

El cambio climático y sus consecuencias para los ecosistemas costeros de las Islas Baleares

Carlos M. DUARTE y Joaquín TINTORÉ

SHNB



SOCIETAT D'HISTÒRIA
NATURAL DE LES BALEARS

Duarte, C.M. y Tintoré, J. 2001. El cambio climático y sus consecuencias para los ecosistemas costeros de las Islas Baleares. In: Pons, G.X. i Guijarro, J.A. (Eds.): *El canvi climàtic: passat, present i futur*. Mon. Soc. Hist. Hist. Nat. Balears, 9: 159-172. ISBN: 84-87818-34-X. Palma de Mallorca.

El cambio climático es el problema medioambiental más importante del siglo XXI, afectando a todas las actividades humanas, incluidas la provisión de agua y alimento para la humanidad. Este cambio afectará de manera particularmente importante a las áreas insulares, ya que tienen una mayor dependencia de las zonas costeras, las cuáles se verán fuertemente afectadas por el cambio climático. Esta dependencia se materializa, en el caso de las Islas Baleares, en una dependencia económica, derivada del papel clave de la industria turística. Esta industria es especialmente sensible al cambio climático, por lo que las consecuencias para los ecosistemas costeros que se discuten en este capítulo tendrán también importantes repercusiones sobre la economía y sociedad balears. En este capítulo examinamos primero los conceptos de cambio climático y cambio global, revisamos las consecuencias de los cambios que se han producido durante el siglo XX para los ecosistemas costeros y finalmente evaluamos los cambios adicionales que se esperan sobre la base de las predicciones de escenarios posibles para el siglo XXI, y las actuaciones que debieran emprenderse para minimizar las consecuencias negativas del cambio climático. Todo este ejercicio se lleva a cabo bajo una notable carencia de datos específicos para las Islas Baleares, lo que revela de inmediato la necesidad de contar con una base observacional, sujeta a un control de calidad riguroso, capaz de permitir, a través de su integración en un sistema interdisciplinar de análisis, la detección de cambios en los ecosistemas costeros de las Islas Baleares.

Palabras clave: *ecosistemas costeros, cambio climático, transformación de ecosistemas, Posidonia oceánica, monitorización, Islas Baleares.*

EL CANVI CLIMÀTIC I LES SEVES CONSEQÜÈNCIES PER ALS ECOSISTEMES COSTANERS DE LES ILLES BALEARS. El canvi climàtic és el problema mediambiental més important del segle XXI, afectant a totes les activitats humanes, incloses la provisió d'aigua i aliment per a la humanitat. Aquest canvi afectarà de forma particularment important a les àrees insulars, ja que tenen una major dependència de les zones costeres, que es veuran intensament afectades pel canvi climàtic. Aquesta dependència es materialitza, en el cas de les Illes Balears, en una dependència econòmica, derivada del paper clau de la indústria turística. Aquesta indústria és especialment sensible al canvi climàtic, pel que les conseqüències per als ecosistemes costaners que se discuteixen en aquest capítol ten-

dran també importants repercussions sobre l'economia i la societat de les Balears. En aquest capítol s'examinen primer els conceptes de canvi climàtic i canvi global, revisam les conseqüències dels canvis que s'han produït durant el segle XX per als ecosistemes costaners i finalment avaluam els canvis addicionals que s'esperen sobre la base de les prediccions d'escenaris possibles per al segle XXI, i les actuacions que es tendrien que emprendre per a minimitzar les conseqüències negatives del canvi climàtic. Tot aquest exercici es du a terme sota una notable carència de dades específiques per a les Illes Balears, el que revela la necessitat de comptar amb una base observacional, subjecta a un control de qualitat rigorós, capaç de permetre, a través de la seva integració en un sistema interdisciplinari d'anàlisi, la detecció de canvis en els ecosistemes costaners de les Illes Balears.

Paraules clau: *ecosistemes costaners, canvi climàtic, transformació d'ecosistemes, Posidonia oceanica, monitorització, Illes Balears.*

CLIMATIC CHANGE AND THEIR IMPACT ON COASTAL ECOSYSTEMS OF THE BALEARIC ISLANDS. The climatic change is the most relevant environmental problem of the XXI century, affecting all human activities, including water and food supplies to mankind. This change will dramatically affect insular areas, since they have a greater dependence on coastal areas that will be strongly affected by the climatic change. In the case of the Balearic Islands, this dependence will be mainly economical, derived from its key role on the tourist industry. This industry is specially sensitive to the climatic change, and therefore aftermath for coastal ecosystems discussed in this chapter will also have important effects on the Balearic economy and society. In this chapter the concepts of climatic and global change will be examined first, consequences of changes suffered by coastal ecosystems through the XX century will be revised, and finally we will evaluate the added changes that can be expected based on the different scenarios predicted for the XXI century, and the actions to undertake to minimize the negative consequences of the climatic change. All this exercise is done under a remarkable lack of specific data for the Balearic Islands, thereby revealing the need to count with an observational basis, subject to a thorough quality control, able to permit, through its integration in an interdisciplinary analysis system, the detection of changes in the coastal ecosystems of the Balearic Islands.

Keywords: *coastal ecosystems, climatic change, ecosystem transformation, Posidonia oceanica, monitoring, Balearic Islands.*

Carlos M. DUARTE y Joaquín TINTORÉ; Grupo de Oceanografía Interdisciplinar; Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados IMEDEA (CSIC - UIB); C/ Miquel Marqués, 21; 07190 Esporles

Cambio climático y cambio global: variabilidad natural y antropogénica

El concepto de cambio climático encierra, en sí mismo, una paradoja, pues su antónimo, la constancia climática no ha existido a lo largo de la existencia del planeta Tierra. El clima es un sistema dinámico y cambiante,

sobre la base de reacciones a procesos de distinta índole, incluidos procesos biológicos, que afectan la composición de la atmósfera y el albedo del planeta Tierra, procesos astronómicos, como cambios en la actividad solar o el impacto de meteoritos, procesos físicos como las corrientes oceánicas que modifican y redistribuyen la energía recibida sobre la superficie del mar, y procesos internos, como

la actividad volcánica, que afecta la concentración de aerosoles en la atmósfera.

