

5 Los ecosistemas marinos

AUTOR RESPONSABLE: José Rubén Lara-Lara

COAUTORES: Virgilio Arenas Fuentes • Carmen Bazán Guzmán • Victoria Díaz Castañeda •
Elva Escobar Briones • María de la Cruz García Abad • Gilberto Gaxiola Castro •
Guadalupe Robles Jarero • Ramón Sosa Ávalos • Luis Arturo Soto González •
Margarito Tapia García • J. Eduardo Valdez-Holguín

AUTOR DEL RECUADRO: Juan Bezaury Creel

REVISOR: Roberto Millán Núñez

CONTENIDO

- 5.1 Introducción / 136
- 5.2 Ecosistemas pelágicos / 142
 - 5.2.1 La plataforma continental / 143
 - 5.2.2 El Golfo de California / 145
 - 5.2.3 El Pacífico central mexicano / 148
 - 5.2.4 El Golfo de Tehuantepec / 148
 - 5.2.5 El Golfo de México / 149
- 5.3 Ecosistemas bentónicos / 151
 - 5.3.1 El ecosistema bentónico / 151
 - La plataforma continental / 151
 - El mar profundo / 152
 - 5.3.2 Las ventilas hidrotermales / 153
- 5.4 Prioridades de investigación / 154
- 5.5 Retos para la toma de decisiones / 155
- Referencias / 156

Recuadros

Recuadro 5.1 *Las ecorregiones marinas de México* / 140

Lara-Lara, J.R., et al. 2008. Los ecosistemas marinos, en *Capital natural de México*, vol. I: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México, pp. 135-159.

Resumen

La ubicación geográfica de México, entre las influencias oceánicas del Atlántico centro-occidental y del Pacífico centro-oriental, explica en gran medida su enorme diversidad biológica y ecosistémica. La amplia gama de recursos y ecosistemas marinos con que cuenta significa que, en términos de litorales y superficie marina, México es el décimo segundo país mejor dotado en el ámbito mundial y, al igual que el resto de los países del mundo, enfrenta una serie de oportunidades y amenazas para elaborar estrategias y políticas públicas para el uso sustentable de sus recursos marinos.

Los ecosistemas marinos se clasifican en este capítulo, de acuerdo con las zonas de vida, en pelágicos (asociados a las masas de agua) y bentónicos (asociados a los fondos marinos), relacionándolos con los biotopos (de fondos y litorales arenosos, rocosos, etc.) y con las biocenosis características (ecosistemas de arrecifes de coral, de manglares, etc.). A su vez, cada zona se diferencia en costera (nerítica) y oceánica o marina, según se ubique respecto a la plataforma continental.

La investigación oceanográfica de los ecosistemas marinos de

manera integral es muy reciente; las inversiones para desarrollar la infraestructura física que se requiere (instituciones, equipamiento, barcos de investigación), y la formación de recursos humanos ha progresado lentamente, y por otro lado, en general, ha habido una pobre vinculación entre los sectores (académicos, privados, gubernamentales) para organizar una agenda marina para el desarrollo sustentable de los mares y costas de México.

Se concluye que, a excepción de las especies de fauna y flora de interés económico, en general conocemos muy poco sobre la biodiversidad marina de todos los grupos, tanto pelágicos como bentónicos. Asimismo, es urgente conocer las consecuencias ambientales y socioeconómicas de los cambios en los servicios que nos proporcionan los ecosistemas marinos. Nuestro país requiere un plan de investigación oceánica que maximice las oportunidades para coleccionar, administrar y analizar datos oceánicos, que contemple maneras de compartir recursos y que proporcione la información requerida para que los tomadores de decisiones utilicen bases científicas para el uso y la protección de nuestros mares.

5.1 INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la superficie del planeta Tierra (70.8%: 362 millones de km²) está cubierta por océanos y mares. Los sistemas marinos son altamente dinámicos y están interconectados por una red de corrientes superficiales y profundas. La temperatura y salinidad del agua dan lugar a la formación de capas estratificadas y corrientes; en muchas regiones las surgencias rompen esta estratificación mezclando las capas y crean una heterogeneidad vertical y lateral en el ambiente marino. Los océanos ocupan un enorme espacio favorable para el desarrollo de la vida. A la vez determinan los climas y el tiempo, y son el motor que transporta el calor y el agua dulce de la atmósfera. En suma, contribuyen enormemente a la biodiversidad del planeta.

El mar, en donde se originó la vida, posee una enorme y poco conocida diversidad de regiones, ecosistemas, plantas, animales, microorganismos, genes y moléculas orgánicas. En apariencia homogéneo, es muy heterogéneo. Los grupos taxonómicos (esponjas, celenterados, algas, equinodermos, peces), muchos de ellos solo representados en el mar, contrastan con la diversidad terrestre de fanerógamas e insectos. Sin embargo, hasta ahora la biodiversidad marina ha sido menos estudiada que la terrestre.

Si se excluyen los insectos, 65% de las especies conocidas de la Tierra son marinas (Thorson 1971). Si se considera que la mayoría de los filos y taxa superiores están principalmente representados en el mar, quizá la biodiversidad genética y bioquímica sea aun mayor. En contraste, se estima que el número total de especies es mayor en los ambientes terrestres, ya que 75% de las del planeta son insectos. En el medio marino la facilidad de transporte por las corrientes marinas provoca que los estadios planctónicos de muchas especies se intercambien fácilmente entre hábitats y ecosistemas, lo cual tiende a reducir la diversidad.

El mar, como la tierra, es heterogéneo y presenta varios tipos de ecosistemas. Los marinos se clasifican relacionándolos con las zonas de vida (ej.: pelágicos, asociados a las masas de agua, y bentónicos, asociados a los fondos marinos), con los biotopos (de fondos y litorales arenosos, rocosos, etc.) o con las biocenosis características (ecosistemas de arrecifes de coral, de manglares, etc.) (Fig. 5.1). A su vez, cada zona se diferencia en costera (nerítica) u oceánica o marina, según se ubique respecto a la plataforma continental. En otras ocasiones la clasificación se basa en la disponibilidad de luz para la fotosíntesis y distingue dos zonas: la eufótica y la afótica; en esta última habitan organismos que viven en permanente os-

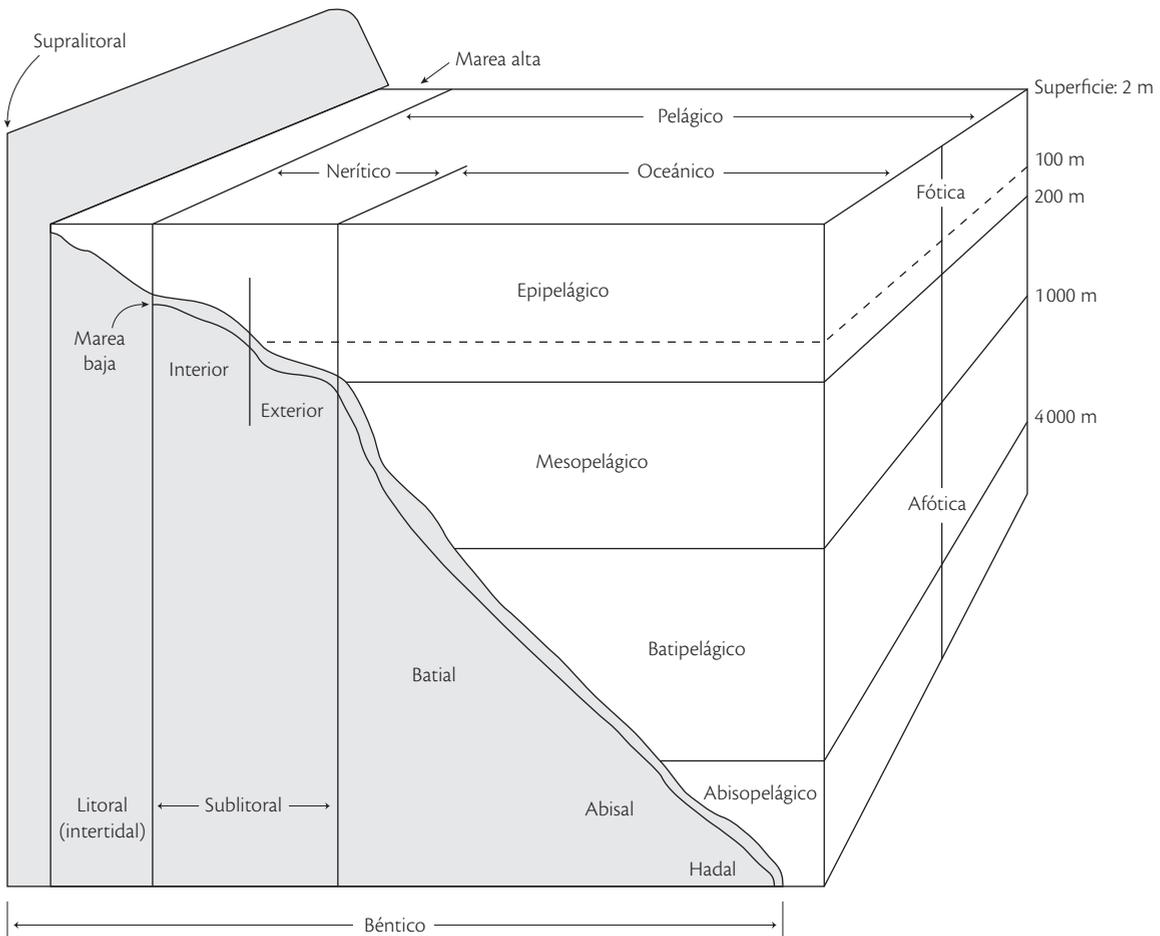


Figura 5.1 Esquema de los ambientes marinos.

curidad y por lo tanto dependen del aporte de energía de otros sistemas; también se pueden clasificar de acuerdo con criterios funcionales según la fuente de energía metabólica que utilizan los organismos que viven en el mar: fitoplancton, macroalgas, ecosistemas quimiosintéticos, etc. (Mann 1989).

En cuanto a la biodiversidad de las biocenosis, el sistema marino, al igual que el terrestre, se enriquece de los polos hacia el ecuador. Asimismo los sistemas bentónicos son más diversos que los pelágicos. En general, las tendencias coinciden con dos generalizaciones propuestas por Margalef (1974): en comunidades transitorias, explotadas o bajo condiciones ambientales muy fluctuantes, la diversidad es baja; por el contrario, los ecosistemas de ambientes estables tienden a aumentar su biodiversidad.

El territorio de México comprende 1 964 375 km² (de los cuales 5 127 km² son de superficie insular); respecto al área oceánica (2 946 000 km²), 3 149 920 km² de la

zona económica exclusiva y 231 813 km² del mar territorial, en tanto que el litoral continental tiene una extensión de 11 122 km (Fig. 5.2). El mar territorial ocupa una franja marina de 22.2 km. Del litoral continental 68% corresponde a las costas e islas del Océano Pacífico y del Golfo de California y 32% a las costas, islas y cayos del Golfo de México y del Mar Caribe. Además, la zona marítima cuenta con 500 000 km² de plataforma continental, con 16 000 km² de superficie estuarina y con más de 12 000 km² de lagunas costeras. Esta zona marina y costera proporciona al país una riqueza extraordinaria (recuadro 5.1). La ubicación geográfica de México, entre las influencias oceánicas del Atlántico centro-occidental y del Pacífico centro-oriental, explica buena parte de su enorme diversidad biológica y ecosistémica. La amplia gama de recursos y ecosistemas marinos con que cuenta significa que, en términos de litorales y superficie marina, México es el décimo segundo país mejor dotado del mundo. Así,

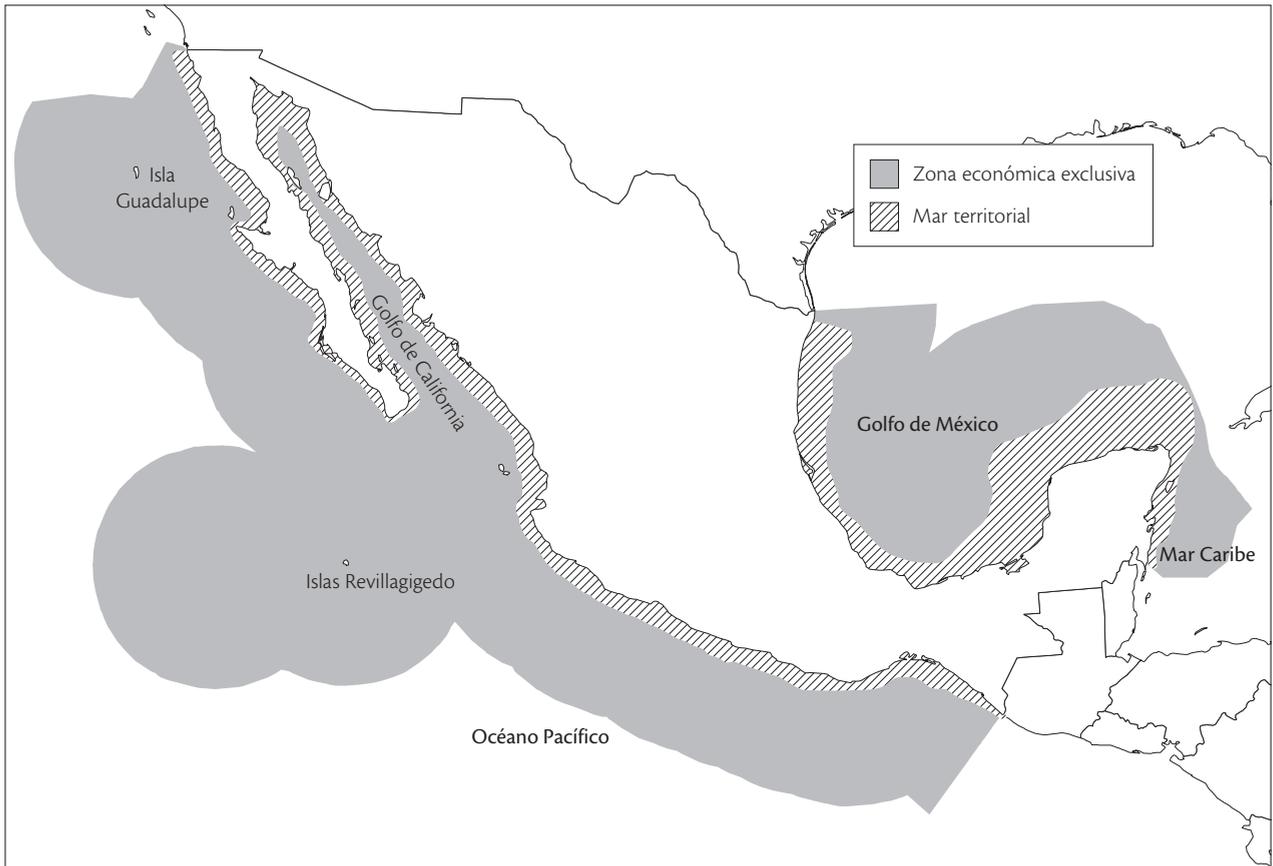


Figura 5.2 Mar territorial y zona económica exclusiva de México.

