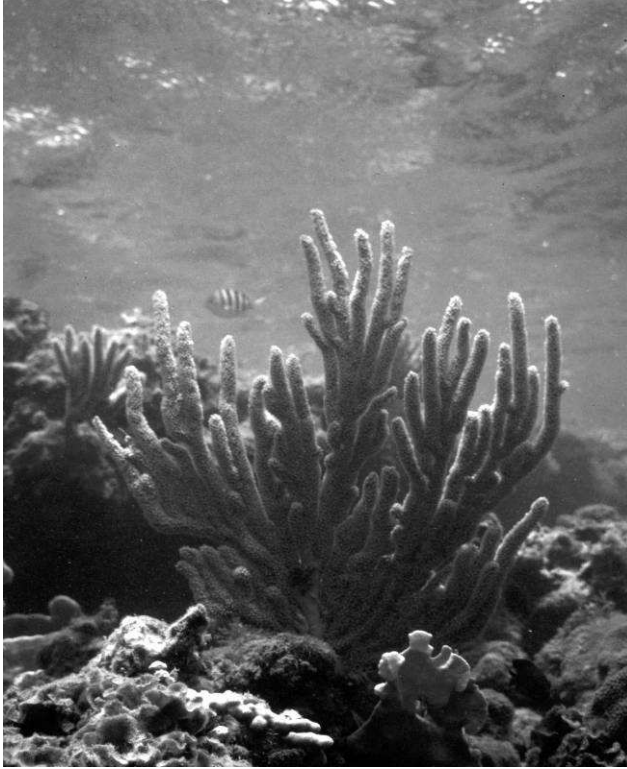
desarrollan la forma del pólipo. Los pólipos mueren después de un cierto tiempo, pero las estructuras calcáreas se mantienen y son colonizadas por nuevos pólipos, generación tras generación. Kaiser *et al.* (2005) dedican un capítulo a los arrecifes de coral, donde describen de una forma muy amena todos estos acontecimientos.



Los corales duros o pétreos forman estructuras muy firmes y con aspecto de roca, son los verdaderos constructores del arrecife. En esta imagen, el 'coral cerebro' *Diploria strigosa* muy abundante en arrecifes poco profundos del Caribe.



Los corales córneos tienen esqueletos elásticos, a veces formando abanicos dispuestos transversales a la corriente principal. En la fotografía, un espécimen de *Gorgonia ventalina* en un arrecife en República Dominicana.



Los corales blandos forman localmente grandes poblaciones, entremezclados con corales pétreos, con los que compiten por el espacio. Estos corales, con formas y dimensiones tan espectaculares, contribuyen a la configuración y a la gran biodiversidad de los arrecifes.

Los arrecifes de coral constituyen un hábitat biológicamente muy diverso y ecológicamente muy complejo. Son auténticos laboratorios naturales, extraordinarios para estudiar la ecología, el comportamiento y la dinámica de las poblaciones marinas. Aunque ocupan menos del 1% de la superficie total de los océanos, casi la mitad de todas las especies de peces marinos conocidos se encuentra en estas aguas tropicales poco profundas. En general, podemos decir que la diversidad de especies en los arrecifes es comparable con la de los bosques lluviosos tropicales. Además de las numerosas especies de corales, en estos ecosistemas habitan muchas especies de algas, gasterópodos, bivalvos, equinodermos y peces (Spalding *et al.*, 2001). La mayoría de los corales necesitan la presencia de algas rojas coralinales para que la metamorfosis de sus larvas y el establecimiento de los pólipos tengan éxito. Estas algas, por su parte, necesitan que los peces e invertebrados ramoneen y mantengan limpia su superficie, lo que contribuye a que su tasa de fotosíntesis sea óptima. Además de estas algas