Debido a la participación de múltiples factores e interacciones entre ellos, el clima es uno de los sistemas ambientales más complejos del planeta. El estudio del sistema climático implica la comprensión de los procesos interdisciplinarios que tienen lugar en el sistema 'atmósfera-tierra-océanos' y de sus interacciones. Desvelar esta complejidad intrínseca es uno de los mayores retos para la ciencia, siendo importante notar que esta complejidad no es un pretexto del científico para justificar la dificultad de formular predicciones fiables, sino que es una realidad característica de los sistemas naturales que no podemos soslayar.

La variabilidad del clima depende de las escalas temporales en que nos fijemos y puede ser natural o inducida por las actividades humanas. La identificación del cambio climático como problema global se refiere a la creciente evidencia de que la actividad humana está interfiriendo con los sistemas de control del clima en el planeta Tierra a través de una serie de cambios locales que conducen a cambios en procesos esenciales a escala pla-

netaria. Estos cambios conforman, colectivamente, lo que se ha dado en llamar cambio global, los cuales conducen al cambio climático que, a su vez, incide sobre los procesos de cambio global.

La capacidad de la humanidad para incidir sobre los procesos esenciales sobre los que se apoya la biosfera, o cambio global, ha llegado a tal punto, que la humanidad domina muchos de estos procesos en la actualidad, por lo que el siglo XXI se ha proclamado como el comienzo de una nueva era geológica, el Antropoceno, en el cuál una sola especie, *Homo sapiens*, afecta los procesos básicos del planeta, entre ellos el cambio climático. Sin embargo, es importante ser conscientes de que nuestra capacidad de modificación del planeta no ha avanzado en paralelo a la comprensión de los procesos que se ven modificados. A esta situación se ha llegado a través del crecimiento de la población humana y el aumento del uso de energía per cápita. El examen del desarrollo de la población humana durante su existencia muestra un crecimiento exponencial sostenido durante cerca de un millón de años (Fig. 1), lo que repre-

Población humana (millones)

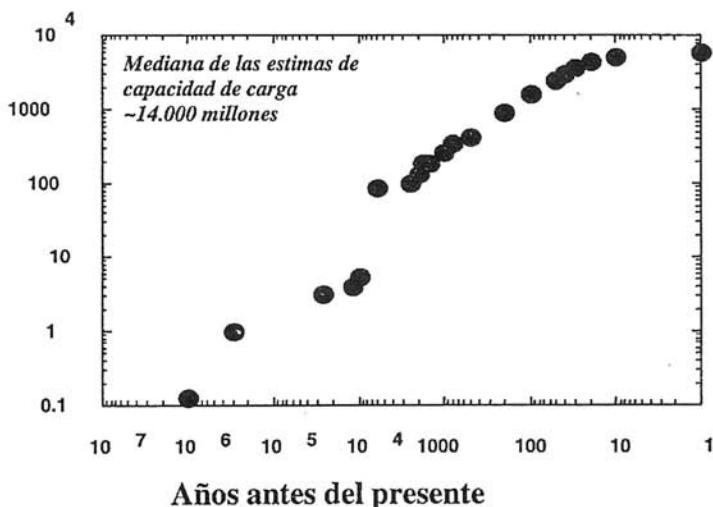


Fig. 1. Evolución de la población humana en el tiempo. Modificado de Cohen (1995).

Fig. 1. Evolution of the human population over time. Modified from Cohen (1995).

senta - hasta donde sabemos - el crecimiento sostenido de una sola especie más espectacular en la historia de la vida en el planeta, sólo comparable al desarrollo de algunas especies, como especies domesticadas (e.g. vacas, gallinas) y parásitas (e.g. ratas, algunos microorganismos patógenos), asociadas al hombre. Así, el crecimiento de la población humana esperado en la próxima década es comparable al crecimiento de la población humana durante el 99 % de la historia de nuestra especie (Fig. 1).

La utilización de recursos del planeta: la transformación de la Tierra

Durante los últimos 130 años, asociado a la revolución industrial, el hombre ha aumentado notablemente la capacidad de modificar su entorno para mantener el crecimiento de la población a través del uso de la

energía. Así, el uso de la energía per cápita de la humanidad se ha disparado por 6 veces durante el siglo XXI (Fig. 2). Este uso de energía supone un aumento del consumo de recursos per cápita que, unido al aumento exponencial de la población, explica la enorme demanda de recursos por la humanidad y su capacidad para alterar su entorno.

La capacidad de la humanidad para controlar procesos claves en el funcionamiento del planeta se puede resumir en algunas cifras (Fig. 3): la humanidad controla el 55% del ciclo hidrológico, un 20% del CO₂ presente en la atmósfera ha sido liberado por el hombre, que acapara un 40% de toda la producción primaria terrestre, y aproximadamente un 50% del territorio del planeta ha sido domesticado, convertido en pastizales, campos de cultivo o áreas urbanas (1-2% del territorio). Este uso de territorio se ha llevado a cabo, en gran medida, de forma no sostenible, por lo que la proporción del territorio que

Uso de energía per cápita (MW-h/año)

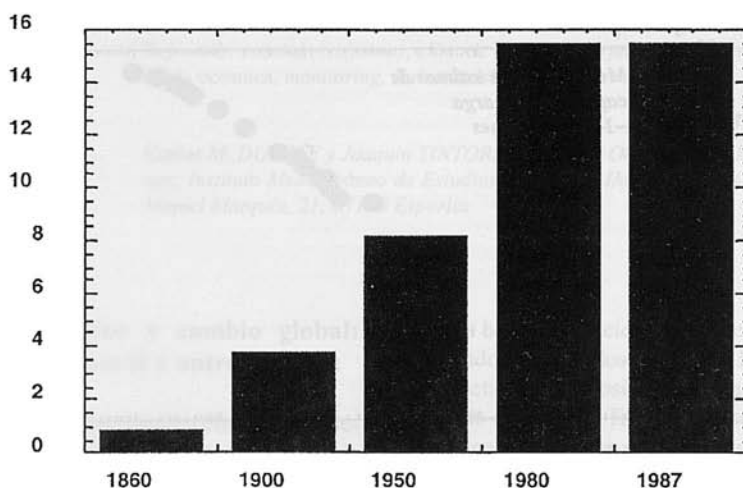


Fig. 2. Evolución del consumo de energía promedio per cápita. Modificado de Cohen (1995).
Fig. 2. Evolution of average per capita energy consumption. Modified from Cohen (1995).

