



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES

Tropical Journal of Environmental Sciences



Análisis de las amenazas e implicaciones del cambio climático sobre los tiburones

Analysis of Threats and Implications of Climate Change on Sharks

José Rodrigo Rojas ^a

^a El autor, biólogo marino especialista en ictiobiogeografía, es profesor asociado en la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional, Costa Rica, RRojasM@ice.go.cr.

Director y Editor:

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

Consejo Editorial:

Enrique Lahmann, UICN, Suiza

Enrique Leff, UNAM, México

Marielos Alfaro, Universidad Nacional, Costa Rica

Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica

Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica

Gerardo Budowski, Universidad para la Paz, Costa Rica

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas



Análisis de las amenazas e implicaciones del cambio climático sobre los tiburones

José Rodrigo Rojas

El autor, biólogo marino especialista en ictiobiogeografía, es profesor asociado en la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional.

*Alicia miró alrededor suyo con gran sorpresa.
-Pero ¿cómo? ¿Si parece que hemos estado bajo este árbol todo el tiempo! ¡Todo está igual que antes!
-¿Pues claro que sí! -convino la Reina-. Y, ¿cómo si no?
-Bueno, lo que es en mi país -aclaró Alicia, jadeando aún bastante-, cuando se corre tan rápido como lo hemos estado haciendo y durante algún tiempo, se suele llegar a alguna otra parte...
-¡Un país bastante lento! -replicó la Reina-. Lo que es aquí, como ves, hace falta correr todo cuanto una pueda para permanecer en el mismo sitio. Si se quiere llegar a otra parte hay que correr por lo menos dos veces más rápido.
Lewis Carrol, Alicia a través del espejo.*

Resumen

La vulnerabilidad es una función que depende de la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación. Este concepto es aplicado al estudio de las amenazas que enfrentan los tiburones por las modificaciones ecotróficas causadas por el cambio climático. El enfoque de esta investigación discute la dicotomía que existe entre las características evolutivas, estrategias de vida y dominio de estos condriictios versus las transformaciones sistémicas

Abstract

The vulnerability is a function depending on exposure, sensibility and adaptative capacity. This concept is applied to the study of the threats facing sharks for eco-trophics changes caused by climate change. The approach of this research discusses the dichotomy between the evolutionary characteristics, life strategies and domain of these chondrichthyan versus systemic and irreversible transfor-

Introducción

El objetivo de esta investigación es reflexionar sobre las implicaciones del cambio climático en los tiburones, grupo que desde el punto de vista filogenético y sistemático pertenece a la clase Chondrichthyes y que, junto a las mantarrayas y quimeras, conforma la subclase Elasmobranchii. Para cumplir el propósito, se articulan aspectos generales de la evolución y morfología con el estado actual de sus pesquerías, y sobre la base de estas relaciones se analiza la vulnerabilidad a la que se ven

e irreversibles que impone este fenómeno de megaescala. La evidencia mundial indica que el cambio climático es un vector propagador de modificaciones ecosistémicas tan intensas y constantes que supera las estrategias de vida de los tiburones, llevando al límite de su resiliencia los ciclos reproductivos, oferta alimentaria, acceso a refugios, tasas de crecimiento y patrones de dispersión. La ruta evolutiva que llevó a los tiburones a dominar los ambientes acuáticos los enfrenta con amenazas que superan las capacidades de respuesta efectiva.

Palabras claves: cambio climático, tiburones, vulnerabilidad, adaptaciones, implicaciones.

mations imposed by this megaescala phenomenon. Worldwide evidence shows that climate change is an intense and constant vector of eco-systemic modifications even beyond of shark's life strategies, pushing them to resilience limits over reproductive cycles, food supply, refugia, growth rates and patterns of dispersion. The evolutionary roadmap that led the sharks to dominate aquatic environments confronts them with threats exceed the capacity to effective answer.

Key words: climate change, sharks, vulnerability, adaptations, implications.

enfrentados los tiburones debido a sus rasgos de historia de vida y las afectaciones ecosistémicas provocadas por la eventual remoción del grupo. Con base en este conjunto de antecedentes, y lo expuesto en referencias especializadas, se discuten las afectaciones que están experimentando los tiburones por el cambio climático. Finalmente, se expone una serie de implicaciones ecológicas, alimentarias, económicas y legales asociadas a esta amenaza de megaescala.

Características evolutivas y morfológicas de los tiburones

Evolutivamente hay consenso en que los tiburones están emparentados con los Placodermos, peces que datan del Paleozoico (550 millones de años), con cuerpos rodeados de una pesada coraza, grandes escamas óseas, fuertes espinas en las aletas y con limitaciones de movimiento por ausencia de articulaciones céfalo-mandibulares (Bonfil, 1994).