rojas, otro grupo de algas verdes calcificadas, al que pertenece el género *Halimeda*, son también dominantes y contribuyen a la cementación de los arrecifes y a la producción de la arena orgánica que se encuentra en las lagunas internas al arrecife. Muchas áreas de arrecifes que no han sido colonizadas por los corales son ocupadas por poblaciones de algas filamentosas o frondosas, que son directamente consumidas por los herbívoros. La presión de los herbívoros y el nivel de nutrientes son los responsables de que en estos hábitats dominen los corales o las algas. De acuerdo con Littler & Littler (1985), cuando la cantidad de nutrientes es baja y la actividad de los herbívoros es alta, dominan los corales; por el contrario, cuando los niveles de nutrientes son elevados y la actividad de los herbívoros es reducida dominan las algas frondosas.

Desde el punto de vista ecológico, los arrecifes de coral son ecosistemas muy productivos. Los corales son responsables de una elevada fijación de carbono, aunque menos de la mitad del carbono fijado queda finalmente disponible para los consumidores. La mayor parte del carbono es utilizado, reciclado o acumulado dentro de la propia colonia. De hecho, son muy pocos los animales del arrecife que consumen directamente los pólipos de coral, entre ellos el ‘gasterópodo’ *Drupella*, la ‘estrella corona de espinas’ *Acanthaster*, y algunos ‘peces loro’ o ‘peces mariposa’. Por el contrario, las algas de los arrecifes son muy productivas, y el carbono que fijan juega un papel mucho más importante en el mantenimiento de las cadenas tróficas, ya que ellas sí que son directamente consumidas por muchos herbívoros. Las tasas de producción primaria bruta de las algas de los arrecifes oscilan entre 1 y 14 gramos de carbono por m² y día, de los cuales un 20 a 90% queda disponible después de la respiración (Kaiser *et al.*, 2005).

Los arrecifes de coral son los hábitats marinos en los que podemos encontrar una mayor diversidad de asociaciones biológicas entre sus habitantes. Ya he comentado anteriormente la relación de simbiosis entre los corales hermatípicos y las zooxantelas, imprescindibles en la construcción de los arrecifes. Pero existen muchísimas más. Por ejemplo, algunos crustáceos viven asociados con peces; algunos peces viven entre los tentáculos de las anémonas; existen cangrejos que habitan en corales cerebro; algunas gambas viven dentro de las conchas de cangrejos ermitaños; pequeños peces limpian la superficie de peces de mayor tamaño eliminando sus parásitos, etc. Todas estas asociaciones contribuyen significativamente a la elevada complejidad de estos ecosistemas.

Los arrecifes juegan un papel muy importante como barreras naturales muy efectivas frente al oleaje en las zonas costeras de las regiones tropicales. Sobre todo frenan y rompen las grandes olas antes de llegar a la línea de costa, disminuyendo así su efecto mecánico. De esta forma, no sólo protegen a la población en estas costas tan vulnerables durante las épocas de tormentas, sino que también protegen a los otros ecosistemas marinos

singulares en estas regiones, los manglares y las praderas de fanerógamas marinas tropicales, formados más próximos a la costa.

Desde el punto de vista económico y socio-cultural, los arrecifes coralinos también son lugares de gran importancia. Para millones de personas, con frecuencia de los países más pobres del planeta, los arrecifes constituyen la fuente principal de alimentos. En muchas costas tropicales, el consumo de pescado es el aporte esencial de proteínas en la dieta de la población. Los arrecifes además son muy valiosos porque generalmente constituyen una gran fuente de ingresos. Estos lugares siempre han atraído turismo, especialmente buceadores fascinados por la riqueza de los fondos marinos, lo que se traduce en beneficios económicos para algunos sectores de estos países tropicales.