Impacto global de la actividad humana (% de cambio)

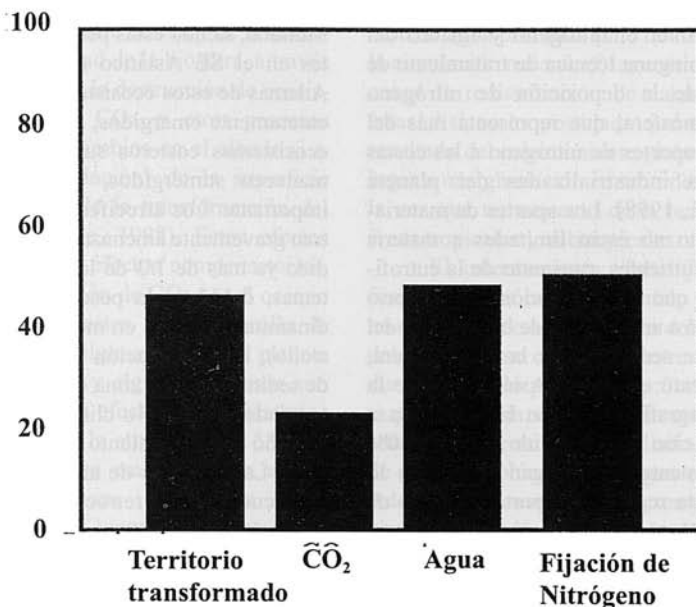


Fig. 3. Indicadores del impacto global del hombre cuantificado a través del porcentaje de territorio transformado, el porcentaje de CO_2 en la atmósfera de origen antropogénico, el porcentaje del flujo de agua anual accesible utilizado, y el porcentaje de la fijación total de nitrógeno debido a actividades humanas. Modificado de Vitousek *et al.* (1998).

Fig. 3. Indicators of Man's global impact quantified by means of the percentage land area transformed, the percentage of CO_2 of human origin in the atmosphere, the percentage of annual accessible water flow used, and the percentage of total nitrogen fixing due to human activities. Modified from Vitousek *et al.* (1998).

sufre procesos de desertización supone el 17% de toda la superficie del planeta. De hecho, el crecimiento de la superficie agrícola ha sido de un 0.15% anual, mucho menor que la tasa de crecimiento de la población. La producción de alimento ha sido, por tanto, posible, a partir de un aumento importante del rendimiento de los cultivos, a partir del uso de fertilizantes, que ha venido aumentando en un 2% anual. El uso de fertilizantes se generaliza a partir de la segunda mitad del siglo XX, cuando se implementa a nivel industrial la reacción responsable de la fijación de nitrógeno atmosférico en forma reactiva, proceso que es responsable, en la actualidad, de más del 50% de toda la fijación de nitrógeno que ocurre en el planeta (Schuur y Matson, 2000). De

hecho la humanidad, a través de procesos industriales y agrícolas, capta nitrógeno inerte (gas) de la atmósfera y devuelve nitrógeno reactivo a la misma, de forma que aproximadamente la mitad de todo el nitrógeno reactivo presente en la atmósfera es antropogénico.

La humanidad moviliza, por tanto, cantidades importantes de nitrógeno y fósforo, que eventualmente fluyen a la zona costera, donde se está constatando un aumento de la frecuencia de procesos de eutrofización, que comprenden el deterioro de la calidad del agua en respuesta al aporte excesivo de nutrientes y materia orgánica. La implementación de tratamiento de aguas no consigue paliar este efecto, puesto que (1) el tratamiento de aguas de cualquier tipo solamente alcan-

za al 30% de la población en los países más desarrollados (OECD), (2) solamente el tratamiento terciario, que representa una proporción mínima del volumen de aguas tratadas, consigue extraer el nitrógeno y fósforo del agua, y (3) ninguna técnica de tratamiento de aguas impide la deposición de nitrógeno desde la atmósfera, que representa más del 30% de los aportes de nitrógeno a las costas de regiones industrializadas del planeta (Nixon *et al.*, 1998). Los aportes de materiales al océano no están limitados a materia orgánica y nutrientes, causantes de la eutrofización, sino que la degradación del territorio ha conducido a un aumento de la erosión y del transporte de sedimentos a la zona costera, particularmente en el SE Asiático donde la abrupta topografía junto con la elevada tasa de deforestación ha conducido a que el 30% de los sedimentos que llegan al océano lo hagan en esta región. El aporte excesivo de sedimentos causa, en esta y otras regiones, un deterioro importante de los ecosistemas costeros (e.g. Fortes, 1988).