México tiene una mayor extensión oceánica (~ 65%) que terrestre (35%), curiosamente un tanto similar a la proporción entre agua y tierra del planeta. Está distribuida en la región del Pacífico mexicano, incluyendo los golfos de California y Tehuantepec, y en el Atlántico con el Golfo de México y el Mar Caribe (Figs. 5.3 y 5.4).

Al igual que todos los países con áreas marino-costeras, México posee una enorme riqueza y diversidad de recursos que contribuyen al desarrollo socioeconómico del país. Además de los bienes (servicios de aprovisionamiento) que nos proporcionan los ecosistemas marinos (alimento, combustibles, fibras, materiales para la construcción, fármacos, recursos genéticos y de ornamento, etc.), nos ofrecen una variedad de servicios de soporte (hábitat, productividad primaria, reciclado de nutrientes, secuestro de gases invernadero, etc.), que son esenciales para preservar la vida.

Sin embargo, México se enfrenta a una serie de oportunidades y amenazas para elaborar estrategias y políticas racionales para el uso sustentable de sus recursos. Por

un lado, la investigación oceanográfica de los ecosistemas marinos de manera integral es muy reciente; por otro, las inversiones para desarrollar la infraestructura física que se requiere (instituciones, equipamiento, barcos de investigación) y la formación de recursos humanos han progresado lentamente, y, por último, en general ha habido muy pobre vinculación entre los sectores (académicos, privados, gubernamentales) con el propósito de organizar una agenda marina para el desarrollo sustentable de los mares y costas de México.

Hasta ahora, las diferentes percepciones, valores y prioridades de los diferentes sectores de la sociedad han impedido el desarrollo de una política de manejo de los recursos marinos que a todos satisfaga; el resultado ha sido un gran deterioro ambiental de la mayoría de los ambientes marinos y la rápida sobreexplotación de la mayoría de los recursos, lo cual trae consigo, indudablemente, la degradación social de todos los actores que dependen de la explotación de los recursos naturales, y de la sociedad en general.

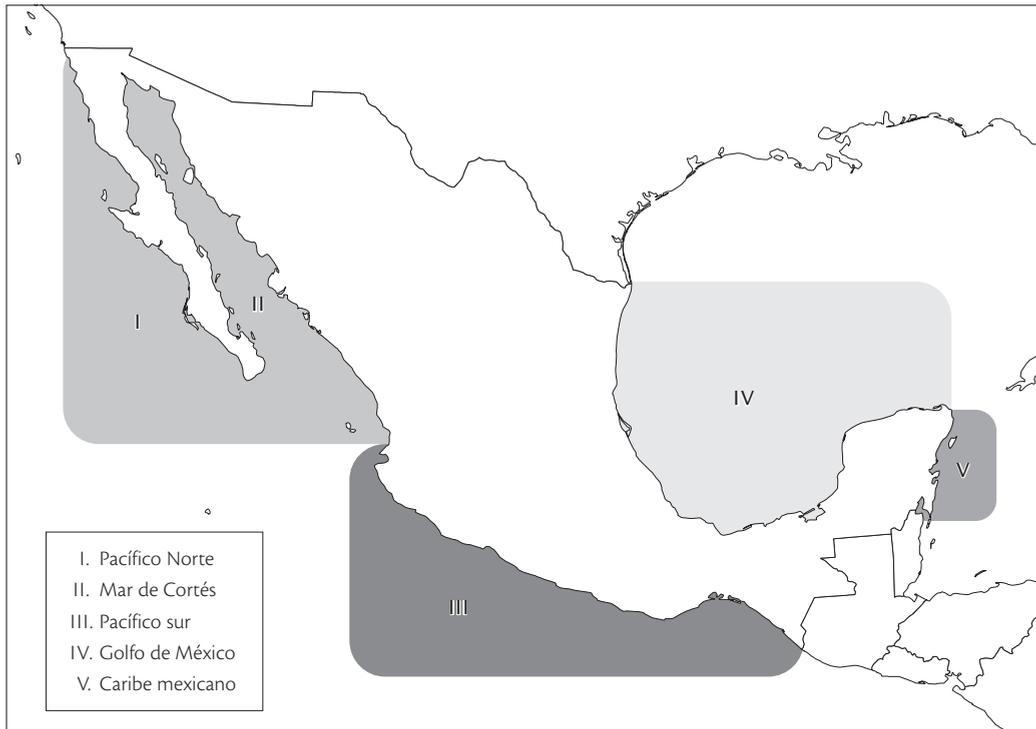


Figura 5.3 Regiones oceánicas de México.

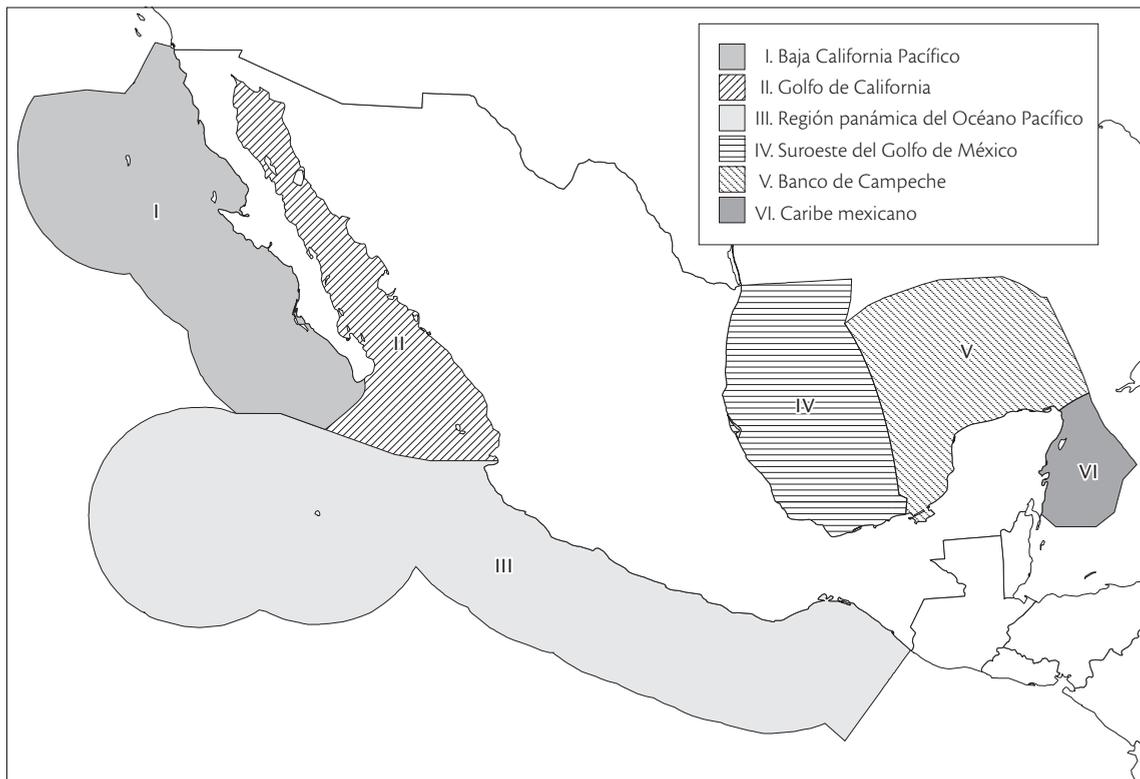


Figura 5.4 Provincias marinas de México.

RECUADRO 5.1 LAS ECORREGIONES MARINAS DE MÉXICO

Juan Bezaury Creel

En el ámbito marino una serie de factores son determinantes de la asombrosa diversidad de organismos presentes en los mares del planeta, entre ellas: la profundidad, la disponibilidad de luz y la distancia a la costa. La profundidad influye sobre las características físicas y químicas de las aguas marinas, las cuales junto con el peso propio de la columna de agua, traducido en presión, son determinantes para la distribución de los organismos. La disponibilidad de luz a diferentes profundidades determina la presencia de procesos fotosintéticos en los organismos que habitan la zona más somera de los océanos o zona fótica y aquellos que se desarrollan sin su influencia directa, en la zona afótica. La distancia desde la costa hacia una estrecha franja tierra adentro determina la influencia de agua marina sobre los organismos predominantemente terrestres de la zona supralitoral y hacia el mar, resulta en una mayor o menor interacción entre los organismos pelágicos que habitan la columna de agua y aquellos que se desarrollan sobre los fondos marinos u organismos bentónicos.

Un problema recurrente en la biogeografía que se agrava en el ámbito marino es el de plasmar en un mapa estático líneas divisorias de los elementos que se encuentran en un flujo

constante, como lo son las aguas del mar, podría parecer un ejercicio arbitrario. Sin embargo, varios autores han logrado acercamientos exitosos en el mapeo de las tendencias generales de distribución de las masas de agua oceánicas y por ende de la biota que en ellas se desarrolla, entre ellos Ray *et al.* (1982); Hayden *et al.* (1984); Sherman y Alexander (1986), Santamaría del Ángel *et al.* (1994), Bayley (1995), Longhurst (1998) y Sullivan y Bustamante (1999).

Como resultado de una iniciativa de la Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte, se realizó un esfuerzo para definir regiones ecológicas marinas en las aguas aledañas al subcontinente norteamericano (Wilkinson *et al.*, en prensa). Este mapa de ecorregiones es el resultado de procesos de consulta con expertos y tiene tres niveles anidados, los cuales reflejan condiciones particulares de los ecosistemas marinos tanto en el ámbito global, como regional o local en las tres dimensiones de los ambientes marinos. El nivel I incluye diferencias entre los ecosistemas marinos que ocurren a escala de las cuencas oceánicas, entre las que destacan la temperatura y la circulación de las grandes corrientes y masas de agua marina (Fig. 1). Ocho de las 21 regiones del nivel I definidas para Norteamérica quedan comprendidas total o

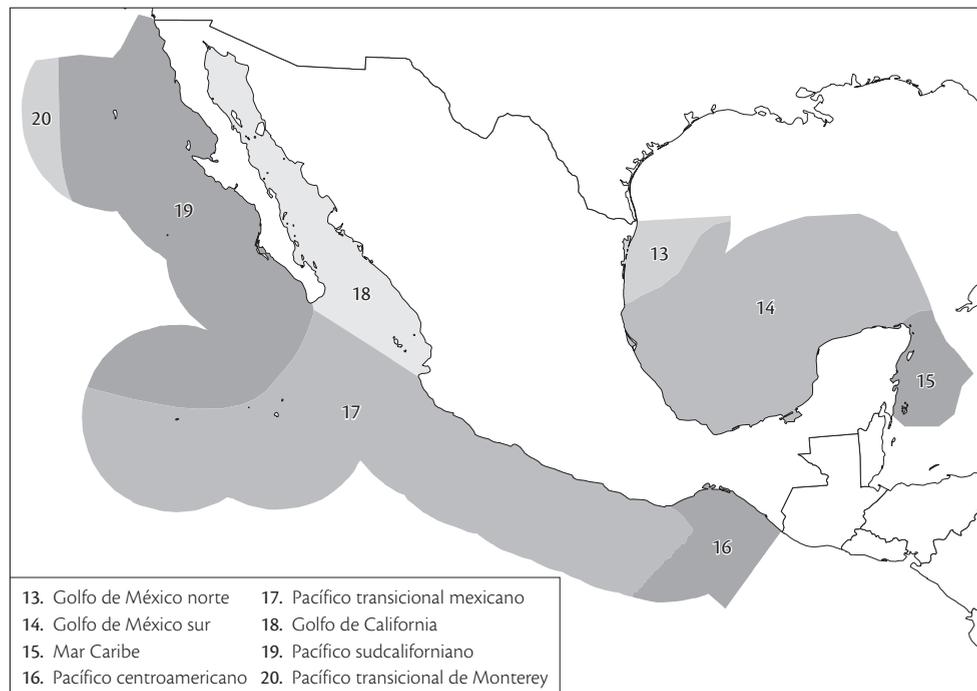


Figura 1 Ecorregiones marinas de México, nivel I.

parcialmente en la zona económica exclusiva (ZEE) de México. Todas las regiones fueron cartografiadas hasta los límites de la ZEE, aunque obviamente dichas regiones continúan más allá de las fronteras políticas. El nivel II refleja la distribución de los ambientes bentónicos e incluye las diferencias entre los ambientes bentónico-nerítico (sobre la plataforma continental hasta una profundidad aproximada de 200 m) y los pelágicos-oceánicos (zonas epipelágica, mesopelágica, batipelágica y abisopelágica), y en él las morfoestructuras a gran escala, tales como taludes continentales, planicies abisales, islas oceánicas, fosas y cadenas montañosas submarinas son utilizadas para caracterizar el fondo marino en cuanto a su profundidad y topografía, como un determinante de las comunidades de la

biota béntica, que suple el desconocimiento prevaleciente sobre la vida y los procesos ecológicos que se desarrollan a gran profundidad. En este nivel los fondos de los mares mexicanos quedan comprendidos en 28 regiones (Fig. 2). Finalmente en el nivel III se logra un acercamiento más fino al interior del ambiente nerítico, capturando variaciones localmente significativas para cada una de las 24 regiones en que fue subdividida la plataforma continental mexicana y los ambientes estuarinos adyacentes. Estas regiones ecológicas concentran la mayor parte de las pesquerías y por ende la mayor parte del conocimiento científico marino se refiere a ellas (Fig. 3).