Efectos del cambio climático sobre estos biomas tropicales

Los manglares y los arrecifes de coral, junto con las praderas de fanerógamas marinas, han sido reconocidos por el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) como los hábitats marinos más valiosos y con mayor biodiversidad del mundo. Como les he mostrado previamente, son biomas excepcionales y únicos desde el punto de vista biológico, ecológico, económico y socio-cultural. Por ello, su deterioro y su pérdida tienen consecuencias irreparables, no sólo para la gran variedad de organismos que viven en ellos sino también para los habitantes de estas regiones tropicales, habiéndose estimado por ejemplo que por cada mangle destruido se pierden anualmente más de setecientos kilos de especies marinas con importancia comercial.

Aunque estos ecosistemas han sido tradicionalmente explotados por la población local, no todos los aprovechamientos de los recursos naturales se realizan actualmente respetando un equilibrio con el medioambiente. Desde mediados del siglo XX, el crecimiento de la población, la expansión urbana, el consumismo y la utilización de nuevas tecnologías para la extracción de los recursos han causado directa o indirectamente daños en los manglares y los arrecifes de coral en muchas regiones del mundo.

En relación con los manglares, las extracciones abusivas para empresas madereras o papeleras, la construcción de infraestructuras y la cría intensiva del camarón para la exportación han representado los peligros más graves hasta el momento. En la actualidad, se han talado más de un millón de hectáreas de bosques de mangles para instalar piscinas para la cría del camarón, causando una gran deforestación. Para estos cultivos se emplean grandes cantidades de productos químicos (alimento, fertilizantes, plaguicidas, antibióticos) que contaminan los recursos hídricos locales y provocan la degradación del hábitat y de los ecosistemas marinos próximos.

La asociación ecologista Greenpeace estimó que, en 1980, había unos 17 millones de hectáreas de manglares a nivel mundial. Según datos de la FAO, actualmente más de un 50% de estos manglares ya han desaparecido. Las alteraciones del hábitat como consecuencia del actual cambio climático están potenciando aún más esta pérdida. Por una parte, las lluvias torrenciales son cada vez más frecuentes e intensas en estas regiones tropicales, lo que provoca que los manglares se vean muy afectados por un brusco descenso de la salinidad, una excesiva sedimentación, así como un aumento de sustancias contaminantes que llegan hasta las costas arrastradas desde tierra. Por otra parte, el ascenso del nivel del mar, como consecuencia del aumento de la temperatura en el planeta, está causando la inundación progresiva de estos ecosistemas cuyos organismos, adaptados durante mucho tiempo a tolerar las oscilaciones de mareas, no soportan una inmersión continua en el agua marina. Además, las tormentas y el aumento del nivel del mar determinan una mayor erosión de las costas, ya que se pierden estas barreras naturales.

Con respecto a los arrecifes de coral, las prácticas de pesca destructivas, la sobrepesca, la contaminación y el fondeo de embarcaciones han sido las principales amenazas para estos biomas excepcionales. El impacto de estas actividades humanas ha causado debilidad en los corales, lo que ha favorecido la aparición de enfermedades por patógenos o parásitos agravando la situación (Richardson, 1998). Incluso, algunos arrecifes se han visto seriamente amenazados y dañados por algunos predadores del coral, como la estrella de mar ‘corona de espinas’, cuya elevada abundancia y proliferación ha estado relacionada con la sobrepesca de sus predadores naturales. Como comenté para los manglares, las alteraciones del hábitat relacionadas con el actual cambio climático están potenciando la pérdida de los arrecifes a nivel mundial. La luz es vital para el desarrollo de los corales. Por ello, cuando la sedimentación es elevada y las aguas se vuelven turbias, las zooxantelas no pueden fotosintetizar y los corales mueren. Algunos corales pueden eliminar cierta cantidad de sedimentos de su superficie pero, en general, los sedimentos ahogan a los corales y causan abrasión, sombreado e impiden su reproducción. Actualmente, la excesiva sedimentación en estos hábitats se debe a determinadas prácticas agrícolas, obras de dragados y desarrollo costero, pero también al gran arrastre de sedimentos desde tierra, como consecuencia de las tormentas provocadas por el cambio climático, que no pueden ser frenados ni filtrados por los manglares próximos. Generalmente, los corales no resisten oleajes intensos, y el efecto mecánico de las olas provoca roturas y desprendimientos. Debido a que las tormentas tropicales, ciclones y huracanes se están produciendo con mayor intensidad y frecuencia, los corales de crecimiento lento no tienen tiempo para recuperarse. Los corales, además, son muy sensibles a cambios de temperatura. Una de las consecuencias más