La transformación de la superficie del planeta no es sólo un proceso terrestre, sino que alcanza a los cauces de agua dulce y a la zona costera. Aproximadamente un 13% de todo el flujo de agua por cauces fluviales está regulado por presas (Mackenzie, 1998), cuyo número se sitúa en torno a las 40.000 globalmente, y que, además de retener un volumen de agua que supondría, de ser liberado, un aumento del nivel del mar de 7 cm (Carter 1988), retienen importantes cantidades de sedimentos que han alterado el balance sedimentario de la zona costera. Los efectos de la construcción de embalses sobre los flujos de materiales a la zona costera y el funcionamiento de sus ecosistemas se hicieron patentes tras la construcción de la presa de Asuán, en el Nilo, que ha alterado notablemente el funcionamiento del Delta del Nilo y llevó a la caída de las capturas de boquerón asociadas a las crecidas del Nilo (Carter, 1988). La zona costera ha sufrido una importante transformación, con la destrucción sistemática de ecosistemas dunares, marismas y bosques de manglares en el mundo. Estos últimos se han visto

particularmente afectados, de forma que la superficie de bosques de manglar existente en la actualidad equivale a sólo el 50% de la superficie existente al finalizar la II Guerra Mundial, siendo estas pérdidas más importantes en el SE Asiático (Aksornkoae, 1993). Además de estos ecosistemas intermareales o enteramente emergidos, la destrucción de los ecosistemas costeros submareales, que permanecen sumergidos, ha sido igualmente importante. Los arrecifes de coral se encuentran gravemente amenazados, habiéndose perdido ya más de 1/3 de los 600.000 km² existentes, debido a la pesca incontrolada (con dinamita y cianuro en muchas zonas en desarrollo), la eutrofización y el aporte excesivo de sedimentos a la zona costera, y fenómenos asociados al cambio climático (episodios de El Niño y calentamiento anómalo del agua de mar). Las praderas de angiospermas marinas se encuentran en retroceso a escala global, debiéndose este retroceso a un conjunto de causas, desde causas locales, como la eutrofización, la perturbación física y las actuaciones en la costa que afectan al flujo de sedimentos, y causas globales, como la tendencia erosiva asociada al aumento del nivel del mar (Hemminga y Duarte, 2000). Aunque la superficie de praderas submarinas perdidas se desconoce, los registros de pérdidas se han multiplicado por 10 en las últimas décadas, y han desaparecido casi por completo de las costas de algunos países, como Holanda, donde la zona costera se ha transformado completamente a raíz de actuaciones de ingeniería. Estos datos hacen pensar que la transformación de la zona costera por la actividad humana ha sido también intensa, probablemente de una magnitud comparable o incluso superior a la transformación del territorio.

La transformación del planeta derivada de la acción humana constituye el cambio global, y el cambio climático es, en parte, una consecuencia de esta transformación, cuyas causas últimas (desarrollo de la población humana y el consumo energético per cápita) comparte. El cambio climático resulta, básicamente, de la variación en el balance de radiación terrestre derivado de las emisiones

de gases invernadero, tales como el CO₂ (responsable del 55% del efecto invernadero) y otros gases (metano, óxido nitroso y fluorocarbonos clorados, entre otros), y de la disminución de la capacidad de la biosfera, a través de la deforestación y la destrucción de ecosistemas, para retener CO₂, y otros procesos importantes como cambios en el albedo (i.e. reflexión de la radiación) de la superficie terrestre derivados de la transformación del territorio (Mackenzie, 1998). Estos efectos están sopesados por efectos compensatorios, tales como la captación de CO₂ por el océano y la vegetación terrestre, y el desarrollo de masas forestales en algunas zonas del planeta (e.g. Norteamérica), y algunos procesos aún por identificar. Estos efectos compensatorios consiguen retirar de la atmósfera un 53% de los gases invernadero emitidos. Aún así, la acumulación de gases invernadero en la atmósfera está dando lugar a un calentamiento global ya cuantificable a pesar de la importante variabilidad natural en el clima, que tiende a enmascarar estas tendencias.

Cambio climático en el siglo XX: consecuencias para los ecosistemas costeros

El calentamiento global de la atmósfera durante el siglo XX se ha estimado en 0.6 °C sobre la temperatura media global (Mackenzie, 1998). En la Península Ibérica, la temperatura media anual se ha incrementado en cerca de 1.6°C y la década de los 90 ha sido la más cálida del siglo, lo que también se extiende a las aguas costeras. El calentamiento global tiene consecuencias sobre otros componentes importantes de la regulación del clima y de los procesos globales. Así, este calentamiento está dando lugar a una fusión más rápida de los casquetes polares en la Antártida y el Ártico (IPPC, 1996, Mackenzie, 1998). Se ha postulado, sobre la base de modelos de circulación oceánica y la constatación de cambios bruscos en ésta en tiempos geológicos, que el aumento en la humedad y el flujo de agua dulce a altas latitudes deriva-

do de la fusión de los casquetes polares y glaciares, alterará, a través de su efecto sobre la estabilidad de la columna de agua y la formación de agua profunda (uno de los motores de la circulación oceánica), las corrientes oceánicas y la redistribución de calor asociada a éstas. Así, se ha postulado que este proceso, resultado del calentamiento global, podría dar lugar a una glaciación en latitudes elevadas, a la vez que un aumento de la temperatura en áreas tropicales y subtropicales.

El calentamiento global junto con la fusión del agua retenida en hielo polar y alpino está llevando a un aumento del nivel medio del mar, que se cuantifica entre 12 y 30 cm durante el siglo pasado (<http://www.ipcc.ch>), y que se habría visto incrementada en 7 cm adicionales de no haber mediado la retención de grandes volúmenes de agua en embalses. Además, el aumento de la temperatura del agua de mar durante el siglo XX, conduce también a un aumento del nivel del mar por expansión térmica, aunque este efecto es una fracción pequeña del aumento registrado.

El aumento en el nivel medio del mar conduce a una remodelación o en algunos casos regresión de la línea de costa que es muy variable dependiendo de la morfología del litoral. Sin embargo, esta modificación de la línea de costa, modificación que todos hemos observado en uno u otro lugar, se produce asociada a una modificación menos evidente pero igualmente importante del perfil sumergido de nuestro litoral. En otras palabras, la erosión del litoral tanto en su parte seca como sumergida está dando lugar en muchos casos a situaciones del mismo alejadas del equilibrio natural, situaciones inestables por las que ahora debemos pagar un precio.