La historia evolutiva de los tiburones se caracteriza por una compleja combinación de niveles sucesivos de modificaciones morfológicas y continuas radiaciones adaptativas hacia la conquista de un vasto ambiente marino poco poblado y con grandes posibilidades de colonizar nichos pelágicos y bentónicos, así como por la dispersión por todos los mares y océanos. Esa libertad adaptativa los preparó para mantenerse casi sin modificaciones por millones de años (Compagno, 1984). Los caracteres anatómicos que les han otorgado esa supremacía incluyen: suspensión mandibular, esqueleto axial, cuerpo cubierto de escamas y dientes



Tiburón martillo, isla del Coco, Costa Rica. Avi Klapfer

placoideos, ausencia de vejiga natatoria, aleta caudal heterocerca, de cinco a siete hendiduras branquiales, fertilización interna a través de myxopterigios en los machos, desarrollo embriológico (oviparí, ovoviviparí y viviparí), mecanismos eficientes de alerta temprana y detección de presas y amenazas mediante ámpulas de Lorenzini (Rojas *et al.*, 2000).

Tal como señala Bonfil (1994), fue crucial en el éxito evolutivo de los tiburones las modificaciones que les permitió avanzar y dejar de ser peces succionadores y/o ramoneadores para convertirse en carnívoros polí-fagos oportunistas. El acceso a nuevos nichos alimentarios y la ampliación de la gama de presas y recursos, que antes eran imposibles, lo resolvieron cuando lograron la conexión mandibular. La posibilidad de abrir más las mandíbulas y desarrollar fuertes hileras de dientes óseos les permitió la captura de piezas cada vez más grandes así como la defensa frente a otras criaturas marinas extintas (Compagno, 1984). La conexión hiomandibular incrementó la eficiencia alimentaria y respiratoria; al cerrar las mandíbulas se resolvió el problema de atrapar, tragar y evitar el reflujo que ocurre cuando el agua pasa por las aberturas branquiales (Fowler, 1996).

Al éxito evolutivo se suman el control efectivo de la flotabilidad, las adaptaciones natatorias, la cola heterocerca, la forma del cuerpo y la efectividad respiratoria. Además, son poiquiloterms con capacidad para regular su temperatura corporal, adaptaciones osmo-reguladoras y alta eficiencia respiratoria. Son un arquetipo morfológico con una suma de atributos que los han hecho evolutivamente exitosos, con un amplio rango de conquista y con presencia en estuarios, lagos y ríos (Compagno *et al.*, 2005).

Estado actual de los tiburones

Aunque no existe consenso, se reconocen aproximadamente 400 especies de tiburones; 17% se encuentran en la categoría de amenazados, 13% en la de casi amenazados y 47% en la categoría de datos insuficientes (UICN, 2011; Cites, 2011). De acuerdo con Zarate & Hearn (2008), en el Pacífico Oriental Tropical se han registrado aproximadamente 88 especies en diferentes ambientes marinos; por ejemplo, el tiburón toro (*Carcharhinus leucas*) se encuentra en aguas salobres y estuarios, el punta blanca (*C. longimanus*) en aguas abiertas, y en aguas profundas el reciente tiburón gato (*Bythaelurus* sp.). El tiburón azul (*Prionace glauca*) es altamente migratorio y cosmopolita, mientras que otros son de hábitos más sedentarios e incluso endémicos, como *Heterodontus quoyi* que habita las islas Galápagos (Compagno, 1984; Bonfil 1994; Rojas et al., 2000).

La pesca descontrolada ha afectado fuertemente las poblaciones de algunas especies que son capturadas por sus aletas. Casos bien documentados de pesquerías colapsadas son el marrajo sardinerero -*Lamna nasus*- en el Atlántico Norte, el cazón *Galeorhinus galeus* en las costas de California y el tiburón peregrino -*Cetorhinus maximus*- (Muscick & Bonfil, 2005). A pesar de estas evidencias, el volumen de captura registrada de tiburones ha aumentado más de cuatro veces (220%) y las exportaciones alcanzaron la cifra récord de 100 500 toneladas en 2010 y un valor de \$ 280 millones. Las aletas siguen siendo el producto con mayor valor económico en el mercado; su volumen de ventas creció a un ritmo de 8% anualmente entre 1995 y 2010. Estos datos pudieran subestimar la realidad, ya que están basados en estadísticas incompletas que no consideran la mortalidad resultante de los descartes y no necesariamente reflejan todos los productos de tiburón transados (Compagno, 2008; Dulvy et al., 2008).