evidentes del incremento de la temperatura en el agua del mar es el denominado blanqueamiento de los corales. Un aumento de temperatura de 1-2°C provoca la expulsión de las zooxantelas de los pólipos, quedando visible el esqueleto blanco de los corales. El blanqueamiento lleva a una disminución del crecimiento, de la reproducción y, si se prolonga en el tiempo, a la muerte del coral. Estos corales sin zooxantelas son colonizados por algas verdes filamentosas que transforman el arrecife. Los peces e invertebrados característicos del arrecife desaparecen, y los herbívoros se vuelven dominantes. Si la temperatura, la acidificación del agua y el nivel del mar continuaran subiendo al ritmo actual, se produciría la muerte generalizada de los arrecifes de coral (Miller, 2007). Sólo el ascenso del nivel del mar, a una velocidad más rápida que la tasa de crecimiento del coral, provocaría su desaparición al quedar a demasiada profundidad e impedir la fotosíntesis de las zooxantelas, como ocurrió hace 8.000 años al final de la última glaciación (Veron, 2000).

Quiero terminar mi exposición utilizando parte de la información recogida en la Exposición sobre El Cambio Climático (CLARITY), en la que participa el Organismo Autónomo Parques Nacionales (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2008), con el propósito de que el lector reflexione sobre este problema global que entre todos podemos contribuir a frenar:

“El cambio climático está ya en marcha, pero aún no es demasiado tarde para actuar. Todos podemos contribuir a construir soluciones para este grave problema global. Los cambios en nuestros hábitos cotidianos son importantes, pero también hay que resaltar la responsabilidad de gobiernos locales, regionales o nacionales para hacer posible la protección del clima... Impuestos a las energías más contaminantes, incentivos a las energías limpias, normas que limiten las emisiones asociadas a diferentes productos o servicios... Los gobiernos cuentan con diferentes herramientas para ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y para iniciar el camino hacia un futuro libre de combustibles fósiles”.

Referencias

- AMSLER, C.D., R.J. ROWLEY, D.R. LAUR, L.B. QUETIN & R.M. ROSS (1995). Vertical distribution of Antarctic peninsular macroalgae: cover, biomass and species composition. *Phycologia* 34: 424-430.
- APPENZELLER, T. (2007). El gran deshielo. *National Geographic España* 21: 26-41.
- BALLESTEROS, E. (1993). Algunas observaciones sobre las comunidades de algas profundas de Lanzarote y Fuerteventura (Islas Canarias). *Vieraea* 22: 17-27.