La tendencia generalizada a la erosión submarina derivada del aumento del nivel del mar se ve en muchos casos acentuada por los efectos de las construcciones sobre la línea de costa. La erosión submarina se verá acentuada por el aumento del oleaje en la zona costera esperado como consecuencia del aumento del viento y temporales asociados al proceso de cambio climático. Además de la erosión

submarina y la regresión de las playas, el aumento del nivel del mar causa inundaciones, que se ven acrecentadas por el aumento de los fenómenos extremos como tormentas violentas e inundaciones (<http://www.cru.uea.ac.uk>). Los problemas asociados al aumento del nivel del mar son particularmente severos en zonas bajas, como el área de Bangladesh, donde la mortalidad por inundaciones durante los últimos 30 años alcanza casi el millón de personas (Ernst, 2000), y en islas, que pueden perder una fracción importante de su superficie o incluso desaparecer por completo como parece ser el destino de algunos atolones habitados del Pacífico.

El aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera y por tanto en la superficie del océano, con la que está en equilibrio, puede tener efectos positivos para algunas comunidades marinas, tales como las praderas submarinas y los campos de algas, cuya tasa de fotosíntesis se encuentra actualmente limitada por la baja disponibilidad de CO₂ en el agua. Sin embargo el aumento de la temperatura del mar posiblemente compense este aumento de la fotosíntesis, al estimular los procesos respiratorios, que suponen la liberación como CO₂ de carbono orgánico producido fotosintéticamente. El aumento de la concentración de CO₂ en el agua de mar conduce a una disminución del pH, que se estima en unidades de 0.1 unidades de pH a lo largo del siglo XX, y que eventualmente puede impedir la formación de carbonato en el océano y, eventualmente, redissolver el carbonato almacenado en el océano. Una disminución del pH de la superficie marina en 0.5 - 1.0 unidades, lo que podría ocurrir dentro del siglo XXI, pondría en peligro los organismos que producen un esqueleto carbonatado, desde arrecifes de coral a bivalvos, lo que generaría una pérdida de biodiversidad y de hábitat importante. La pérdida de organismos calcificantes junto con la redisolución del carbonato en el océano tendrían un impacto importante sobre el balance de sedimentos biogénicos, que representan el sustrato dominante de las playas en áreas tropicales y en las Islas Baleares.

Cambio climático y cambio global en el área Mediterránea

La zona Mediterránea es una zona de transición climática y se verá, por tanto, particularmente afectada por el cambio climático. De hecho el cambio global es un fenómeno temprano en la región Mediterránea, ya que el ciclo hidrológico y el régimen de lluvias se modificaron notablemente por la deforestación de la región, que comenzó hace varios siglos (Duarte *et al.*, 2000). La construcción de embalses en toda la región Mediterránea ha generado también un cambio en la hidrología de toda la cuenca Mediterránea, con una disminución de más del 30% en la descarga de agua y una disminución del 70% en la descarga de sedimentos al mar, con consecuencias para la circulación del Mar Mediterráneo (Martin y Milliman, 1997). Así, los cambios en nivel del mar, en dinámica sedimentaria, y en flujos biogeoquímicos en el área Mediterránea han sido más notables que los cambios en el resto del océano. El cambio climático en el Mediterráneo ha quedado registrado incluso en cambios en sus aguas profundas, cuya temperatura ha aumentado 0.13 °C y cuya salinidad ha aumentado por 0.04 psu durante los últimos 40 años (Bethoux *et al.*, 1990).

El crecimiento de la población en el área Mediterránea es importante, con una duplicación de la población residente cada 30 años y un aumento espectacular de la población transeúnte - a través del turismo del que comprende una tercera parte (EEA, 1999) - que se duplica cada 15 años (EEA, 1999), y que han generado importantes presiones sobre los ecosistemas costeros dado que una tercera parte de la población residente y casi el 100 % de la población transeúnte se concentra en la zona costera. Este crecimiento de población se concentra en zonas urbanas, dado que la población rural está disminuyendo en toda la cuenca mediterránea. El desarrollo de zonas urbanas y puertos ha representado también una destrucción importante de la zona costera, de forma que, en la costa mediterránea de

los países miembros de la Unión Europea existen ya alrededor de 1500 km de costa artificial (EEA 1999). Estas construcciones generan una alteración de la dinámica sedimentaria costera y generan contaminación a través de su uso y de los accidentes del creciente tráfico marítimo - cuantificadas en 60 accidentes anuales implicando buques de gran tonelaje (EEA, 1999) - soportado por el aumento de instalaciones portuarias. El aumento de la flota del Mediterráneo no se registra solamente en el sector comercial, pues el número de embarcaciones de recreo excede ya el millón de unidades. El incremento del tráfico marino, donde el Mediterráneo acoge el 30% del tráfico marino, y la apertura de nuevas rutas y comunicaciones como el canal de Suez han incrementado además la introducción de especies invasoras en el Mediterráneo, que se calculan ya en un par de centenares de especies (EEA, 1999).

La erosión costera es uno de los problemas más importantes de la región Mediterránea. Entre un 7 y un 25 % de la costa Mediterránea, dependiendo de las zonas, sufren problemas de erosión, que afectan a un 20% de la costa de las Islas Baleares (EEA, 1999). Las causas de esta erosión generalizada son múltiples, e implican el aumento del nivel del mar (aproximadamente 20-30 cm durante el siglo XX), como consecuencia del cambio climático, la reducción de los aportes de sedimentos por la construcción de embalses, el impacto de las construcciones costeras sobre la dinámica sedimentaria en la costa, y la subsidencia del terreno derivada de la explotación excesiva de los acuíferos.

La explotación de los recursos vivos en el Mediterráneo es importante y la explotación de stocks pesqueros, que se encuentran explotados al límite desde hace ya décadas, ha aumentado en torno a un 17% durante los últimos 15 años, mientras que la acuicultura marina se ha triplicado durante el mismo período (EEA, 1999), con un aumento de 400 veces en el cultivo de dorada y lubina en jaulas de engorde. Estas jaulas están causando un deterioro importante de las zonas costeras donde se han establecido, en particular un

deterioro de la calidad de los sedimentos por aporte excesivo de materia orgánica, y la pérdida de ecosistemas sensibles a estos cambios, como praderas submarinas de *Posidonia oceanica* (e.g. Delgado *et al.*, 1997). La acuicultura es ya una fuente importante de nitrógeno y fósforo a la zona costera mediterránea.