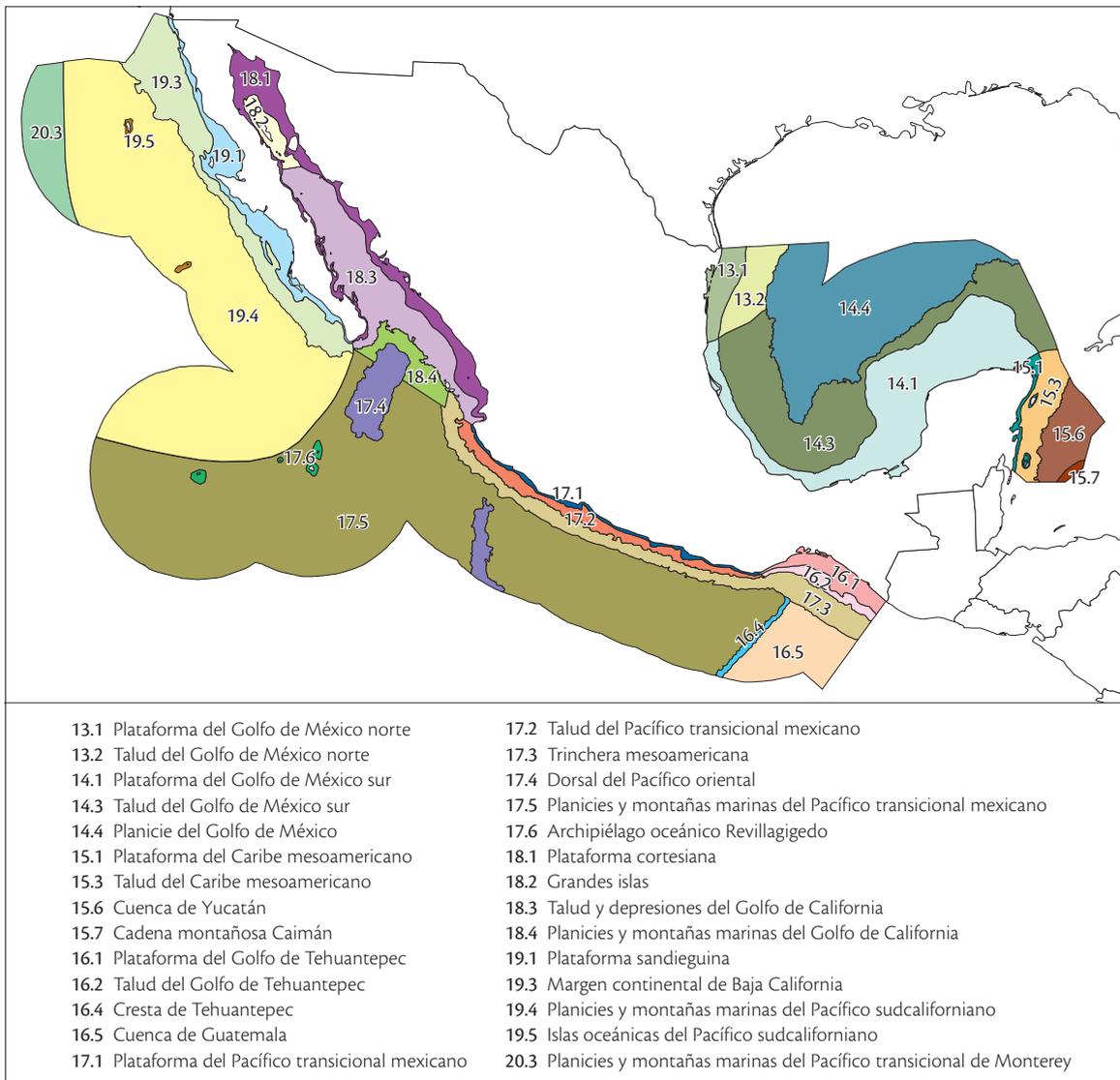


Figura 2 Ecorregiones marinas de México, nivel II.

RECUADRO 5.1 [concluye]

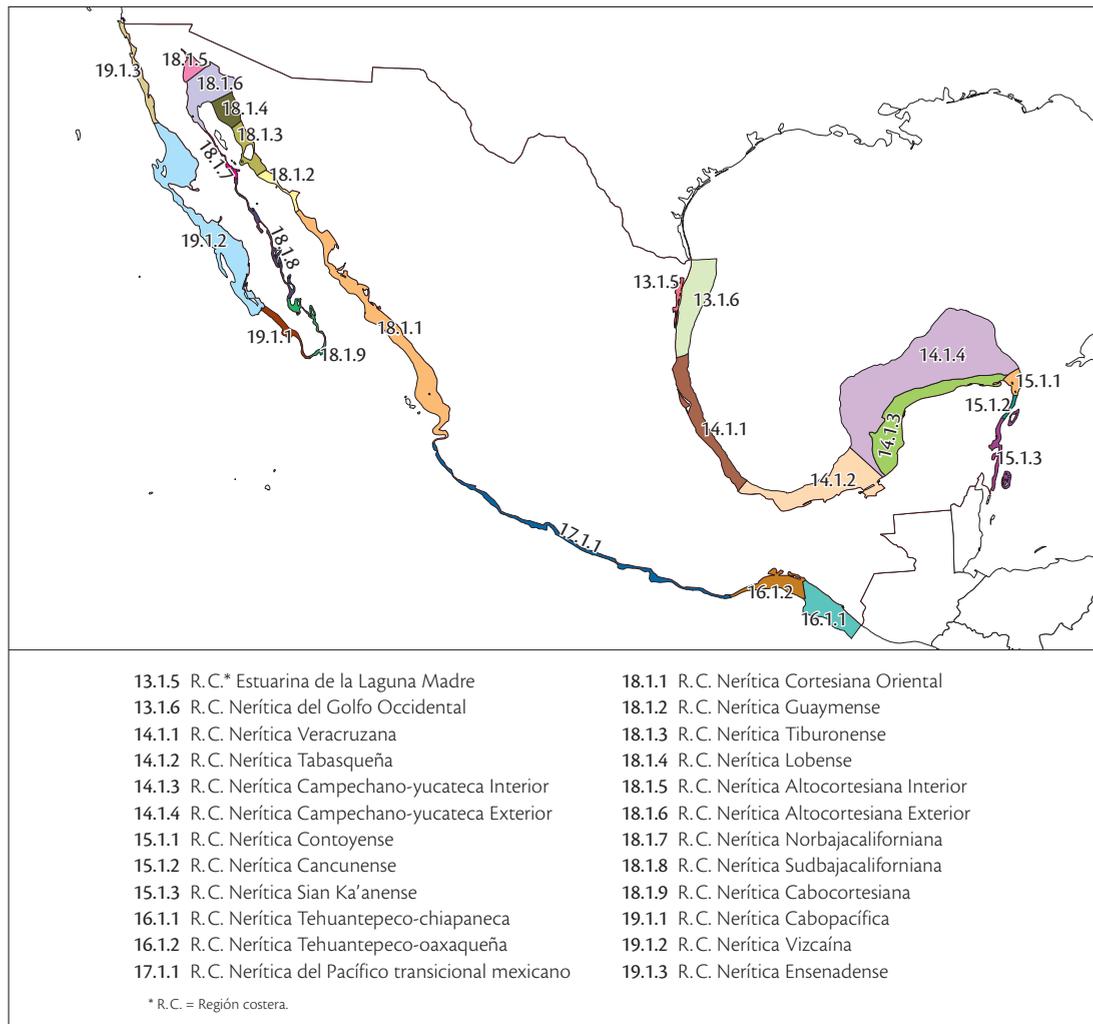


Figura 3 Ecorregiones marinas de México, nivel III.

5.2 ECOSISTEMAS PELÁGICOS

Los ecosistemas pelágicos se basan en la producción del fitoplancton y son responsables de 90% de la producción de carbono orgánico a escala mundial, no tanto por ser muy productivos sino por ocupar la enorme superficie del mar. La productividad del fitoplancton depende de la luz y de la concentración de nutrientes en el agua, que pueden ser en ocasiones más baja que la de los áridos desiertos terrestres. En aguas ricas fertilizadas por los procesos de surgencias o ríos, la productividad primaria puede ser

superior a un campo agrícola de cultivo. Los ecosistemas pelágicos se diferencian, dependiendo del grado de fertilización, en: *a*] ecosistemas estables de baja producción, y *b*] ecosistemas de pulsos de alta producción. En general, los ecosistemas de alta producción son característicos de las zonas templadas o de influencia de ríos, por ejemplo el ecosistema de surgencias del sur de la Corriente de California (costa de la Península de Baja California), y los de baja producción los encontramos en las regiones tropicales y subtropicales. La mayor parte del Caribe mexicano no es fertilizada ni por surgencias ni por ríos; las aguas

cálidas superficiales no se mezclan con las profundas más frías y ricas en nutrientes; los nutrientes se sedimentan y el mar se transforma en un desierto donde se organiza un ecosistema poco productivo pero de admirable complejidad. El fitoplancton en estos ecosistemas es muy variado, en general dominado por las cianofíceas, a las que acompañan los dinoflagelados, algunas grandes diatomeas y coccolitofóridos. Existe otro productor importante, la macroalga flotante *Sargassum*, que da su nombre al Mar de los Sargazos, el cual es un excelente sustrato para otras plantas y animales.

Los ecosistemas de alta productividad pueden ser fertilizados por surgencias y por ríos. Estos ecosistemas se caracterizan por las altas poblaciones de cardúmenes de pelágicos menores (anchovetas y sardinas), que son depredadas por pelágicos migratorios, como los jureles, atunes y sierras. La actividad pesquera comercial desarrolla sus principales actividades en estos ecosistemas. Parte de la alta producción de estos sistemas se transfiere por sedimentación a los ecosistemas bentónicos.

Los ecosistemas pelágicos de la plataforma continental en México son importantes para la economía del país ya que proveen alimentos y recursos no renovables e intervienen en la regulación del clima. Las plataformas continentales como ecosistema sostienen la producción pesquera nacional y ejercen un control notable sobre la productividad primaria regional, pues contienen una gran variedad de comunidades marinas. Los cambios en el estado de estos ecosistemas por medio de controles ambientales naturales o inducidos por el hombre pueden llegar a tener consecuencias económicas y sociales relevantes. El clima, la hidrología, la descarga fluvial, las prácticas de uso del suelo o de desecho de la basura, la pesca, la acuicultura y la extracción de recursos no renovables son agentes que pueden inducir el cambio. Las tendencias en todos estos agentes, particularmente aquellos generados por el hombre, sugieren que estos ecosistemas estarán bajo gran presión en el futuro inmediato.

5.2.1 La plataforma continental

La plataforma continental se ha definido como el área que se extiende de la línea baja de la marea en el reborde o margen continental al inicio del talud que cae rápidamente a casi 200 m de profundidad. La amplitud de la plataforma en México es muy variable, siendo la más extensa la del Banco de Campeche en el Golfo de México.

En general, la producción pesquera y la biomasa en la plataforma son el reflejo del aporte local de nutrientes y

materia orgánica excepto en la costa del Pacífico oriental tropical, donde se presenta la zona de oxígeno mínimo cerca de la superficie (Fiedler y Talley 2006).

En particular, entre los ecosistemas de la plataforma continental, los sistemas de surgencias costeras son totalmente diferenciables de otros tipos de ecosistemas marinos, ya que constituyen una unidad funcional de organización física y biológica con características de estructuras tróficas y ciclos de materiales muy diferentes del resto de los ecosistemas. Aunque en el mundo estos sistemas representan solamente 0.1% del área oceánica, contribuyen con cerca de 50% del volumen de peces capturados (Ryther 1969).

Los ecosistemas de surgencias costeras están generalmente asociados con los bordes de frontera este de las principales corrientes oceánicas, donde predominan los vientos hacia el ecuador como parte de los sistemas de alta presión atmosférica cuasi-estacionarios. Cuando el viento paralelo a la costa permanece por un tiempo suficientemente largo favorece la formación de surgencias sobre una gran parte de la zona costera. En el Océano Pacífico las zonas más importantes de surgencias costeras se encuentran en Oregon y California (EUA), en Baja California y en las costas de Perú y Chile. Estas zonas de surgencias están asociadas con dos grandes centros de alta presión atmosférica: uno en el hemisferio norte frente a California y Baja California y el otro en el hemisferio sur frente a Chile y Perú.