A pesar de esta condición, la expansión global de las pesquerías sigue alterando los registros en puerto, ya que las capturas de especies aparecen agrupadas en categorías comerciales, lo que tergiversa la presión de pesca que realmente hay detrás de un taxón específico. En la región centroamericana no se cuenta con códigos de aduanas para registrar el comercio internacional de tiburones, productos y/o derivados, dificultando indagar los volúmenes y, por tanto, su impacto sobre las poblaciones locales. Otro inconveniente es la existencia de stocks transfronterizos, migratorios o de alta mar que son compartidos por varias flotas y los datos biológicos son insuficientes para desarrollar adecuadamente investigación y gestión orientada al manejo (Rojas et al., 2000). A pesar de la importancia económica de esta pesquería, los tiburones siguen siendo un grupo desconocido, con información fragmentada, parcial, poco sistematizada y en el mejor de los casos producto de capturas incidentales (Rose, 1996; Rojas et al., 2000; Simpfendorfer, 2008; Camhi et al., 2009). Se trata de una actividad carente de administración y regulación a todo nivel, donde la extracción sigue con poca o escasa supervisión y donde las regulaciones tampoco parecen estar surtiendo el efecto esperado.

Comercio de tiburón en Costa Rica

De acuerdo con Misión Tiburón (www.misiontiburon.org), en aguas costarricenses habitan alrededor de 40 especies de tiburones, siendo las más conocidas y estudiadas las del litoral pacífico (Rojas y Zanella, 2006). Sobresalen por su abundancia los tiburones del género *Mustelus*, conocidos como mamones, le siguen los tiburones picudos (*Nasolamia velox* y *Rhizoprionodon longurio*) y los martillo (*Sphyrna* sp.). El tiburón toro (*Carcharhinus leucas*) es visitante común de las desembocaduras de ríos y ecosistemas de manglares, y el más

frecuente en los ambientes pelágicos es el tiburón sedoso (*Carcharhinus falciformis*), representando cerca del 95% de todas las especies capturadas. (En el cuadro 1 se presenta una lista ampliada de las especies de mayor importancia comercial.)

Cuadro 1. Especies de mayor aporte comercial en Costa Rica (Araya, 2006; Rojas y Zanella, 2006).

Nombre común	Nombre científico
Tiburón gris	<i>Carcharhinus falciformis</i>
Tiburón perro	<i>Carcharhinus longimanus</i>
Tiburón punta negra	<i>Carcharhinus limbatus</i>
Tiburón azul	<i>Prionace glauca</i>
Tiburón tigre	<i>Galeocerdo cuvier</i>
Tiburón cornuda gigante	<i>Sphyrna mokarran</i>
Tiburón cornuda común	<i>Sphyrna lewini</i>
Tiburón cornuda	<i>Sphyrna zygaena</i>
Tiburón zorro o thresher pelágico	<i>Alopias pelagicus</i>
Tiburón zorro ojón	<i>Alopias superciliosus</i>
Tiburón mako o mako real	<i>Isurus oxyrinchus</i>

En Costa Rica, la pesca es dirigida casi exclusivamente al comercio de aletas (Rojas et al., 2000). Lo que fuera una labor artesanal costera es actualmente una pesca de altura, donde la captura ocurre cientos de millas lejos de la costa (Rojas, 1999; Rojas et al., 1999; Arauz et al., 2004; Rojas et al., 2000; Pradepesca, 1999). La práctica del desaleteo sigue estimulada por el alto y creciente precio de las aletas en los mercados de Taiwán, Hong Kong, Japón y Estados Unidos (Araya, 2006; Cajiao, 2006). Aparejadas al incremento del precio de la aleta hay una serie de circunstancias

que han complicado esta actividad: (1) el agotamiento de la pesca tradicional costera (camarones, pargos, corvinas), (2) la evolución y diversificación comercial que ha experimentado la flota nacional palangrera, (3) la exploración y explotación de zonas de pesca cada vez más alejadas de la costa, (4) el creciente mercado y los atractivos internacionales en la comercialización de aletas y (5) los incentivos nacionales a la exportación de productos no tradicionales, entre ellos la aleta de pescado (*cats*, ley 7092) (Rojas et al., 2000; Rojas y Zanella, 2006). Todo lo anterior explica por qué en los últimos años ha surgido una flota pesquera capacitada con las mejores condiciones de independencia, navegación, bodegaje y sistemas de enfriamiento (Porras et al., 1993; Myers & Worm, 2003).