- BROWN, A.C. & A. MCLACHLAN (2002). Sandy shores ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025. *Environmental Conservation* 29: 62-77.
- FARNSWORTH, E.J. & A.M. ELLISON (1996). Scale-dependent spatial and temporal variability in biogeography of mangrove root epibiont communities. *Ecological Monographs* 66: 45-66.
- GIL-RODRÍGUEZ, M.C., J. AFONSO-CARRILLO & R. HAROUN (1992). Flora ficológica de las islas Canarias. In: Kunkel, G. (coord.), *Flora y vegetación del Archipiélago Canario. Tratado florístico. 1ª parte*. pp. 95-121. Edirca S.L. Las Palmas de Gran Canaria.
- GIL-RODRÍGUEZ, M.C., M. DEL ARCO, W. WILDPRET DE LA TORRE, C.L. HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ & R.J. HAROUN (2007). Biological information and comments on *Halophila decipiens* meadows of the Canary Islands (Hydrocharitaceae, Magnoliophyta). *Vieraea* 35: 77-85.
- HOGARTH, P.J. (1999). *The Biology of Mangroves*. Oxford University Press, Oxford.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability – Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- KAISER, M.J., M.J. ATTRILL, S. JENNINGS, D.N. THOMAS, D.K.A. BARNES, A.S. BRIERLEY, N.V.C. POLUNIN, D.G. RAFFAELLI & P.J.B. WILLIAMS (2005). *Marine Ecology: Processes, Systems, and Impacts*. Oxford University Press, Oxford.
- KENNISH, M. (2002). Environmental threats and environmental future of estuaries. *Environmental Conservation* 29: 78-107.
- LARKUM, A.W.D., A.J. MCCOMB & S.A. SHEPHERD (1989). *Biology of Seagrasses. A treatise on the biology of seagrasses with special reference to the Australian region*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands.
- LITTLER, D.S. & M.M. LITTLER (2000). *Caribbean Reef Plants. An identification guide to the reef plants of the Caribbean, Bahamas, Florida and Gulf of Mexico*. OffShore Graphics, Inc., Washington, USA.
- LITTLER, M.M. & D.S. LITTLER (1985). Models of tropical reef biogenesis: the contribution of algae. *Progr. Phycol. Res.* 3: 323-364.
- LÜNING, K. (1990). *Seaweeds. Their environment, biogeography and ecophysiology*. J. Wiley & Sons, Inc., New York.
- LUQUE, A.A. & J. TEMPLADO (Coords.) (2004). *Praderas y bosques marinos de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla.
- MILLER, D. (Ed.) (2007). Cambio climático. *National Geographic España (Supl.)* 21.

- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO (2008). Exposición El Cambio Climático (CLARITY). <http://www.mma.es>.
- MULLER-PARKER, G. & C.F. D'ELIA. (1997). Interactions between corals and their symbiotic algae. *In: Birkeland, C.F. (ed.), Life and Death of Coral Reefs*. pp. 96-113. Chapman & Hall, New York.
- NICKLEN, P. (2007). Vida ártica amenazada. *National Geographic España* 21: 2-25.
- O'NEILL, T. (2007). La Tierra, un invernadero. *National Geographic España (Supl.)* 21.
- REYES, J., M. SANSÓN & J. AFONSO-CARRILLO (1995). Distribution and reproductive phenology of the seagrass *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson in the Canary Islands. *Aquat. Bot.* 50: 171-180.
- RICHARDSON, L.L. (1998). Coral diseases: what is really known? *Trends in Ecology and Evolution* 13: 438-443.
- SANSÓN, M., J. REYES & J. AFONSO-CARRILLO (2001). Flora Marina. *In: Fernández-Palacios, J.M. & Martín Esquivel, J.L. (eds), Naturaleza de las Islas Canarias. Ecología y Conservación*. pp. 193-198. Publicaciones Turquesa, Santa Cruz de Tenerife.
- SPALDING, M.D., C. RAVILIOUS & E.P. GREEN (2001). *World Atlas of Coral Reefs*. University of California Press, Berkeley.
- STENECK, R.S., M.H. GRAHAM, B.J. BOURQUE, D. CORBETT, J.M. ERLANDSON, J.A. ESTES & M.J. TEGNER (2002). Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation* 29: 436-459.
- THOMPSON, R.C., T.P. CROWE & S.J. HAWKINS (2002). Rocky intertidal communities: past environmental changes, present status and predictions for the next 25 years. *Environmental Conservation* 29: 168-191.
- TOMLINSON, P.B. (1986). *The botany of mangroves*. Cambridge University Press, Cambridge.
- VAN DEN BERG, E. (2007). Gran Angular. Cambio climático en España. *National Geographic España* 21: 12 pp.
- VERON, J.E.N. (2000). *Corals of the World*. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Queensland, Australia.