En México, además de las surgencias de la costa de Baja California, encontramos eventos de surgencias en el Golfo de California, el Cabo Corrientes, el Golfo de Tehuantepec y en algunas regiones del Mar Caribe (Fig. 5.5).

La surgencia costera es un proceso en el que el agua subsuperficial es llevada hacia la superficie debido al forzamiento del viento, para posteriormente ser movida por el flujo superficial horizontal lejos del área de transporte vertical. La capa superficial del mar afectada directamente por el viento es del orden de decenas de metros y se le conoce como la capa de Ekman. Debido a la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis), la dirección del transporte neto (transporte de Ekman) es de 90° a la derecha del viento en el hemisferio norte. En este proceso hay un importante suministro de nutrientes inorgánicos hacia la zona eufótica, que junto con la luz suficiente para el crecimiento del fitoplancton generan una alta producción biológica. Las condiciones óptimas de nutrientes y luz se mantienen por largos periodos (de tres a cuatro meses del año), por lo que la cantidad anual y el patrón de productividad biológica es muy diferente al que ocurre



Figura 5.5 Áreas de surgencias en México.

en otras regiones del océano. Aunque el tamaño y la localización geográfica de las regiones de surgencias costeras son muy limitadas (Fig. 5.5), el flujo anual de nuevo material orgánico hacia los ecosistemas marinos es muy grande. Una parte de este material se incorpora en la red trófica del sistema pelágico, pero otra parte muy importante se exporta hacia el fondo de la plataforma continental generando ambientes bentónicos con bajas concentraciones de oxígeno, alto contenido orgánico en los sedimentos y en algunos casos extremos denitrificación y producción de ácido sulfhídrico (Seiter *et al.* 2004).

Los sistemas de surgencias costeras tal como se definieron más atrás ocurren sobre la costa occidental de la Península de Baja California durante los meses de primavera y verano, cuando el centro de alta presión atmosférica se localiza frente a esta región. Sin embargo, existen otras zonas del país donde se producen surgencias o mezcla vertical que transportan nutrientes hacia la zona eufótica y generan ecosistemas muy particulares. Ejem-

plos de esto son las surgencias ocasionales que se presentan en las costas de Sonora y Sinaloa durante invierno y primavera, los fuertes procesos de mezcla vertical generados por las mareas vivas en la región de las grandes islas del Golfo de California, las surgencias ocasionales que se desarrollan frente a Cabo Corrientes, la mezcla vertical producida por los vientos tehuanos en la región del Golfo de Tehuantepec que se presentan en ambas zonas en invierno y primavera y la mezcla vertical asociada al margen continental frente a la Península de Yucatán.

En las regiones donde se presentan estos procesos de surgencias o mezcla vertical por diferentes procesos físicos se encuentra una alta producción biológica asociada a pesquerías importantes, lo que las hace diferentes de las de otras regiones del país. Esto las convierte en lugares de gran interés desde el punto de vista ecológico y económico, y de ahí la necesidad de estudiarlos mejor. Actualmente se conoce muy poco de las escalas en las que varían los principales procesos que controlan el flujo de

material orgánico en la zona pelágica y bentónica de estos ecosistemas. Existen estudios aislados realizados sobre todo en la región del Océano Pacífico y recientemente se han empezado a estudiar las zonas adenañas a la Península de Yucatán.

La zona de surgencias frente a las costas de Baja California es la región del Pacífico mexicano donde se ha realizado la mayoría de los experimentos (> 60%) para estimar la productividad del fitoplancton (Lara-Lara *et al.* 2003).

Desde septiembre de 1997 se estableció el programa de monitoreo Imecocal <*imecocal.cicese.mx*> para estudiar la respuesta de este ecosistema a la variabilidad y el cambio climático; a la fecha se han realizado 40 campañas oceanográficas. Hasta ahora es el único programa oceanográfico en México de monitoreo continuo de procesos relacionados con la fertilidad del océano. En el cuadro 5.1 se resumen las tasas de productividad primaria obtenidas para esta región. En 2006 se inició el programa Flucar (fuentes y sumideros de carbono en los márgenes continentales del Pacífico mexicano). En julio de ese año se estableció el primer observatorio de monitoreo costero al sur de la Bahía de Ensenada, en B.C., para generar series de tiempo de variables relacionadas con el ciclo del carbono y la bomba biológica, y empezar a entender el papel de la zona costera en el secuestro de los gases invernadero, en particular el bióxido de carbono y el metano, los cuales son, hasta ahora, los principales causantes del cambio climático (Bigg 1996).

Hasta ahora la biodiversidad del fitoplancton ha sido pobremente estudiada en esta región. El mayor énfasis ha sido en las poblaciones zooplanctónicas. Entre los invertebrados y el macrozooplancton, los copépodos calanoides son el grupo de mayor diversidad y abundancia (Lavaniegos y Jiménez Pérez 2006). Además de la variabilidad estacional, los fenómenos El Niño y La Niña son las señales de variabilidad interanual más intensa en estos ecosistemas.

5.2.2 El Golfo de California

El Golfo de California es una cuenca de evaporación (Roden 1964) de aproximadamente 1 000 km de longitud y 150 km de anchura promedio; presenta un gradiente latitudinal natural que va desde condiciones tropicales y lluviosas (al sur) hasta templadas y áridas (en el norte). En general se puede dividir en dos grandes regiones: región norte, al norte de las islas Ángel de la Guarda y Tiburón; región sur, desde la boca hasta estas islas (Álvarez-Borrego 1983). La parte norte es somera, con amplitudes de

mareas de hasta 10 m, mientras que la región sur es profunda, tiene comunicación con el Océano Pacífico y está influenciada por sus condiciones oceanográficas. Durante el invierno y la primavera los vientos dominantes son del noroeste; en verano y otoño del sureste y más débiles (Roden 1964); este periodo es de actividad de tormentas tropicales, ciclones y huracanes en el Pacífico tropical oriental y algunos de ellos impactan el Golfo de California (Álvarez-Borrego 1983). Este patrón de vientos provoca surgencias de aguas ricas en nutrientes en ambas costas, siendo más intensos en la parte continental durante invierno-primavera. Las temperaturas superficiales en la región norte varía de 10 °C en invierno hasta 32 °C en verano; en la región sur las temperaturas promedio en verano son mayores de 25 °C y en invierno promedian 20 °C (Valdez-Holguín *et al.* 1999); la región de las islas Ángel de la Guarda y Tiburón presentan temperaturas menores que el resto del Golfo debido a fuertes procesos de mezcla por marea y viento (Robinson 1973). De acuerdo con este patrón de temperatura, los nutrientes presentan altas concentraciones en la región de las islas y decrecen hacia el sur y hacia el norte (Álvarez-Borrego *et al.* 1978).

La alta productividad primaria del Golfo ha sido comparada con regiones tan productivas como la Corriente de Benguela, zonas de surgencia de Perú y de California (Zeitzchel 1969). En revisiones de Álvarez-Borrego (1983), Álvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) y Lara-Lara *et al.* (2003) se ha observado que la productividad se incrementa de la boca a la región central, decrece en las islas y tiene un ligero incremento en la región norte; asimismo, se observa una variabilidad estacional con mayores valores durante invierno-primavera. Sin embargo, la mayoría de las observaciones han sido realizadas en cruceros con una cobertura espacial y temporal limitada. También es notorio que casi en su totalidad las estimaciones han sido para describir su variación y solo unas pocas para determinar aspectos fisiológicos de la productividad del fitoplancton. Solo se han llevado a cabo dos estudios acerca del flujo de carbono entre el fitoplancton y zooplancton (García-Pámanes y Lara-Lara 2001; García-Pámanes *et al.* 2007), y sobre el flujo de carbono del sistema pelágico al bentónico (Lara-Lara *et al.* 2007).

La región del Golfo de California es la segunda zona (>30%) en el Pacífico mexicano, en donde se han desarrollado más experimentos para estimar la productividad del fitoplancton (Lara-Lara *et al.* 2003) (cuadro 5.1).

El Golfo de California es de gran importancia para México debido a que su alta productividad y condiciones oceanográficas sustentan una gran biodiversidad de flora

Cuadro 5.1 Tasas de productividad primaria de los ecosistemas marinos de México

Localidad	Número de publicaciones revisadas	Fecha de muestreo	Número de mediciones	Productividad $\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$			Razón de asimilación $\text{mg C mg Cl a h}^{-1}$		
				mín	máx	\bar{x}	mín	máx	\bar{x}
ZONA I									
Corriente de California	2	1955	1		0.48 ^a				
		1964	9	4.0	227.3 ^a				
Parte Norte	5	1981	18	0.01	3.98				
				0.01	0.11 ^b				
		1984	42	0.01	14.2				
				0.01	0.13 ^b				
		1985	10	0.08	2.01				
				0.01	0.04 ^b				
		1988	7	0.32	1.12				
				0.02	0.03 ^b				
1990	3	0.7	13.5						
Parte Centro	2	1981	6	0.1	5.0				
		1990	3	1.76	9.9				
Parte Sur	5	1964	22	0.2	594.2 ^a				
				0.16	3.7 ^c				
		1981	2	0.4	1.4				
		1990	3	1.1	16.7				
		1993	2	0.87	50.7	14.2			
				0.089	0.22	0.15 ^c			
1998	11		0.505 ^b						
Costa de Baja California	2	1992-1994	7	0.10	21.7	4.82			
		1999	6	0.09	2.78	0.98			
ZONA II									
Golfo de California	7	1992	17	0.35	4.92	1.64 ^c			
		1993	7	0.06	32.6	5.60			
		1992-1993	7	0.17	10.8	3.46			
		1985	10				0.20	3.17	0.72
		1995	23			1.356 ^c			
		1993	8	0.18	48.30	5.52			
		1999	10	0.20	5.08	2.99			
Parte Sur	7	1960	5	0.02	5.8 ^a				
				0.002	0.08 ^c				
		1967	6			15.7 ^a			
		1968	14	9.2	47.5 ^a				
		1981	1	0.4	0.9				
						0.19 ^c			
		1983	7	25.0		6.1	15.0	10.1	
				1.4	3.1	2.13 ^c			
1984	3	0.3	1.8	1.21 ^c	7.8	12.0	9.5		
1990	13	2.12	21.0						



Cuadro 5.1 [concluye]

Localidad	Número de publicaciones revisadas	Fecha de muestreo	Número de mediciones	Productividad $\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$			Razón de asimilación $\text{mg C mg Cl a h}^{-1}$			
				mín	máx	\bar{x}	mín	máx	\bar{x}	
Parte Central	8	1968	5	18.8	67.0 ^a					
				0.4	0.9 ^c					
		1981-1982	10	2.1	36.5					
				1.35	4.37 ^c					
		1983	7		35.1		4.5	11.4	8.75	
				1.4	4.8	3.1 ^c				
		1984	12	0.15	4.3	1.54 ^c				
		1985	5	0.087	0.83	0.49 ^c				
1986	4	0.49	0.6 ^c							
1987	6	6.1	35.7				11.4			
		0.05	0.275 ^b							
Parte Norte	4	1968	10		50.4 ^a					
					0.7 ^c					
		1990	24	0.6	21.5					
					36.5					
		1981-1982	10	0.75	4.37 ^c					
1986		0.33	0.8 ^c							
1990	7	1.2	32.1							
ZONA III										
Zona Oceánica	Norte	4	1981	2				3.6	10.4	
	Sur		1981	3				2.1	10.1	
	Norte		1981	2	1.3	5.0				
					0.41	1.4 ^c				
	Central		1981	3	1.1	1.7				
					0.30	0.54 ^c				
	Sur		1967-1968	12			377.4 ^a			
	Norte y Sur		1989	7		14.12	3.06			
					0.16	1.15	0.53 ^c			
	Golfo de Tehuantepec		3	1958-1959	19	0.3	94.4 ^a			
1989		12		0.20	40.4	5.30				
				0.069	1.43	0.69 ^c				
1996		9		8.60	60.5					
1	1999	2	0.14	0.31	0.21					

^a $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$.^b $\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$.^c $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$.Fuente: Lara-Lara *et al.* 2003.

y fauna, que son la base de un sector pesquero importante y del sector turístico por sus bellezas naturales. Sin embargo, la creciente población, con una mayor demanda de recursos alimenticios, ha llevado algunas pesquerías a niveles de sobreexplotación, y ha conducido a un rápido desarrollo de actividades productivas (agricultura, acuicultura e industria) que en buena parte descargan sus desechos en las costas.

Desde la perspectiva académica ha sido considerado un laboratorio natural. En él se presentan una vasta biodiversidad de organismos, con muchas especies endémicas, comerciales y de importancia ecológica. Sin embargo, no ha habido la voluntad de la sociedad para llevar a cabo planes de manejo de sus recursos que sean compatibles con otras actividades productivas y de recreación.

5.2.3 El Pacífico central mexicano

La región del Océano Pacífico tropical oriental, entre Cabo Corrientes (20° N y 105° 41' W) y Costa Rica (10° N y 84° 15' W) ha sido caracterizada durante mucho tiempo por la convergencia de dos sistemas de corrientes en los mares mexicanos (Badan-Dangon 1998): la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR) y la Corriente de California (CC), que al unirse forman parte de la Corriente No-recuatorial (CNE) (Badan 1997).