Como si lo anterior fuera poco, las estadísticas de Incopesca, de 1999 a 2009, indican que la pesca de tiburón en ambos litorales disminuyó revelando problemas de disponibilidad, pero inexplicablemente la carne sigue comercializándose como “chatarra” a precio muy bajo y no existe aprovechamiento integral del recurso. Aunque es una actividad que genera millones de dólares, es inviable e insostenible porque no hay suficiente sistematización de la información sobre el producto capturado, las bases de datos sobre flotas, permisos y volúmenes de pesca están desactualizadas, falta normalización de las categorías comerciales que se utilizan en los registros comerciales, hay desconocimiento de la composición específica de las capturas que llegan a los diferentes centros de acopio, no hay definición de políticas específicas para la planificación, conservación y manejo, no existe fiscalización de la extracción, transporte y comercialización y se carece de incentivos para la investigación y generación de una base de datos biológicos que permita categorizar por especies los desembarques nacionales e internacionales (Araya, 2006; Kohin et al., 2006; Rojas y Zanella, 2006).

Finalmente, investigaciones en la zona económica del Pacífico demuestran una disminución del 60% en la abundancia relativa de tiburones entre 1991 y 2001 (Arauz et al., 2004). La adopción del Plan de Acción Internacional para la Conservación y Gestión de los Tiburones (Pan-Tiburones) y la legislación vigente tampoco garantizan su protección (Araya, 2006; Rojas, 2006; Rojas y Zanella, 2006; Segura y Rojas, 2006).

Vulnerabilidad evolutiva

Aunque no hay duda de que los tiburones ejemplifican un grupo exitoso, con alta capacidad de adaptación y una historia de vida que conjuga elementos morfológicos, fisiológicos y etológicos que les han permitido desarrollar supremacía prácticamente en todos los ambientes acuáticos del mundo, son esas mismas características las

que actualmente los convierten en un grupo sumamente frágil y vulnerable a cambios exógenos -como puede ser el cambio climático o la sobrepesca- y a cualquier amenaza de origen antrópico.

Esta condición de vulnerabilidad ha sido magnificada por su misma tabla de vida. Los tiburones son especies estrategas K que se caracterizan por presentar extensos ciclos de vida, prolongada longevidad, poblaciones muy constantes, competencia intra e interespecífica muy intensa, lento desarrollo reproductivo, largos períodos de madurez y gestación, baja fecundidad, frecuencia reproductiva variable, compleja estructura espacial por tamaños y segregación por sexos, y una estrecha relación stock-reclutamiento (Pratt y Casey, 1990; Bonfil, 1994). Como son depredadores primarios con relativamente pocos enemigos naturales, en sistemas no perturbados los tiburones solo necesitan pocas crías que sean capa-



Tiburones martillo, isla del Coco, Costa Rica. Avi Klapfer

ces de llegar a la madurez para poder mantener sus poblaciones estables. Todas estas estrategias reproductivas son apropiadas y exitosas en un medio en el que los principales depredadores son otros tiburones más grandes. Sin embargo, esto también impone límites a la reproductividad que, aunados a la tendencia mostrada por muchas especies de tiburones a agruparse por edades y sexos, vuelven a algunas especies vulnerables a la sobreexplotación (Shotton, 1999). Los tiburones son susceptibles a la sobrepesca, la extinción local y el colapso poblacional; sus poblaciones están amenazadas por la disminución de sus presas y por la destrucción de hábitats marinos esenciales (Fao, 1995, 1996 y 1999).

A diferencia de los peces óseos, los tiburones no tienen plasticidad para asumir cambios (genéticos, fenotípicos, etológicos) para adaptarse con velocidad e intensidad a las alteraciones que el ser humano está imponiendo. Tal como lo indican Fowler (1996) y Frid *et al.* (2007), sus rasgos de historia de vida parecen convertirse en la condición de mayor debilidad frente a las aceleradas modificaciones ecosistémicas que se dan como resultado de la destrucción de ambientes acuáticos, de la contaminación y de la explotación indiscriminada de tiburones y de las presas usadas como alimento. Como lo señala Hall (1996), los tiburones están siendo irremediablemente arrinconados en nichos cada vez más vulnerables, frágiles y geográficamente reducidos. Según Hughes (2000), hay un peso en las evidencias científicas que predice, con un alto grado de certeza, una sobrevivencia muy comprometida para los tiburones. La amplitud de nicho que han gozado por millones de años es cada vez más una condición ecológica difícil de demostrar y de aplicar (Dulvy *et al.*, 2004).