El deterioro de la calidad de aguas se ha traducido en un aumento de episodios de eutrofización en el Mediterráneo (EEA, 1999, Vidal *et al.*, 1999), con pérdida de transparencia del agua y proliferaciones de algas tóxicas que llevan a un deterioro de los ecosistemas. La eutrofización se deriva del incremento de aportes de nutrientes y materia orgánica, tanto a través del uso de fertilizantes en agricultura como derivados de aportes urbanos e industriales, de los que aproximadamente un 60% no recibe ningún tipo de tratamiento (EEA 1999). El aumento de la concentración de nutrientes en el Mediterráneo no es solamente un fenómeno costero, sino que se ha registrado incluso en las aguas profundas mediterráneas, cuya concentración de fosfato y nitrato ha aumentado notablemente (Bethoux *et al.*, 1992).

Como consecuencia de estos cambios, los ecosistemas mediterráneos están sufriendo un notable deterioro. En particular, las praderas de *Posidonia oceanica*, que forma los ecosistemas más representativos y productivos del litoral Mediterráneo, se están viendo afectadas por los procesos de cambio global y cambio climático. Las praderas de *Posidonia oceanica* se encuentran en regresión en el Mediterráneo, que alcanza a más de la mitad de las praderas situadas en la costa mediterránea de la Península Ibérica (Marbá *et al.*, 1996). Esta tendencia a la pérdida de praderas que tiene causas múltiples (e.g. daños físicos por dragados, construcciones, artes de pesca y anclas; deterioro de la calidad del agua y los sedimentos submarinos por la eutrofización y la acuicultura; erosión de costas), que incluyen efectos antropogénicos y también efectos climáticos, como la tendencia a la erosión submarina derivada del aumento del nivel del mar (Marbá y Duarte, 1997). Esta pérdida conlleva un deterioro importante de funciones

importantes, como la estabilización de los sedimentos submarinos, aporte de sedimentos biogénicos a las playas, atenuación del oleaje y provisión de alimento y habitat, aportados por estos importantes ecosistemas.

Cambio climático en el siglo XXI y el futuro de los ecosistemas costeros de las Islas Baleares

El aumento de la población constatado durante el siglo XX continuará a lo largo del siglo XXI, alcanzando previsiblemente los 11.000 millones de habitantes hacia el año 2050 (Lutz 1994), de los que un 60 % vivirá en ciudades (Mackenzie, 1998). Sin embargo, este aumento no puede continuar de forma indefinida, y distintas estimas de la capacidad máxima de carga del planeta convergen en torno a los 14.000 millones de habitantes, cifra máxima impuesta por la disponibilidad de agua, y que podríamos alcanzar dentro del siglo XXI. De hecho, una tercera parte de la humanidad no tiene ya garantizado el acceso a agua minimamente segura, y el control del agua se perfila como una fuente de inestabilidad y conflictos armados para el siglo XXI.

El aumento de la población residente en la región mediterránea se estima en 600 millones hacia el 2050, de los que más de 450 millones residirán en ciudades, comparada con una población actual de 450 millones, con 200 millones residentes en ciudades, en la actualidad (EEA, 1999). Durante el mismo intervalo de tiempo el número de turistas en la zona costera se triplicará desde los 135 millones computados en 1990 (EEA, 1999).

El rápido crecimiento de la población, tanto residente como turistas, en las islas Baleares es una de las mayores preocupaciones de las autoridades insulares y autonómicas, que lo están intentando moderar a través de medidas de regulación de la ocupación del territorio. El nivel de población actual de las islas Baleares supera ya los límites impuestos por la disponibilidad del agua, teniendo en cuenta que la demanda de agua ha aumentado

tanto por el aumento de la población como por un aumento continuado del consumo per capita. Además, los modelos de cambio climático prevén una disminución de la lluvia en las Islas Baleares (Mackenzie, 1998), lo que supondría que los recursos de agua dulce podrían disminuir en las Islas Baleares. Sin embargo, el crecimiento se ha mantenido a partir de la desalinización del agua marina, que representa la fuente más importante de suministro de agua para usos domésticos en las islas Baleares. El desarrollo de plantas desaladoras ha eliminado, al menos en teoría, el límite a la población impuesto por la disponibilidad de agua. Sin embargo, el aumento progresivo de la población a través de un aumento de la capacidad de desalinización no es sostenible, dado que este es un proceso energéticamente caro, incompatible con los objetivos de emisiones de CO₂ asumidos en el protocolo de Kyoto, y que genera, además, salmueras que contienen altas concentraciones de nutrientes que pueden agravar los procesos de eutrofización.

El 85% del consumo de agua dulce a nivel global se debe a actividades agrícolas (Postel, 1996), que entran ya en conflicto con las crecientes necesidades de agua de una población urbana. En este contexto, el desarrollo de la acuicultura marina se explica no sólo por su capacidad de producir alimento, sino que lo hace prácticamente sin consumo de agua dulce. Por ello, la acuicultura, como la industria del sector primario que está creciendo más rápidamente, se perfila como una actividad con un peso creciente en la producción de alimento, que generará importantes presiones sobre los ecosistemas costeros. Aunque la acuicultura se encuentra aún pobremente desarrollada en la actualidad en las Islas Baleares, es previsible que el desarrollo de la acuicultura marina en toda la región mediterránea alcanzará las islas, que cuentan además, con una extensa línea de costa, como atestiguan el aumento de las solicitudes de concesiones para el establecimiento de jaulas de engorde en el litoral balear. Este desarrollo sólo será sostenible si las

prácticas actuales se modifican para mejorar el rendimiento en relación a la provisión de alimento, usando, por ejemplo, técnicas de policultivos que combinen cultivos de peces, bivalvos filtradores y algas, además de seleccionar cuidadosamente las áreas adecuadas para soportar estas actividades (con un buen intercambio de agua) para minimizar su impacto.