Recientemente, Kessler (2006), basándose en datos de velocidad geostrofica y de deriva, señala que la CCCR llega solo hasta el Golfo de Tehuantepec, donde su parte superficial retorna hacia el sur debido a un flujo anticiclónico que obliga a la CCCR a salir de la costa y alimentar a la CNE. Kessler (2006) propone el nombre de Corriente del Oeste de México (WMC, por sus siglas en inglés), para un flujo adyacente a la costa del Pacífico mexicano con dirección al polo que se encuentra por debajo de la termoclina a partir del Golfo de Tehuantepec.

Existen pocos datos sobre la hidrografía de la región de Cabo Corrientes. Entre ellos se encuentra lo descrito por Roden (1972) en diciembre de 1969, quien menciona la presencia de una corriente inmediata a la costa de Cabo Corrientes que se intensifica en superficie, con una velocidad de hasta 46 cm s^{-1} , alcanzando $\sim 700 \text{ m}$ de profundidad. Más recientemente confirma este flujo costero entre Cabo Corrientes y el Golfo de Tehuantepec, donde se menciona que este flujo con dirección hacia el polo tiene un ancho de entre 90 y 180 km; se encuentra a una profundidad de entre 250 y 400 m, presenta una velocidad de entre 0.15 y 0.3 ms^{-1} , y un transporte de entre ~ 2.5 y 4 Sv .

Hasta ahora la región menos estudiada, 4% de los mares mexicanos en cuanto a la productividad primaria, ha sido el Pacífico central mexicano.

Desde el año 2002 se está desarrollando un estudio de monitoreo interdisciplinario, observacional y numérico de la oceanografía de la zona del Pacífico tropical frente a las costas de México (Programa Procomex). En particular, se estudia la variabilidad espacio-temporal de las características físicas, los mecanismos de generación y la productividad primaria de la corriente costera que recorre las costas mexicanas desde el Golfo de Tehuantepec hasta la entrada al Golfo de California (Lavín *et al.* 2006; Zamudio *et al.* 2007; López Sandoval *et al.* sometido).

5.2.4 El Golfo de Tehuantepec

El Golfo de Tehuantepec se ubica en la parte sur del Pacífico mexicano correspondiente a los estados de Oaxaca y Chiapas, y tiene un área aproximada de $125\,000 \text{ km}^2$ (Fig. 5.6). Está delimitado hacia su parte oeste por Puerto Ángel, Oaxaca, y al este por el Río Suchiate en Chiapas, entre las coordenadas $96^\circ 7'$ y $92^\circ 14' \text{ W}$, $14^\circ 30'$ y $16^\circ 13' \text{ N}$. La costa se divide en dos regiones: una que comprende la mayor parte del Golfo de Tehuantepec (desde Salinas del Marqués, Oaxaca, al Río Suchiate, Chiapas), que se caracteriza por una plataforma continental amplia de fondos blandos, y otra de escasa plataforma continental principalmente de litoral rocoso correspondiente a la parte oeste de la costa de Oaxaca, a partir de Salinas del Marqués hasta Puerto Ángel. Los procesos meteorológicos más importantes en este golfo son los vientos "tehuantepecanos" que se presentan en la época de sequía (de mayo a octubre), derivados de los vientos "nortes" en el Golfo de México. Estos vientos de descenso que atraviesan el istmo hacia el Golfo de Tehuantepec, pueden exceder los 20 ms^{-1} , y producen un arrastre del agua hacia el sur que determina importantes surgencias y una mezcla considerable a lo largo del eje del viento. Esto ocasiona un descenso de la temperatura superficial, el aumento de la salinidad y cambios en la circulación. Cuando los vientos tehuantepecanos pierden fuerza se reinicia el calentamiento progresivo del agua superficial, desaparece la surgencia eólica y se restablece la circulación superficial del Golfo de Tehuantepec y de las aguas adyacentes. Las surgencias representan una bomba de nutrientes y carbono fitoplanctónico que enriquecen las aguas adyacentes en el Pacífico oriental tropical y determinan una productividad alta (Robles Jarero y Lara-Lara 1993). Durante la época de lluvias, el Golfo se comporta como un ecosis-

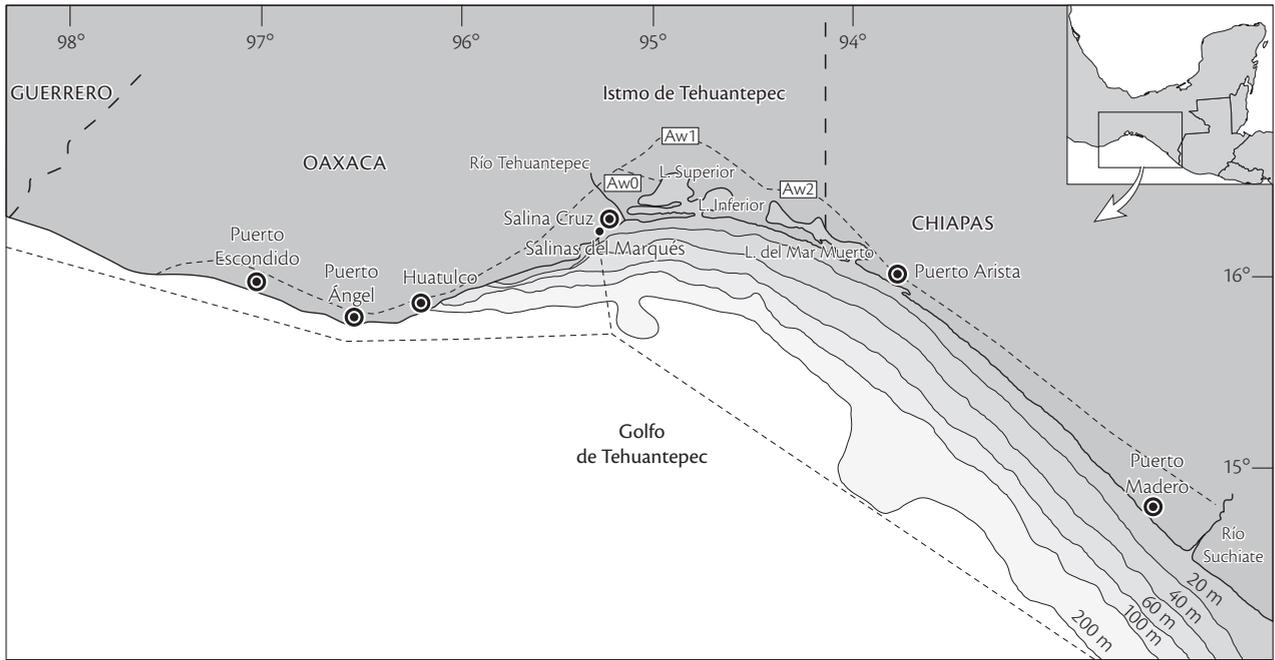


Figura 5.6 El Golfo de Tehuantepec.

tema tropical con valores bajos de biomasa y productividad del fitoplancton. Como evidencia de la alta producción derivada de las surgencias se reportan dos áreas del fondo marino con altas concentraciones de fosforita.

Hasta ahora los valores de productividad primaria reportados para la región del Golfo de Tehuantepec son muy escasos (cuadro 5.1). No se conoce aún la variabilidad estacional de la productividad para esta región (Lara-Lara *et al.* 2003).

En general, el Golfo de Tehuantepec tiene una gran importancia en el ámbito nacional por ser una región tradicionalmente pesquera, cuarto lugar en producción de camarón y ecológicamente muy productiva, ya que presenta importantes procesos físicos y ecológicos, como el fenómeno de surgencias, los aportes continentales de agua dulce y la dinámica ecológica de grandes sistemas lagunares, que determinan una producción pesquera alta. Estos procesos costeros tienen una fuerte influencia sobre la biología y ecología de las especies, por lo que se reconoce como una macrorregión ecológica marina donde confluyen dos provincias zoogeográficas marino-costeras (Mexicana y Panámica) de biodiversidad y endemismo característicos, con su límite entre ellas frente a Salina Cruz.

Dada la importancia biológica y ecológica del Golfo de Tehuantepec y la presión que existe sobre sus recursos

naturales, asociada al acelerado crecimiento poblacional en la zona costera, es necesario implementar medidas de desarrollo sostenible con base en el conocimiento de la dinámica ecológica de sus recursos, sin negar las condiciones ecológicas y termodinámicas que establecen límites a la apropiación y transformación de la naturaleza, límites que no son bien conocidos y en muchos casos ya han sido sobrepasados sin lograr el deseado desarrollo sostenible.

5.2.5 El Golfo de México

El Golfo de México es una frontera internacional de México, Estados Unidos y Cuba, hacia la región del Gran Caribe en la zona noroccidental tropical, subtropical y templada del Océano Atlántico. Cinco entidades federativas de Estados Unidos bordean el Golfo (Florida, Alabama, Misisipi, Luisiana y Texas) y suman alrededor de 2 934 km de litoral de la Unión Americana. A su vez cinco estados mexicanos bordean el Golfo y uno en la costa caribe (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo), lo que representa cerca de 3 200 km de costa. Entre México y Estados Unidos, aproximadamente 55 millones de personas viven en los estados costeros del Golfo (40 millones en Estados Unidos y 15 millones en México). Más de 80% del petróleo y más de 95%

del gas natural mexicano se produce en las costas del Golfo de México.

El Golfo está localizado en una zona de transición entre clima tropical y subtropical, entre los 18° y 30° N, y 82° y 98° W. Es una cuenca semicerrada que se comunica con el Océano Atlántico y con el Mar Caribe, por el estrecho de Florida y por el canal de Yucatán, respectivamente (Monreal Gómez y Salas de León 1997). Su batimetría varía considerablemente, alcanzando profundidades cercanas a los 4000 m en su región central. La parte occidental tiene una extensión de norte a sur de 1300 km, mientras que las regiones central y oriental promedian 900 km.

La superficie del Golfo de México, incluyendo el cuerpo de agua y los humedales costeros de México y Estados Unidos, es de *ca.* 1 942 500 km². Solo el cuerpo de agua tiene una superficie aproximada de 1 507 639 km². La profundidad promedio del Golfo es de *ca.* 1 615 m, y el volumen de agua es de aproximadamente 2 434 000 km³. La cuenca del drenaje total del Golfo de México es de *ca.* 5 180 000 km², recibe más de 80% del agua dulce de Estados Unidos a lo largo de más de 60% de su geografía continental, y más de 62% del total nacional de México a través de más de 40% de su geografía continental. Los meses de abril a mayo constituyen el periodo de mayor descarga fluvial en las costas de Estados Unidos (después de los deshielos y lluvias continentales); de septiembre a octubre es la época de mayor descarga fluvial en las costas de México (después de las lluvias continentales). En la costa mexicana del Golfo, la estacionalidad climática-meteorológica se caracteriza por un periodo de secas de febrero a mayo, uno de lluvias de verano de junio a octubre con presencia de depresiones tropicales, y uno de frentes fríos anticiclónicos (nortes) de octubre a febrero (Wiseman y Sturges 1999). Estos tres periodos son constantes pero se traslapan de manera relativa, y su intensidad está variando por efectos del cambio climático global.

Desde el punto de vista de la estructuración, funcionalidad y mantenimiento de la biodiversidad de los ecosistemas pelágicos en el Golfo de México sobresalen cuatro elementos que han sido determinantes de la condición de interconectividad de los ecosistemas regionales: 1] los giros anticiclónicos y ciclónicos procedentes de la Corriente del Lazo, cuyas propiedades bióticas son conservativas sobre todo en los primeros y determinan la productividad pelágica mediante afloramientos y corrientes de plataforma particularmente en los segundos; 2] la variable pero permanente presencia de un amplio giro ciclónico en la Bahía de Campeche que determina los reclutamientos de las comunidades locales; 3] la variación en intensidad en

el abundante flujo de agua continental (en particular el proveniente de la Cuenca del Misisipi ha sido determinante de estas zonas anóxicas), y 4] la cada vez mayor presencia de estructuras artificiales dedicadas a la extracción del petróleo que constituyen una nueva red de interconectividad para comunidades bénticas y pelágicas que ha determinado el mayor o menor éxito de reclutamiento de diversas estrategias de vida (Arenas y Salas 2005).

El Golfo de México es un mar semicerrado, parte del mediterráneo americano, que recibe un enorme volumen de agua dulce de origen continental cuyas aportaciones varían notablemente espacial y temporalmente (Riley 1937).

Recibe como elemento central en su circulación aguas del Caribe procedentes del Canal de Yucatán. Por su ubicación geográfica, su dinámica oceanográfica está caracterizada por la fuerte corriente que proveniente del Mar Caribe penetra al Golfo de México por el Estrecho de Yucatán, forma un más o menos amplio lazo, que se denomina Corriente del Lazo, y sale hacia el Atlántico Norte por el Estrecho de la Florida para constituirse, sumándose a otros flujos, en la Corriente del Golfo (Vukovich 1988; Vidal *et al.* 1994). Por su naturaleza de corriente de borde continental oeste se caracteriza por la inestabilidad de su ruta y su variación en intensidad a lo largo del año. Esto hace que la Corriente del Lazo tenga una mayor o menor penetración dentro de la cuenca del Golfo. El flujo principal llega a penetrar hasta los 27° N. Ocasionalmente la parte norte de la Corriente del Lazo que ha penetrado en el Golfo de México se separa del flujo principal que sale por el Estrecho de la Florida manteniendo su flujo principal fijo en los 25° N. El giro aislado de la corriente tiene como característica un flujo anticiclónico y en consecuencia un amplio núcleo central cálido con propiedades conservativas que se manifiestan en isotermas deprimidas a lo largo de cientos de kilómetros horizontalmente (Wiseman y Sturges 1999).