Efectos sistémicos de la remoción de tiburones

Recientemente se ha comenzado a estudiar la función ecológica de los tiburones y su influencia en la estructura de las comunidades ícticas. Se parte del funcionamiento de las redes tróficas en donde los tiburones se desempeñan como controladores de presas y organizadores de los flujos de energía hacia niveles inferiores. Stevens *et al.* (2000) indican que la remoción de depredadores como los tiburones en ecosistemas tropicales está asociada con serias disminuciones de especies de importancia comercial. Musick (1999) documentó uno de los casos mejor conocidos relacionados con la pérdida de abundancia de atunes (*Thunnus* sp.) como consecuencia de la erradicación de tiburones tigre (*Galeocerdo cuvier*), y sostiene que los tiburones mantenían marginadas a las poblaciones de depredadores que afectaban a los atunes.

Aunque es consenso de expertos (Musick, 1997 y 1999; Myers & Worm, 2003) que existen vacíos respecto de los efectos de los depredadores en las redes tróficas oceánicas, con certeza indican que es probable que los taxones top afecten de manera significativa el tamaño poblacional de las especies presa, así como la estructura y composición hacia los niveles tróficos inferiores. La remoción de los tiburones como depredadores apicales de los ecosistemas está vinculado, en primer orden, con una reducción natural de la presión de pesca sobre sus principales presas, así como con una secuencia de desajustes y efectos inesperados de segundo y tercer grado que se dispersan hacia y entre la organización impactada (Simpfendorfer, 2004; Ransom *et al.*, 2007). Estas alteraciones tróficas desatan una serie de consecuencias negativas que desestabilizan las poblaciones interconectadas naturalmente, generando desequilibrios ecosistémicos que se evidencian en la pérdida de resiliencia, conectividad y propagación de especies oportunistas y plagas (Musick, 2004).

En el escenario de eliminación de los tiburones, la capacidad de carga y el reordenamiento de los encadenamientos tróficos son transformaciones esperables, ya que estos depredadores, además de ubicarse cerca o en la cima de las redes tróficas, tienen una abundancia naturalmente limitada a la capacidad de carga del ambiente (Camhi et al., 1998; Ransom et al., 2007). La desaparición de estos condricios vulnerará la estabilidad ecotrófica y la capacidad ecosistémica para recuperarse de disturbios. Si la magnitud del disturbio supera el tiempo de respuesta (en este caso la capacidad de las poblaciones de tiburones de recuperarse) se alterará permanentemente la estabilidad del vecino o la estabilidad local, y entonces el ecosistema bloqueará toda respuesta y será más difícil regresar a su estado original (Frid et al., 2007). Incluso, como lo discute Sergio (2001), la erradicación de tiburones puede superar la estabilidad global y dejar sin efecto la capacidad de que estos peces se recuperen después de grandes disturbios, generando un vacío ecotrófico que tendrá que ser compensado mediante un nuevo flujo de energía, un reordenamiento ecotónico y la imposición de nuevas reglas depredador-presa. En forma semejante, y de acuerdo con lo indicado por Pacala y Kinzig (2002) y Srivastava y Vellend (2005), la eliminación temporal o permanente de tiburones alterará al menos tres funciones específicas de los ecosistemas: complejidad estructural (riqueza de especies y especímenes), reserva de energía (producción de vida en forma de biomasa) y procesamiento de materia (redes de productividad y tasas de descomposición).

Reforzando lo indicado por Hall (1996), por su carácter de especies clave (*keystone species*) y su condición de depredadores apicales, los tiburones tienen pocos enemigos naturales, por lo que su desaparición es sinónimo de devastadoras modificaciones sobre la forma en que se transmite la vida y la sostenibilidad de los océanos en el corto y mediano plazos. Es en ese mismo sentido que Frid et

al. (2007) indican que sin tiburones es predecible el quebranto de la armadura ecosistémica marina y el debilitamiento de todo un eslabón de la cadena alimenticia. Solo algunas poblaciones podrían verse favorecidas por la ausencia de estos depredadores, manifestando explosiones demográficas impresionantes, tan solo para sucumbir ante epidemias o hambrunas. Es indiscutible el colapso ecosistémico, social y económico (Jackson et al. 2001).

Finalmente, la remoción de tiburones no solo generará una serie de consecuencias sobre los ecosistemas sino que además afectará su configuración; los nichos experimentarán una reorientación de sus funciones hacia ensamblajes donde ocurrirán nuevos procesos en torno a la productividad, a la dinámica poblacional y a la abundancia y distribución de especies. En concordancia con lo indicado por Hall (1996) y Hughes (2000) sobre las consecuencias biológicas del calentamiento global, los nuevos ensamblajes serán aprovechados por grupos con ventajas evolutivas impuestas por el cambio climático.