Además de los aportes de nutrientes y materia orgánica derivados de la acuicultura, los vertidos de aguas residuales al mar continuarán agravando los problemas de eutrofización ya patentes en algunas zonas del litoral Balear, particularmente en bahías con un intercambio limitado de agua con las aguas costeras exteriores. Aunque en las islas se persigue un objetivo de pérdidas 0 de agua, a través del reciclado y bombeo al interior de todas las aguas residuales, lo cierto es que aún existe un número importante de emisarios de aguas residuales, muchos de ellos ilegales, que continuarán contribuyendo al desarrollo de problemas de eutrofización en las islas hasta su total desaparición. Las embarcaciones de recreo representan otra fuente importante de aportes de nutrientes y materia orgánica a las aguas litorales. Las islas Baleares acogen, permanentemente o de forma transitoria, a casi una tercera parte de la flota de embarcaciones deportivas presente en aguas españolas. La inmensa mayoría de estas embarcaciones, que albergan más de una decena de miles de personas durante el verano, no cuenta con tanques de contención de aguas residuales, que se vierten directamente al mar, representando una fuente de nutrientes y aguas fecales importante en puertos deportivos y zonas de fondeo, que contribuyen tanto a la eutrofización de las aguas litorales como a su deterioro desde el punto de vista sanitario.

Se predice que a lo largo del siglo XXI, la temperatura global aumentará en 2°C rango de las predicciones entre 0.9 y 3.5°C, IPPC, 1996, Mackenzie, 1998), lo que supone una tasa de calentamiento más rápida que cualquier evento a lo largo de las últimas decenas de miles de años en la historia del planeta. El

nivel del mar aumentará globalmente en torno a 0.5 m durante el siglo XXI (IPPC, 1996), mientras que se predice que en la región mediterránea aumentará en cerca de 30 cm durante el siglo XXI (EEA, 1999). Las consecuencias de este aumento serán catastróficas, a través de los múltiples mecanismos asociados al aumento en el nivel del mar, y pondrá en peligro las vidas y propiedades del 20% de la población humana, que habitan zonas inundables tras un aumento del nivel del mar de 1 m (Mackenzie, 1998). Las consecuencias de este aumento en el nivel del mar son la regresión de la línea de costa, empeoramiento de los problemas de erosión costera, el aumento del impacto del oleaje, y un aumento de la frecuencia de inundaciones. En las Islas Baleares las áreas más afectadas serán las playas, particularmente aquellas en las que los cordones dunares se han perdido o han sido inmovilizados, que sufrirán una importante regresión, las instalaciones portuarias, y los humedales costeros, incluyendo las albuferas, salinas y lagunas costeras. Estas últimas tienen un importante valor ecológico, como demuestra el hecho de que casi todas estén protegidas en las Islas Baleares, que se verá sin duda afectado por el aumento en el nivel del mar y sus efectos asociados. Además de las consecuencias negativas para las costas y los ecosistemas litorales, el aumento en el nivel del mar aumentará también las intrusiones marinas en los acuíferos costeros, aumentando el déficit de agua dulce de las islas Baleares.

El Mediterráneo alberga una importante diversidad marina, conteniendo aproximadamente el 8 - 9 % de la fauna y un 18 % de la flora de los océanos, que están concentradas en la zona costera (EEA, 1999). Es, por tanto, un ecosistema vulnerable tanto a las perturbaciones de los flujos biogeoquímicos que mantienen los ecosistemas, como los que se derivan de la eutrofización, como a los cambios en biodiversidad generados por las introducciones de especies o la pérdida de especies clave. En particular, las especies invasoras *Caulerpa taxifolia* y *Caulerpa racemosa* se han detectado en las Islas Baleares, la primera en las calas del SE de Mallor-

ca, y la segunda en la Bahía de Palma y en la Bahía de Ibiza, donde están sujetas a medidas de control y erradicación. La pérdida de praderas de *Posidonia oceanica* ofrece oportunidades para el establecimiento de especies oportunistas, incluidas las especies invasoras indicadas, que conduce a una pérdida de funciones del ecosistema, incluido el importante papel de las praderas de *Posidonia oceanica* sobre la retención y la estabilización de los sedimentos costeros, y una reducción de la biodiversidad.

Las praderas de *Posidonia oceanica* conforman los ecosistemas más representativos del litoral Balear, donde ocupan alrededor de 1.000 km² entre la línea de costa y los 45 m de profundidad que alcanza en aguas de Cabrera (Marbá *et al.*, en revisión), el récord de profundidad alcanzado por esta especie en el Mediterráneo. No existe ninguna cartografía fiable de las praderas de *Posidonia oceanica* en Baleares, por lo que su extensión no se conoce con exactitud. Más aún, la información sobre su estado es fragmentaria e insuficiente para formular un diagnóstico. Los datos de que se disponen indican una tasa de mortalidad menor que la que sufren las praderas de la costa peninsular, aunque muchas muestran una tendencia a la regresión, incluso algunas en zonas protegidas (Duarte *et al.*, datos inéditos).

La falta de datos fiables sobre el estado de los ecosistemas costeros impiden contar con una línea de base así como la detección de tendencias necesarias para informar una gestión eficiente de la costa Balear. El desarrollo de estos sistemas, junto con sistemas de control de calidad adecuados, debe ser, por tanto, una de las prioridades en I+D+I en las Islas Baleares, a la que debieran contribuir todos los agentes receptores de esta información, como las distintas administraciones y sectores (turístico, pesquero, navegación) implicados en el uso de la zona costera.