Los ecosistemas pelágicos proveen las diásporas de colonización de las zonas costeras y su vinculación genética aun con poblaciones remotas. Son el determinante de la productividad local en las zonas neríticas, junto con los aportes de las cuencas.

El análisis de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes en las masas de agua y su comportamiento, permite fundamentar la importancia de los giros en la distribución de esas variables, destacando los ciclónicos por el enriquecimiento que propician en aguas superficiales y subsuperficiales (según la intensidad del giro), y el encajecimiento de nutrientes en los anticiclónicos. La

productividad natural del Golfo depende de las interacciones de procesos terrestres y marinos que convergen en la zona costera, condicionados por los procesos climáticos, meteorológicos e hidrológicos. La distribución y concentración de clorofila *a* (índice de la biomasa de fitoplancton) en aguas oceánicas sugiere que el Golfo sea considerado como oligotrófico, no solo por su concentración de nutrientes, sino por el contenido de este pigmento, aun en el área de surgencia; sin embargo, en ocasiones se registran valores más altos en las aguas costeras y en la nutriclina (Biggs 1992; Biggs y Müller-Karger 1994; Sánchez 1992).

Las imágenes del *Costal Zone Color Scanner* (CZCS) muestran que la variación estacional de la clorofila es sincrónica en todo el Golfo, con los valores más altos de diciembre a febrero y los valores más bajos de mayo a julio (Müller-Karger *et al.* 1991).

La ocurrencia de huracanes produce un incremento sustancial en el aporte de nutrientes hacia la superficie, lo que causa un incremento de la biomasa de fitoplancton y en consecuencia de la productividad. Sin embargo, Franceschini y El-Sayed (1968) analizaron el efecto de los huracanes sobre la productividad y concluyeron que dada la naturaleza poco frecuente y la extensión espacial tan restringida de estos, el impacto es muy pequeño en escalas grandes de tiempo y espacio.

Las áreas costeras afectadas por ríos pequeños y estuarios presentan valores elevados de productividad. Los sistemas estuarinos pueden causar un impacto en las regiones costeras adyacentes por la exportación de nutrientes o biomasa de fitoplancton. Imágenes del CZCS muestran la presencia de estas lengüetas asociadas con los ríos (Lohrenz *et al.* 1999).

Merino Ibarra (1992) analizó la estructura y fertilización del afloramiento de Yucatán y concluyó que la distribución vertical de clorofila está caracterizada por un máximo en la termoclina, que separa las dos capas presentes en la plataforma. En esta zona se presentan los valores mayores de producción nueva, superiores a $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. A pesar de que las mediciones de clorofila derivadas de imágenes de satélite muestran que la región del Banco de Campeche, la plataforma del norte del Golfo y la porción frente al sur de Florida son zonas de alta biomasa fitoplanctónica (Cochrane 1962; Bogdanov *et al.* 1968; Müller-Karger 1991; Merino Ibarra 1992; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2008), las mediciones de producción primaria y de los parámetros bioópticos son aún muy escasas como para corroborar la información proporcionada por los sensores remotos.

El Golfo de México es un área de gran diversidad de especie de aves y zona importante en las rutas migratorias del este del continente americano. En el Golfo existen 228 especies de aves, de las cuales 51 (22.3%) son marinas, 114 (50%) acuáticas y 63 (27.7%) terrestres. En el Golfo se ha registrado la presencia de 29 especies de mamíferos marinos: 28 de cetáceos (ballenas y delfines) y una especie de sirenio (manatí). México se distingue por compartir el hábitat de 10 de las 11 especies de tortugas marinas que existen en la actualidad.

5.3 ECOSISTEMAS BENTÓNICOS

El conocimiento de las comunidades bénticas en México es aún escaso. La información disponible está dispersa en publicaciones puntuales o bien se halla contenida en la llamada "literatura gris". Inicialmente las comunidades bénticas que mayor atención recibieron fueron las asociadas a bancos ostrícolas distribuidas en lagunas costeras. Actualmente se puede calificar la composición faunística en dichos sistemas y en el ambiente marino inmediato como diversa. Los fila de invertebrados que han sido identificados son: Annelida, Arthropoda, Brachiopoda, Cnidaria, Echinodermata, Mollusca, Nemertina, Porifera, Sipunculida, Kinorhyncha, Nematoda, Platyhelminthes, Sarcomatigofora y Tardigrada (Escobar Briones 2000).

5.3.1 El ecosistema bentónico

La plataforma continental

Los cuatro mayores sistemas de surgencias del mundo están dominados por pelágicos menores. De forma similar, la familia de crustáceos Galatheidae, que cuenta con más de 200 especies, tiene cinco especies dominantes, todas ellas asociadas a zonas de surgencias: *Pleuroncodes plannipes* en la Corriente de California, *P. monodon* y *Cervimunida johni* en Perú, *Munida rigusa* en las Islas Canarias y *M. gregaria* en el Estrecho de Benguela. Al alcanzar dos años de edad estos organismos se vuelven bénticos. En la costa oeste de Baja California se presentan grupos de *P. plannipes* de cientos de metros o varios kilómetros, que solo pueden vivir donde abunda el alimento.

En los ambientes marinos, los principales grupos de bentos lo constituyen los anélidos poliuetos, los crustáceos y los moluscos. Entre ellos, los poliuetos son generalmente los animales más frecuentes y abundantes de la macrofauna béntica, y son también de los grupos con

mayor riqueza específica. Pueden representar más de un tercio del número de especies macrobénticas presentes en un tiempo y espacio determinados (Knox 1977).

La elevada diversidad específica y morfológica de los poliquetos, así como sus estrategias adaptativas, han permitido una amplia dispersión de ellos en el ambiente acuático. Sus miembros viven sobre todo en zonas marinas, aunque también los encontramos en aguas salobres y dulces. Los animales que integran este grupo de invertebrados son en general de vida libre, aunque algunos son comensales y están asociados a esponjas, celenterados, equinodermos, moluscos, crustáceos y otros poliquetos. Ecológicamente, forman parte de cualquier red trófica que exista en el bentos y algunas de las especies pueden ser indicadores del estado de salud del ecosistema (Pocklington y Wells 1992).

Parte de la materia orgánica llega al fondo del mar permitiendo un desarrollo importante de las comunidades bénticas. Así por ejemplo, en las regiones de la plataforma continental entre Tijuana y Punta Banda, B.C., en la Bahía de Todos Santos, B.C., en bahía de San Quintín, B. C., y en Bahía Magdalena, B.C.S., encontramos una elevada diversidad de macrofauna y particularmente de anélidos, poliquetos, crustáceos y moluscos (Díaz-Castañeda y Harris 2004; Díaz-Castañeda *et al.* 2005).

México alberga una significativa diversidad de equinodermos, de los cuales diversas especies, algunas de importancia comercial, están presentes en la costa oeste de Baja California. El erizo rojo (*S. franciscanus*) y el morado (*S. purpuratus*) alcanzan elevadas densidades en profundidades someras, cerca de los mantos de sargazo *Macrocystis pyrifera*.

El Golfo de California es reconocido como uno de los cinco mares más productivos y biológicamente diversos del mundo. Hendrickx *et al.* (2005) elaboraron un listado de la macrofauna del Golfo de California en el que documentaron 60 familias y 575 especies de poliquetos. Hasta ahora se han registrado aproximadamente 1 100 especies en el Pacífico mexicano; más de la mitad están presentes en la plataforma continental del Golfo de California, encontrándose 49 familias, 282 géneros y 767 especies, la mayoría de las cuales han sido recolectadas frente a las costas de los estados de Baja California Sur (38 familias y 379 especies), Sinaloa (44 familias y 361 especies), y Baja California (40 familias y 243 especies) (Solis Weiss y Hernández Alcántara 1996).

Hasta ahora se han publicado más de 30 trabajos que hacen mención de los poliquetos bénticos del Golfo de California e incluyen material proveniente de lagunas

costeras, zonas intermareales y plataforma continental (Solis Weiss y Hernández Alcántara 1996).

El bentos del Golfo de México se ha estudiado ampliamente en la zona costera. Los hábitats mejor documentados incluyen la plataforma continental nerítica lodosa, arrecifes de coral o de ostiones, marismas salobres, raíces de manglar, pantanos y pastos marinos en lagunas costeras y estuarios, y en menor grado las playas y costas rocosas. Recientemente se ha iniciado la exploración de las comunidades bénticas del talud continental asociadas a los fondos con actividad quimiosintética, junto con las comunidades bénticas de cañones, escarpes y montes de la planicie abisal. De los resultados existentes se puede reconocer que existe una diversidad grande de ecosistemas, hábitats y especies. Esto permite sugerir que el Golfo de México tiene una biodiversidad potencial elevada, equivalente a la reconocida en ecorregiones terrestres de ambientes tropicales y subtropicales. Las listas de especies bentónicas para vertebrados e invertebrados son extensas, y se han ubicado en 27 de los 28 fila reconocidos para ambientes marinos, incluyendo 13 endémicos marinos. De estos fila, seis son frecuentes y abundantes en las comunidades bénticas del Golfo de México: gusanos poliquetos, crustáceos peracáridos y decapados, equinodermos, moluscos, nemátodos e hidroides. Entre las comunidades bénticas más complejas en el Golfo de México se han reconocidos las asociaciones de otros componentes bénticos sésiles, como son los de pastos marinos, de microalgas carbonatadas, de gusanos pogonóforos y de arrecifes de coral. La riqueza de especies en la planicie abisal es similar a la que se ha reconocido en la plataforma continental, pero la composición de especies es diferente, al igual que la talla de los organismos, que tiende a disminuir con la profundidad. Actualmente se han registrado aproximadamente 300 especies de ostrácodos bentónicos, agrupadas en cinco asociaciones faunísticas (Escobar Briones 2000).

El mar profundo

El mar profundo se define como la porción de los mares localizada a profundidades mayores de 200 m. A pesar del área extensa que abarcan, el conocimiento actual es limitado con respecto a otros hábitats profundos. El mar profundo se extiende por miles de kilómetros sin barreras físicas o biológicas. Estos hábitats se distinguen de cualquier ecosistema en el planeta y se caracterizan por una productividad biológica baja, energía física relativamente baja (corrientes de velocidades < 0.25 nudos), ta-

sas biológicas reducidas por la temperatura baja (2 a 4 °C) y el aporte alimentario limitado, de 1 a 10 g C m⁻² año⁻¹, donde el fitodetrito es el principal aporte alimentario. La biomasa béntica de los fondos lodosos representa de 0.001 a 1% de la biomasa de aguas marinas someras. La mayoría de las especies que viven en estos fondos son endémicas, y la diversidad es elevada registrándose entre 21 y 250 especies en un área de 0.25 m² de lodo de mar profundo. El mar profundo en México presenta una diversidad de hábitats que incluyen taludes continentales, trincheras, dorsales y zonas de subducción y expansión, montes marinos, ventilas hidrotermales, infiltraciones de metano y cañones submarinos que se distribuyen como islas en la vastedad de los fondos lodosos. Estos hábitats difieren de los fondos lodosos por la presencia de sustratos duros y niveles de productividad comúnmente elevados a veces sostenidos por quimiosíntesis con agregaciones grandes de invertebrados y bacterias que responden en forma diferente a los impactos antropogénicos y al cambio climático. El conocimiento sobre diversidad biológica y características ambientales se ha concentrado en el Golfo de México y el Golfo de California. Respecto a procesos solamente conocemos de manera incipiente el flujo de partículas al fondo y la tasa metabólica de las comunidades asociadas a los fondos marinos en el Golfo de México. Entre las principales amenazas para el mar profundo en México se prevé el desecho de basura industrial, urbana y proveniente de naves, la pesca profunda con líneas, la extracción de minerales, petróleo y gas. Es importante señalar que la pesquería en ambientes profundos no es sustentable dada la tasa lenta de crecimiento de los peces e invertebrados y su lenta tasa de reclutamiento. El conocimiento sobre los grupos taxonómicos es limitado debido al número reducido de expertos en la gran mayoría de los taxa marinos y en particular de aquellos que ocurren en el mar profundo. El financiamiento limitado para el estudio de este tipo de hábitats y el costo elevado en equipos e infraestructura para su estudio es uno de los grandes retos a vencer en las próximas décadas. A pesar de que existe un acoplamiento entre columna de agua y el fondo marino y el cambio climático, como lo comprueban los registros paleoceanográficos, es difícil predecir el impacto que el cambio climático tendrá sobre los ecosistemas profundos; sin embargo, es cierto que los cambios que se den sobre la producción primaria debido al cambio global alterarán la cantidad de alimento que llegue al mar profundo, de por sí limitado en alimento. A la fecha solamente existe un punto de monitoreo en el largo plazo en mar profun-

do que se ha ubicado en el Golfo de México (Escobar Briones 2000).

La diversidad de este complejo en el SW del Golfo de México se ha estimado en un total de 1 422 especies. La mayoría de los registros faunísticos de que se dispone son de tipo descriptivo y la información cuantitativa se restringe a especies de importancia comercial (ostiones, almejas, camarones peneidos).