Escenarios de cambio climático e implicaciones sobre los tiburones

El Cuarto Informe de Evaluación presentado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) confirmó varias de las hipótesis anteriores y actualizó con mayores rangos de confianza los pronósticos futuros (IPCC, 2007). Entre otras cosas afirma que la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado hasta las 379 partes por millón (una cifra jamás alcanzada en los últimos 650 mil años de historia del planeta), que han aumentado las concentraciones de metano y óxido nítrico, que el mar está 17 cm por encima de lo que estaba a principios del siglo XX y la temperatura 0,7 °C más arriba que en 1850. Para el caso de Costa Rica los resultados obtenidos se basan en

dos escenarios de emisiones futuras de gases efecto invernadero (A2-ASF y B2-MESSAGE); estos son los que mejor reflejan las condiciones y perspectivas regionales de las principales fuerzas que impulsan las emisiones de tales gases. Todos los modelos coinciden en representar la temperatura en 2020 con anomalías positivas (calentamiento) oscilando entre +0,5 °C y +2,0 °C. En lo que respecta a la precipitación, las anomalías variarían desde -20% (seco) a +35% (muy lluvioso) mostrando una gran variabilidad en las tendencias futuras (DCC- Minaet, 2011).

Estas afectaciones nacionales se acoplarán con predicciones mundiales sobre aumento del nivel del mar por derretimiento de los polos, daños físicos y ecológicos sobre los sistemas costeros, inundaciones, pérdida de humedales, erosión, intrusión de agua salada y aumento en los niveles freáticos (Bernal, 1993; Teng, 2005; Nerem et al., 2006). La temperatura del agua de mar se elevará alterando los regímenes de precipitación, la trayectoria, la frecuencia y la intensidad de las tormentas y los eventos de El Niño y La Niña. En las zonas tropicales las aguas más calientes causarán decoloración de corales y migración de especies costeras hacia latitudes más altas, afectando los hábitats marinos esenciales que los tiburones costeros utilizan como zonas de crianza,



Tiburones, isla del Coco, Costa Rica. Avi Klapfer

alimentación, reproducción o refugio (Baker et al., 2004). Todas estas alteraciones serán trasladadas hacia las cohortes que viven en aguas abiertas, modificando las relaciones ecológicas de las especies con hábitats pelágicos como los condrictios que residen en el domo de Costa Rica, la dorsal oceánica de Cocos y la fosa oceánica mesoamericana (Brenes, 2000).

Todo el mar patrimonial de Costa Rica se verá afectado y es predecible que las aguas superficiales tropicales, que normalmente presentan temperaturas superiores a los 25 °C y salinidades bajas, se calienten más. Los eventos de “lenguas frías” que se extienden hasta 500 km afuera de la costa (Brenes et al., 2003) dejarán de distribuir aguas de menor temperatura sobre el golfo de Papagayo y se bloquearán los afloramientos que permiten el enriquecimiento de sales nutritivas y productividad primaria. También se afectarán las tasas de biomasa (en forma de larvas, juveniles y adultos) asociadas con las surgencias del domo térmico de Costa Rica y el sustento de las poblaciones de tiburones pelágicos en estas áreas. La elevación de la temperatura del agua del mar se convertirá en un vehículo propagador de una cadena de impactos que vulnerarán irremediablemente a estos condrictios.

Vulnerabilidad climática mundial: amenazas de megaescala

De acuerdo con el IPCC (McCarthy et al., 2001), la vulnerabilidad climática es “el grado en el que un sistema es susceptible o incapaz de enfrentarse a efectos adversos del cambio climático”. El concepto es esencial para interpretar las implicaciones y amenazas que hay sobre los tiburones debido al aumento en la temperatura del agua y las modificaciones de otros parámetros físico-químicos (gases, corrientes y mareas). De acuerdo con lo indicado por Smith & Pilifosova

(2003) y Smith & Vandel (2006), la vulnerabilidad climática tiene al menos tres ejes de interés en esta investigación: exposición (aumentos de temperatura, cambios de salinidad, gases), sensibilidad (afectación de un sistema trófico, cambios en la distribución de especies) y capacidad de adaptación (plasticidad fenotípica, migración o aclimatación) (Hughes, 2000).

Para los tiburones son críticas las consecuencias que se derivarán del cambio climático asociado al aumento de temperatura. La condición de estrategias K inactiva mecanismos de respuesta rápida para enfrentar alteraciones producidas por el calentamiento planetario. En ese mismo sentido Gitay et al. (2002) y Julius & West (2008) concluyen que la capacidad adaptativa y evolutiva de estos peces es insuficiente para los cambios previstos y proponen tres posibles escenarios: (1) moverse hacia nuevos ámbitos de distribución, (2) mantenerse en el mismo lugar, acelerando transformaciones fenotípicas mediante plasticidad genética y (3) resistir extinciones locales en algunas poblaciones disyuntas. El incremento de décimas de grado en la temperatura atmosférica no solo hará más calientes los océanos sino que causará cambios radicales en las propiedades físicas y químicas, empujando los ecosistemas hacia transformaciones en la forma en que se procesa y fluye la energía desde los niveles tróficos productores hasta los consumidores primarios y viceversa. Es esperable un reordenamiento jerárquico que impactará la actual posición de los tiburones (McCarthy, 2001; Smith & Pilifosova, 2003; Ramson et al., 2007).