A pesar de la falta de una línea de base y sistemas de monitorización, está claro que existen evidencias de deterioro de los ecosistemas costeros, debido a procesos de desarrollo no sostenible en la costa, así como proble-

mas derivados directamente del cambio climático. Esta percepción no existe solamente dentro de círculos académicos, sino que los síntomas de deterioro se desprenden del importante aumento de informes en la prensa balear sobre problemas ambientales en la zona costera. Así, por ejemplo, el Diario de Mallorca publicó un centenar largo de noticias relacionadas con el deterioro de la zona costera a lo largo de 1999, indicando que este fenómeno no escapa a la opinión pública y genera una preocupación creciente. Esta preocupación se fundamenta por un lado en el elevado grado de inquietud social por la preservación del medio ambiente Balear y, particularmente, por la incidencia que el deterioro de la zona costera tiene sobre el turismo y, por tanto, sobre el conjunto de la economía balear. De hecho, la industria turística está comenzando a realizar estudios de prospectiva encaminados a introducir criterios e indicadores de sostenibilidad, entre los que se encuentra el mantenimiento y mejora de la calidad de aguas y de las playas, en su planificación. La concienciación del sector turístico, seriamente perjudicado por un deterioro de la zona costera a la vez que beneficiario de una mejora de la misma, podría, así, actuar como un incentivo para la mejora del medio ambiente costero balear.

Conclusión y prospectiva

El mensaje principal de la exposición precedente ha de ser que el cambio climático es consecuencia y a la vez parte de un cambio global derivado de la dominación de los recursos y procesos de la biosfera por la humanidad. Este cambio global no es más que la suma de los efectos locales, junto con las interacciones entre ellas. Una vez aceptado este hecho, es evidente que la sociedad balear tiene responsabilidades a todas las escalas implicadas en este proceso, desde locales a globales. Así, las actuaciones para resolver problemas locales - que contribuyen al proceso de cambio global y al deterioro asociado de los ecosistemas costeros - no debieran detraer

de las responsabilidades que afectan a nuestra contribución al cambio climático. Por ello, la reducción de las emisiones de gases invernadero y la reducción del consumo energético asociado debe ser un objetivo primordial de la sociedad balear, que - por su condición insular - sufrirá particularmente las consecuencias del cambio climático (aumento del nivel del mar, aumento de la temperatura, disminución de las lluvias, etc.). Esto supondría revertir la tendencia actual al aumento del consumo energético, mediante el recurso a energías renovables (solar, eólica, etc.), el desarrollo de diseños arquitectónicos que permitan reducir la energía necesaria para climatizar las construcciones, y la extensión de sistemas que permitan el ahorro de agua.

Estos cambios en hábitos de consumo, aunque necesarios, serán insuficientes ya para prevenir el cambio climático y sus consecuencias. La sociedad balear debe pues prepararse para minimizar los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas costeros, particularmente la erosión de playas, efectos de los temporales, y el deterioro de los ecosistemas costeros. Esta preparación se debe basar en predicciones fiables, en sistemas de monitorización rigurosos, e indicadores de calidad que integren los cambios en los ecosistemas con los factores socioeconómicos que intervienen en el uso de la zona costera.

En este sentido, se debe progresar desde una gestión reactiva frente a crisis puntuales a un planteamiento nuevo, más científico, global e interdisciplinario de la gestión de la zona costera que se apoye en sistemas independientes de evaluación de calidad. La integración de estos datos requiere, además, de un planteamiento interdisciplinario de la investigación en medio ambiente. Del éxito en esta modificación de la investigación y la gestión actual de la zona costera, con una importancia estratégica en una comunidad insular, para aumentar la capacidad de atenuar los efectos del cambio climático sobre ésta dependen no sólo la conservación de los ecosistemas costeros, sino el bienestar de la población presente y de las generaciones futuras.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la *Societat d'Història Natural de les Balears* la invitación a contribuir a esta obra.

Referencias

- Aksornkoae, S. 1993. *Ecology and management of mangrove*. IUCN, Bangkok.
- Carter, R.W.G. 1988. *Coastal Environments*. London: Academic Press.
- Cohen, J.E. 1995. *How many people can the Earth support?* W.W. Norton & co., New York.
- Ernst, W.G. 2000. Natural hazards: Prediction and risk. pp. 402-445. In: Ernst, W.G. (ed.), *Earth Systems: processes and issues*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, Reino Unido.
- Schuur, E.A.G., y P.A. Matson. 2000. Land use: global effects of local changes. pp. 446-461. In: Ernst, W.G. (ed.), *Earth Systems: processes and issues*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, Reino Unido.
- Fortes, M.D. 1988. Mangrove and seagrass beds of SE Asia: habitats under stress. *Ambio*, 17: 217-213.
- European Environment Agency. 1999. *State and pressures of the marine and coastal Mediterranean environment*. European environment agency, Bélgica.
- Lutz, W. 1994. *The future population of the world, what can we assume today?*. International Institute for Applied Systems Analysis, Earthscan Publications, London.
- Mackenzie, F.T. 1998. *Our changing planet*. Second Edition. Prentice-Hall, USA.
- Delgado, O., Grau, A., Pou, S., Riera, F., Massutí, C., Zabala, M. y Ballesteros, E. 1997. Seagrass regression caused by fish cultures in Fornells Bay, Menorca, western Mediterranean. *Oceanologica Acta*, 20: 557-63.
- Hemminga, M. y Duarte, C.M. 2000. *Seagrass Ecology*. Cambridge, Cambridge Univ. Press.
- Marbá, N., Duarte, C.M., Cebrián, J., Enriquez, S., Gallegos, M.E., Olesen, B. y Sand-Jensen, K. 1996. Growth and population dynamics of *Posidonia oceanica* on the Spanish Mediterranean coast: elucidating seagrass decline. *Marine Ecology Progress Series*, 137: 203-213.
- Marbá, N. y Duarte, C.M. 1997. Interannual changes in seagrass (*Posidonia oceanica*) growth and environmental change in the Spanish

- Mediterranean littoral. *Limnology and Oceanography*, 42: 800-810.
- Martin, J.-M. y Milliman, J.D. 1997. EROS 2000 (European River Ocean System). The Western Mediterranean an introduction. *Deep-Sea Research II* 44: 3-4.
- Postel, S. 1996. *Dividing the waters: Food security, ecosystem health, and the new politics of scarcity*. Worldwatch Paper 132, Worldwatch Institute, Washington, D.C.
- Vidal, M., Duarte, C.M. y Sánchez, M.C. 1999. Coastal eutrophication research in Europe: Progress and imbalances. *Marine Pollution Bulletin*, 38: 851-854.