5.3.2 Las ventilas hidrotermales

Como uno de los frutos de la cooperación científica internacional, México ha tenido la oportunidad de participar en la exploración oceanográfica del mar profundo. Este ambiente inhóspito cuyas condiciones de absoluta oscuridad, temperaturas cercanas al punto de congelación y presión hidrostática superior a las 200 atmósferas, ha representado en las últimas tres décadas un verdadero desafío para la ciencia y la tecnología modernas. Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías tales como sumergibles autónomos y sistemas robóticos, los secretos del mar profundo han venido progresivamente siendo desvelados. En este ambiente tan particular, la oceanografía moderna ha tratado de encontrar la respuesta a fenómenos sísmicos, el desplazamiento de las placas tectónicas, la concentración de minerales estratégicos y los centros de emisión de calor del interior de la Tierra. Sin embargo, quizá las preguntas más intrigantes en este misterioso ambiente están relacionadas con las posibilidades de encontrar los primordios a partir de los cuales irradiaron las primeras formas de vida en el planeta. Sobre los vastos espacios profundos de las cuencas oceánicas, reconocidos como zonas abisales por los primeros exploradores del siglo XIX, se han descubierto a partir de 1977 (Ballard 1977; Corliss *et al.* 1979) formas de vida y adaptaciones fisiológicas desconcertantes, cuyo estudio ha requerido el replanteamiento de conceptos evolutivos tales como los mecanismos de especiación y distribución de formas de vida marina a lo largo del tiempo (Grassle 1982, 1985; Soto y Molina Cruz 1986). Actualmente, el progreso de la investigación oceanográfica del mar profundo, aunada a la incorporación de técnicas de filogenética molecular, ha estimulado nuevamente el debate sobre la búsqueda del ancestro universal en ecosistemas reconocidos como extremos, por sus características altamente reductoras, temperaturas superiores a 300 °C y energía química secuestrada en compuestos minerales capaz de ser utilizada en la síntesis de compuestos orgánicos mediante la quimiosíntesis. Solo los microorganismos hipertermofí-

licos que habitan en sistemas geotérmicos y las llamadas ventilas hidrotermales en el mar profundo son capaces de subsistir con éxito en dichos ambientes. Sin duda una de las implicaciones de mayor importancia de este fenómeno adaptativo es la proximidad genética (pequeñas subunidades de rARN y duplicación de genes) de estos microorganismos hipertermofílicos con un posible ancestro universal (Pace 1991) a partir del cual se originaron las tres ramas filogenéticas primarias: Archaea, Bacteria y Eucarya.

En nuestro país la investigación del mar profundo es aún incipiente y son pocos los recursos humanos y físicos que se invierten en su estudio. Las ventilas hidrotermales se originan en las fisuras del piso oceánico, cuando las grandes placas tectónicas se desplazan sobre la corteza terrestre, dejando espacios por los que se filtra agua oceánica con temperaturas de 2 a 4 °C. Al calentarse el agua por su proximidad con la cámara magmática, la diferencia de densidad ocasiona su expulsión a manera de géiser submarino (temperaturas >300 °C), disolviendo a su paso los contenidos minerales de rocas de la propia corteza.

En las aguas del Pacífico frente a las costas de Manzanillo (21° N), y en la porción central del Golfo de California, en la llamada Cuenca de Guaymas, a profundidades mayores de los 2 000 m, se han localizado a partir de los años setenta (Lonsdale 1985) sistemas hidrotermales cuyas complejas formas de vida han atraído la atención de la comunidad científica internacional. Actualmente, el avance del estudio del mar profundo ha revelado que estos sistemas de vida también se presentan en zonas poco profundas (<1 000 m) como el Escarpado de Florida y la costa de Luisiana, en el Golfo de México (Paull *et al.* 1984; Brooks *et al.* 1987), y en los márgenes de subducción de las placas tectónicas frente a las costas de Oregon y Japón (Kulm *et al.* 1986; Saino y Otha 1989). Algunas de estas localidades no necesariamente exhiben altas temperaturas, pero todas coinciden en contar con la presencia de las especies químicas, vitales para las bacterias quimiolitotautotróficas.

Los estudios se han concentrado esencialmente en tres aspectos básicos: 1] la estructura y el funcionamiento de la comunidad de megafauna (organismos reconocibles por su tamaño en registros video y fotográficos; 2] estrategia trófica de los organismos predominante, y 3] las características sedimentarias de la materia orgánica depositada en sitios próximos a las ventilas hidrotermales (De la Lanza-Espino y Soto 1999; Soto 2004).

Gracias a varias expediciones exploratorias en la Cuenca de Guaymas se ha podido estimar la biodiversi-

dad de especies de megafauna, la cual se aproxima a más de 14 (Soto y Grassle 1988).

En la Cuenca de Guaymas se reconocen cuatro fuentes importantes de carbono orgánico: el carbono autógeno producido a partir de la quimiosíntesis de bacterias sulfo-oxidativas; el carbono de origen metanogénico; el carbono generado por la vía de los hidrocarburos fósiles presentes, y el carbono autotrófico producido por la fotosíntesis. El organismo que mejor refleja su dependencia del carbono orgánico de origen quimiosintético es *R. pachyptyla* (¹³C, de 12.7 a 13.2%), en tanto que su análogo funcional en sustrato sedimentario suave, el bivalvo *Vesicomya gigas*, muestra un valor de carbono isotópico empobrecido (¹³C, de 35.9 a 35.4%).

La complejidad de las fuentes de carbono orgánico presentes en la Cuenca de Guaymas requiere también examinar la distribución, la concentración y la alteración de la materia orgánica sedimentaria por los procesos hidrotermales. El flujo vertical de carbono incorporado al sistema bentónico profundo puede inferirse a partir del cálculo de las proporciones de carbono, nitrógeno y fósforo (106:16:1). En el caso de la materia sedimentaria en la Cuenca de Guaymas esta proporción resulta ser alta (2 692:57:1 y 2 130:25:1) en los sitios próximos a ventilas activas (>29 °C): esto confirma la importancia de la exportación de carbono quimiosintético al ambiente abisal inmediato a las ventilas. Los ambientes hidrotermales profundos presentes en el Océano Pacífico oriental son sitios idóneos para la formulación de programas internacionales de cooperación científica en virtud de la importancia estratégica que representan para la futura extracción de minerales de alta pureza y el estudio de fármacos de actividad anticarcinogénica (Ayala-Castañares y Knox 2000).

5.4 PRIORIDADES DE INVESTIGACIÓN

Recientemente, la comunidad académica internacional ha desarrollado diversos esfuerzos para identificar los temas más urgentes de investigación que sienten las bases para avanzar en el conocimiento de los ecosistemas marinos y el uso sustentable de sus recursos, y que proporcione los elementos para enriquecer la toma de decisiones. En general, entre los temas principales están los siguientes:

- El consumo de alimentos y la salud humana.
- Mejorar la salud de los ecosistemas.
- El uso sustentable de los recursos naturales.

- El papel del océano en la variabilidad y el cambio climático.
- La mitigación de los riesgos por fenómenos naturales.

Asimismo, se han propuesto varios elementos transdisciplinarios. Estos incluyen:

- Incrementar el entendimientos básico del océano.
- El apoyo a la investigación marina mediante la observación y la infraestructura pertinente.
- La expansión de la educación marina.

De manera particular se requiere:

- Establecer un sistema de monitoreo oceánico para medir la variabilidad y el cambio climático a escalas de mediano y largo plazos, así como medir las variables físicas, químicas y biológicas en regiones representativas de los mares mexicanos.
- Entender cómo cambia la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas marinos a lo largo del tiempo y el espacio, en función de la variabilidad y el cambio climático y las actividades humanas.
- Estudios de indicadores de la ecología y ecofisiología del plancton para mejorar la interpretación de los registros del pasado por medio de los fósiles en los sistemas sedimentarios.
- Estudios a gran escala de los flujos entre el océano y la atmósfera de los gases de efecto invernadero para entender la capacidad de secuestro del océano.
- Aumentar el conocimiento de la biodiversidad marina, sus fronteras y sus patrones geográficos.
- Mejorar los métodos para escalar los modelos de escala global para predecir los efectos locales y regionales para los procesos biogeoquímicos en el océano.
- Mejorar los métodos para escalar a partir de observaciones locales y estimar la producción primaria y secundaria a escala global.
- Establecer sistemas de alerta temprana sobre los efectos de la eutroficación, mareas rojas, sustancias tóxicas y especies invasivas.
- Un mejor entendimiento de la magnitud de los reservorios de carbono y de los mecanismos responsables de los flujos, para entender el papel del océano en el cambio climático.
- Un mejor entendimiento de los mecanismos básicos en la interacción de la atmósfera y el océano en cuanto a los intercambios fundamentales de momentum, transferencia de especies químicas, calor y humedad.

El mayor vacío en la comprensión de los ecosistemas marinos es el desconocimiento a largo plazo, y a diversas escalas espacio-temporales, de los procesos ecológicos más relevantes que son los responsables de proporcionar los bienes y servicios de los ecosistemas.

En México tenemos un desconocimiento total del funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos marinos (carbono y nitrógeno, principalmente). Desconocemos asimismo la magnitud de los reservorios y flujos de los elementos antes mencionados, en la mayoría de los ecosistemas marinos.

Hasta ahora, es aún muy incipiente el conocimiento sobre la respuesta de los ecosistemas marinos a la variabilidad (*i.e.*, El Niño y La Niña) y el cambio climático. Por la magnitud de los efectos en los sistemas naturales y los impactos socioeconómicos debe ser uno de los temas de investigación de mayor prioridad en la agenda científica.

Con excepción de las especies de fauna y flora de interés económico, en general conocemos muy poco sobre la biodiversidad marina de todos los grupos, tanto pelágicos como bentónicos. El problema es aún más crítico por la carencia y motivación de recursos humanos para el trabajo taxonómico.

Es urgente conocer las consecuencias ambientales y socioeconómicas de los cambios en los servicios que nos proporcionan los ecosistemas.

5.5 RETOS PARA LA TOMA DE DECISIONES

El océano es vasto y complejo, es un reto muestrearlo, observarlo y modelarlo. Los procesos oceánicos varían en una amplia escala espacial y temporal, desde segundos hasta décadas, desde micras hasta miles de kilómetros, y muchos procesos están enlazados de maneras que aún no entendemos.

Los ecosistemas marinos forman parte integral de nuestro modelo de desarrollo. Como se mencionó, ellos cubren los ecosistemas pelágicos en la plataforma continental y en las aguas oceánicas. Lo mismo puede decirse de los ecosistemas bentónicos en la plataforma y en el océano profundo. Los ecosistemas marinos están conectados con los terrestres, no únicamente a lo largo de la zona costera, sino también por los ríos y diversos escurrimientos. Los ecosistemas marinos contienen una inmensa diversidad biológica; están estructurados por complejas interacciones físicas, químicas, geológicas y ecológicas, las cuales proveen abundantes bienes y servicios que apo-

yan el desarrollo de la sociedad y son esenciales para mantener la vida en el planeta. Sin embargo, estos ecosistemas son finitos y vulnerables a la sobreexplotación y mal uso, todo como resultado de las múltiples actividades socioeconómicas.

Nuestro país necesita un océano saludable y biológicamente diverso; esto solo puede lograrse si contamos con un amplio entendimiento de los procesos que regulan las poblaciones de los diversos ecosistemas marinos. México necesita avanzar en las investigaciones de las ciencias marinas tanto básica como aplicada, desarrollar una estrategia nacional comprensiva que establezca las prioridades de investigación marina para resolver los asuntos urgentes, desde la escala nacional a la local, aprovechando la infraestructura existente e identificando las necesidades futuras.

A medida que la infraestructura científica y tecnológica mundial avanza, nuestro país requiere la participación de varias fuentes de apoyo, tanto gubernamental como privado. La investigación marina requiere cubrir una multitud de regiones geográficas, fenómenos ambientales e implicaciones regulatorias. Lo que comenzó como una actividad de investigación dirigida a entender la hidrografía básica, la circulación y las corrientes oceánicas, y la evaluación de poblaciones pesqueras, ahora requiere extenderse a una investigación multidisciplinaria, interdisciplinaria, transdisciplinaria y multiinstitucional, para atender algunos de los retos actuales más preocupantes del sistema terrestre (*i.e.*, cambio climático, manejo de ecosistemas, salud pública, mitigación de fenómenos naturales, etc.) desde la escala local hasta la mundial.

Esta evolución requiere un plan de investigación oceánica que maximice las oportunidades para coleccionar, administrar y analizar datos oceánicos; que provea maneras de compartir recursos, y que al final proporcione la información requerida para que los tomadores de decisiones lo hagan con bases científicas sobre el uso y la protección del océano.

Los mares y la zona costera de México son uno de los pilares para el desarrollo nacional. De manera desafortunada el deterioro ambiental, con la consecuente pérdida de la biodiversidad marina y de muchos recursos socioeconómicos, cada día sigue incrementándose. Nuestro país es actualmente uno de los que tienen los ecosistemas marinos más frágiles y vulnerables ante los impactos de los fenómenos naturales y los antropogénicos.

En el contexto internacional, el capítulo 17 de la Agenda 21 describe las principales acciones relacionadas con el uso sustentable de los recursos marinos, y establece un

plan de acción y las prioridades para avanzar hacia el desarrollo sustentable. Desafortunadamente, hasta hoy, nuestro país no ha integrado ni ha adoptado en forma responsable los principios de la sustentabilidad. Es urgente que se promueva la construcción de las Agendas 21 locales, en el nivel municipal, para después integrar las Agendas 21 estatales y por último la Agenda 21 nacional, para desarrollar las estrategias que nos lleven a armonizar el desarrollo social, con lo económico, lo ambiental, que nos permitan crear la institucionalidad para establecer las políticas públicas que permitan elevar la calidad de vida de la sociedad con base en una explotación racional de los recursos marinos.