Otra consecuencia será las perturbaciones sobre las corrientes marinas, ya que desde el punto de vista oceanográfico los patrones de circulación oceánica superficial dependen de los vientos que soplan sobre las capas superiores, de los flujos de calor y de la rotación del sol y la luna (Rahmstorf, 2002). Los movimientos de aguas profundas y la circulación termohalina están supeditados a la transmisión de calor y gradientes de salini-

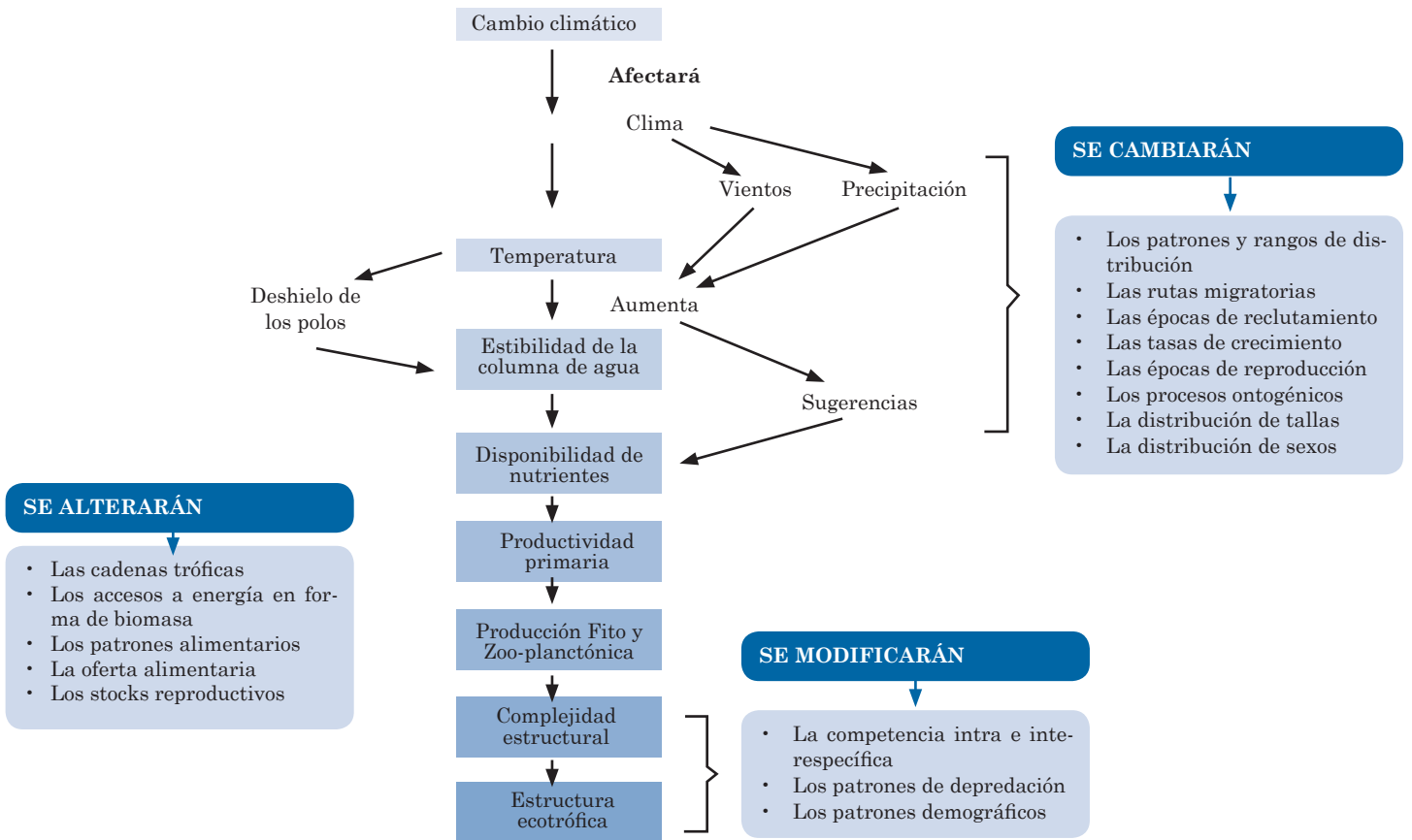
dad a lo largo de la columna de agua (Rahmstorf, 2003). Ante escenarios de cambio climático se espera alteraciones en toda esta dinámica de transferencia de energía y nutrientes y en la estructura y función de las cadenas tróficas de las que dependen los tiburones.