REFERENCIAS

- Álvarez-Borrego, S. 1983. Gulf of California, en B.H. Ketchum (ed.), *Estuaries and enclosed seas*. Elsevier, Amsterdam, pp. 427-449.
- Álvarez-Borrego, S., y R. Lara-Lara. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California, en J.P. Dauphin y B. Simoneit (eds.), *The Gulf and the Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 47, Tulsa, pp. 555-567.
- Álvarez-Borrego, S., J.A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M. Acosta-Ruiz y R. Schwartzlose. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* 5:53-71.
- Arenas, V., y J. Salas. 2005. El Golfo de México. Una aproximación a los determinantes de su biodiversidad, en J. Hernández Aguilera, J.A. Ruiz Nuño, R. Toral Almazán y V. Arenas (eds.), *Camarones, langostas y cangrejos de la costa este de México*, vol. 1. CONABIO-Estudio y Conservación de la Naturaleza, A.C., México.
- Ayala-Castañares, A., y R.A. Knox. 2000. Opportunities and challenges for Mexico-U.S. cooperation in the ocean sciences. *Oceanography* 13:79-82.
- Badan, A. 1997. La Corriente Costera de Costa Rica en el Pacífico mexicano, en M.F. Lavín (ed.), *Contribuciones a la oceanografía física en México*. Monografía 3, Unión Geofísica Mexicana, México, pp. 141-171.
- Badan-Dangon, A. 1998. Coastal circulation from the Galápagos to the Gulf of California, en A.R. Robinson y K.H. Brink (eds.), *The Sea*, vol. 11, John Wiley, Nueva York, pp. 315-343.
- Ballard, R.D. 1977. Notes on a major oceanographic find. *Oceanus* 20:35-44.
- Bayley, R.G. 1995. *Ecoregions of the oceans*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, D.C., LTC Graphics, Denver.

- Bigg, G.R. 1996. *The oceans and climate*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Biggs, D.C. 1992. Nutrients plankton and productivity in a warm-core ring in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* **97**:2143-2154.
- Biggs, D.C., y F.E. Müller-Karger. 1994. Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* **99**:7371-7384.
- Bogdanov, D.V., V.A. Sokolov y N.S. Khromov. 1968. Regions of high biological and commercial productivity in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Oceanology* **8**:371-381.
- Brooks, J.M., M.C. Kennicutt II, C.R. Fisher, S.A. Macko, K. Cole *et al.* 1987. Deep-sea hydrocarbon seep communities: Evidence for energy and nutritional carbon sources. *Science* **238**:1138-1142.
- Cochrane, J.D. 1962. The cool surface water and front on the western flank of the Yucatán Current. *Journal of Geophysical Research* **67**:1632.
- Corliss, J.B., J. Dymond, L.I. Gordon, J.M. Edmond, R.P. von Herzen *et al.* 1979. Submarine thermal springs on the Galápagos Rift. *Science* **203**:1073-1083.
- De la Lanza-Espino, G., y L.A. Soto. 1999. Sedimentary geochemistry of hydrothermal vents in Guaymas Basin, Gulf of California, Mexico. *Applied Geochemistry* **14**:499-510.
- Díaz-Castañeda, V., y L. Harris. 2004. Biodiversity and structure of the polychaete fauna from Bahía Todos Santos, Baja California, Mexico. *Deep-Sea Research II: Tropical Studies in Oceanography* **51**:827-847.
- Díaz-Castañeda, V., A. de León y E. Solano. 2005. Structure and composition of the polychaete community from Bahía San Quintín, Pacific coast of Baja California, Mexico. *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences* **104**:75-99.
- Escobar Briones, E. 2000. La biodiversidad del mar profundo en México. *Biodiversitas* **29**:2-6.
- Fiedler, P.C., y L.D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* **69**:143-180.
- Flucar. Flujos de carbono. Fuentes y sumideros de carbono en los márgenes continentales en el Pacífico mexicano, en <<http://flucar.cicese.mx>>.
- Franceschini, G.A. y S.Z. El-Sayed. 1968. Effect of Hurricane Inez (1966). On the hydrography and productivity of the western Gulf of Mexico. *Ocean Dynamics* **21**:193-202.
- García-Pámanes, J., y J.R. Lara-Lara. 2001. Pastoreo por el microzooplancton en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* **27**:73-90.
- García-Pámanes, J., J.R. Lara-Lara y C. Bazán-Guzmán. 2007. Pastoreo por el mesozooplancton en la región central del Golfo de California: un estudio estacional, en B. Hernández de la Torre y G. Gaxiola-Castro (eds.), *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 141-155.
- Grassle, J.F. 1982. The biology of hydrothermal vents: A short summary of recent findings. *Marine Technology Society Journal* **16**:33-38.
- Grassle, J.F. 1985. Hydrothermal vents animals: Distribution and biology. *Science* **229**:713-717.
- Hayden, B.P., G.C. Ray y R. Dolan. 1984. Classification of coastal and marine environments. *Environmental Conservation* **11**:199-207.
- Hendrickx, M.E., R.C. Brusca y L.T. Findley (eds.). 2005. *Listado y distribución de la macrofauna del Golfo de California, México*. Parte 1. *Invertebrados*. Arizona-Sonora Desert Museum-Conservation International.
- Hidalgo-González, R., y S. Álvarez-Borrego. 2008. Water column structure and phytoplankton biomass profiles in the Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas* **34**:197-212.
- Imecocal. Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California, en <<http://imecocal.cicese.mx>>.
- Kessler, W.S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* **69**:181-217.
- Knox, G. 1977. The role of polychaetes in benthic soft-bottom communities, en D. Reish y K. Fauchald (eds.), *Essays of polychaetous annelids in memory of Dr. Olga Hartman*. Allan Hancock Foundation, Los Ángeles, pp. 547-604.
- Kulm, L.D., E. Suess, J.C. Moore, B. Carson, B.T. Lewis *et al.* 1986. Oregon subduction zone: Venting, fauna, and carbonates, *Science* **231**:561-566.
- Lara-Lara, J.R., E. Millán-Núñez, R. Millán-Núñez y C. Bazán-Guzmán. 2003. Producción primaria del fitoplancton en el Pacífico mexicano (1992-2000), en M.T. Barreiro-Güemes, M.E. Meave del Castillo, M. Signoret-Poillon, M.G. Figueroa-Torres (eds.), *Planctología Mexicana*. Sociedad Mexicana de Planctología, A.C., México, pp. 103-124.
- Lara-Lara, J.R., J. García-Pámanes y C. Bazán-Guzmán. 2007. Flujo vertical de materia orgánica particulada en la región central del Golfo de California, en B. Hernández de la Torre y G. Gaxiola-Castro (eds.), *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 383-395.
- Lavaniegos, B.E., y L.C. Jiménez-Pérez. 2006. Biogeographic inferences of shifting copepod distribution during 1997-1999 el Niño and la Niña in the California Current. *Contributions to the Study of East Pacific Crustaceans* **4**:113-158.
- Lavín, P.M., E. Beier, J. Gómez-Valdés, V.M. Godínez y J. García. 2006. On the summer poleward coastal current off SW México. *Geophysical Research Letters* **33**, L02601, doi:10.1029/2005GL024686.
- Lohrenz, S.A., D.A. Wiesenburg, R.A. Arnone y X. Chen. 1999. What controls primary production in the Gulf of Mexico?, en H. Kumpf, K. Steidinger y K. Sherman (eds.),

- The Gulf of Mexico large marine ecosystem: Assessment, sustainability, and management.* Blackwell Science Ltd., Malden, pp. 151-170.
- Longhurst, A. 1998. *Ecological geography of the sea.* Academic Press, San Diego.
- Lonsdale, P.F. 1985. A transform continental margin rich in hydrocarbons, Gulf of California. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* **69**: 1160-1180.
- López Sandoval, D.C., J.R. Lara-Lara, M.F. Lavín, S. Álvarez-Borrego y G. Gaxiola Castro. 2009. Primary productivity observations in the eastern tropical Pacific off Cabo Corrientes, Mexico. *Ciencias Marinas* **35**: 169-182.
- Mann, K.H. 1989. *Ecology of coastal waters.* Studies in Ecology 8. University of California Press, Berkeley.
- Margalef, R. 1974. *Ecología.* Omega, Barcelona.
- Merino Ibarra, M. 1992. *Afloramiento en la Plataforma de Yucatán: estructura y fertilización.* Tesis de doctorado. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México.
- Monreal Gómez, M.A. y D.A. Salas de León. 1997. Circulación y estructura termohalina del Golfo de México, en M.F. Lavín (ed.), *Contribuciones a la oceanografía física en México.* Monografía 3. Unión Geofísica Mexicana, México, pp. 183-199.
- Müller-Karger, F.E., J.J. Walsh, R.H. Evans y M.B. Meyers. 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *Journal of Geophysical Research* **96**: 12645-12665.
- Pace, N.R. 1991. Origin of life-facing up to the physical setting. *Cell* **65**: 531-533.
- Paull, C.K., B. Hecker, R. Commeau, R.P. Freeman-Lynde, C. Neumann *et al.* 1984. Biological communities at the Florida escarpment resemble hydrothermal vent taxa. *Science* **226**: 965-967.
- Pocklington, P., y P.G. Wells. 1992. Polychaetes: Key taxa for marine environmental quality monitoring. *Marine Pollution Bulletin* **24**: 593-598.
- Ray, G.C., B.P. Hayden y R. Dolan. 1982. *Development of a biophysical coastal and marine classification system. National Parks, conservation and development. The role of protected areas in sustaining society.* IUCN, Gland, Suiza.
- Riley, G.A. 1937. The significance the Mississippi River drainage for biological conditions in the northern Gulf of Mexico. *Journal of Marine Research* **1**: 60-74.
- Robinson, M.K. 1973. Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperatures in the Gulf of California, Mexico. *San Diego Society of Natural History Memoir* 5.
- Robles-Jarero, E.G., y J.R. Lara-Lara. 1993. Phytoplankton biomass and primary productivity by size classes in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Plankton Research* **15**: 1341-1358.
- Roden, G. 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California, en T.H. van Andel y G.G. Shor Jr. (eds.), *Marine Geology of the Gulf of California: A symposium.* (Memoir No. 3). American Association of Petroleum Geologist, Tulsa, pp. 30-58.
- Roden, G. 1972. Termohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revillagigedo Island region. *Journal of Physical Oceanography* **2**: 177-183.
- Ryther, J.H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Science* **166**: 72-76.
- Saino, T., y S. Otha. 1989. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios of vesicomid clams and a vestimentiferan tubeworm in the subduction zone east of Japan. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* **71**: 169-178.
- Sánchez, L. 1992. *Primary productivity of the northwest Gulf of Mexico: Shipboard measurement in July 1990, October 1990, and March 1991.* M.S. Thesis, Texas A&M University, College Station, Texas.
- Santamaría del Ángel, E., S. Álvarez-Borrego y F.E. Müller-Karger, 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research* **99**: 7411-7421.
- Seiter, K, C. Hensen, J. Schröter y M. Zabel. 2004. Organic carbon in surface sediments defining regional provinces. *Deep-Sea Research I: Oceanographic research papers* **51**: 2001-2026.
- Sherman, K., y L.M. Alexander (eds.). 1986. *Variability and management of large marine ecosystems.* AAAS Selected Symposium 99. Westview Press, Boulder.
- Solís Weiss, V., y P. Hernández Alcántara. 1996. *Atlas de anélidos poliquetos de la plataforma continental del Golfo de California. Informe técnico.* Laboratorio de Ecología Costera, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México.
- Soto, L.A. 2004. Research of extreme environments in the deep-sea, en A. Luis Soto (ed.), *Agustín Ayala Castañares: univertario, impulsor de la investigación científica.* Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México, pp. 311-318.
- Soto, L.A., y A. Molina Cruz. 1986. Exploración submarina de ventilas hidrotermales en la Cuenca de Guaymas. *Ciencia y Desarrollo* **67**: 17-26.
- Soto, L.A., y J.F. Grassle. 1988. Megafauna of hydrothermal vents in Guaymas Basin, Gulf of California. *Joint Oceanographic Assembly Abstract* 488. IABO.
- Sullivan, K., y G. Bustamante. 1999. *Setting geographic priorities for marine conservation in Latin America and the Caribbean.* The Nature Conservancy, Arlington.
- Thorson, G. 1971. *La vida en el mar.* Editorial Guadarrama, Madrid.
- Valdez-Holguín, J.E., S. Álvarez-Borrego y C.C. Trees. 1999. Seasonal and spatial characterization of the Gulf of California phytoplankton photosynthetic parameters. *Ciencias Marinas* **25**: 445-467.

- Vidal, V.M., F.V. Vidal, A.F. Hernández, E. Meza y J.M. Pérez Molero. 1994. Baroclinic flows, transports, and kinematic properties in a cyclonic-anticyclonic-cyclonic ring triad in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* **99**: 7571-7597.
- Vukovich, F.M. 1988. Loop current boundary variations. *Journal of Geophysical Research* **93**: 15585-15591.
- Wilkinson, T., J. Bezaury-Creel, F. Gutiérrez, T. Hourigan, L. Janishevski, C. Madden, M. Padilla y E. Wiken (en prensa). *Marine spaces: North America's Marine Ecological Regions*, Commission for Environmental Cooperation, Montreal.
- Wiseman, W.J., y W. Sturges. 1999. Physical oceanography of the Gulf of Mexico: Processes that regulate its biology, en H. Kumpf, K. Steidinger y K. Sherman (eds.), *The Gulf of Mexico large marine ecosystem: Assessment, sustainability, and management*. Blackwell Science, Malden, pp. 77-91.
- Zamudio, L., H.E. Hurlburt, J.E. Metzger y C.E. Tilburg. 2007. Tropical wave-induced oceanic eddies at Cabo Corrientes and the María Islands, Mexico. *Journal of Geophysical Research* **112**, C05048, doi:10.1029/2006JC004018.
- Zeitzchel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* **3**: 201-207.