Si las corrientes marinas se alteran, el mar podría estratificarse permanentemente conformando un bloque de agua capaz de separar stocks poblacionales de especies con poblaciones cosmopolitas o disyuntas, e incluso impedir la migración latitudinal de peces que usan las corrientes superficiales y profundas como carreteras y vías marinas utilizadas por los tiburones para su dispersión hacia nichos fundamentales de su ciclo de vida. Un bloqueo modificaría la capacidad de comportarse como especies transzonales altamente migratorias que dependen de rutas preestablecidas para el cumplimiento de etapas críticas en su desarrollo. Aguas estratificadas podrían generar señales erróneas sobre los tiempos de reproducción y/o migración o bien el debilitamiento de la cadena trófica por reducción de la productividad primaria como consecuencia de un incremento en la frecuencia de El Niño y/o intrusiones de agua del Pacífico Occidental hacia el Pacífico Oriental (Timmermann et al., 1999). Aguas más calientes afectarán la solubilidad del CO₂ y es posible que se reduzca el pH. La acidificación afectará la sobrevivencia de larvas de peces, moluscos y crustáceos, así como las poblaciones naturales de tiburones, incluso de especies que están adaptadas a ambientes estables, como los tiburones bati-pelágicos (Martín & Treberg, 2010). Finalmente, una mayor temperatura en el agua cambiará los sistemas biogeoquímicos encargados de la transformación de nutrientes para las cadenas tróficas (Bernal, 1993). (En cuadro 2 y figura 1 se exponen otros ejemplos de cómo el cambio climático es el agente directo de la modificación de condiciones físicas, químicas y bióticas que impactarán directamente a los tiburones.)

Cuadro 2. Algunas implicaciones del cambio climático sobre los tiburones.

Parámetros asociados con el cambio climático	Explicación/consecuencia/alteraciones	Implicaciones proyectadas para los tiburones	Fuente
Altas concentraciones de CO ₂ .	<p>Se alterará la química del carbonato y los procesos biológicos fundamentales del mar.</p> <p>Se reducirá el pH y bajará el estado de saturación de los minerales carbonatados como la calcita y aragonita.</p>	<p>Alteración de la cadena alimenticia, acceso a nichos alimentarios, más gasto energético en busca de comida.</p> <p>Estos minerales son utilizados para construir arrecifes de coral y el exoesqueleto de muchas especies de fito y zooplancton que son consumidas por peces que forman parte de la dieta de los tiburones costeros tropicales.</p>	Bernal, 1993; Kleypas et al., 2006; Hitz & Smith, 2004.
Impacto directo sobre el ambiente marino.	Se modificará la dinámica natural de los ecosistemas marino-costeros.	Cambios en los patrones y rangos de distribución, reclutamiento, tasas de crecimiento y épocas de reproducción.	
Modificación de los patrones de vientos y tormentas.	El debilitamiento de los vientos y el aumento de tormentas alterarán el flujo y distribución de energía en aguas superficiales, así como las surgencias de nutrientes que mantienen afloramientos como el domo térmico de Costa Rica.	Los centros de alimentación son modificados, hay un gasto energético extra en búsqueda de comida. Los patrones ictiogeográficos cambian con respecto a rutas de migración y dispersión.	Hughes, 2000; IPCC, 2007; Julius & West, 2008.
Aumento del nivel del mar.	Alterará hábitats marinos esenciales.	Pérdida de zonas sensibles para el apareamiento, reproducción y en general la ontogenia de tiburones.	McCarthy et al., 2001; IPCC, 2007.
Reducción de la productividad primaria.	Modificará de las fuentes de energía marina.	Se alteran las cadenas tróficas que transforman la energía (en forma de biomasa) que requieren los tiburones.	
Cambios en el reclutamiento y stocks poblacionales.	Habrán cambios en los patrones demográficos.	Cambian los patrones sociales, distribución por tallas, edades y sexos. Como consecuencia el acceso a hembras viables y eventos de apareo también se modifican.	Soto, 2002; Martin & Treberg, 2002; Rahmstorf, 2002, 2003; Nerem et al. 2006; Smith & Wandel, 2006.
Reducción de las pesquerías.	Se reducirá la captura por unidad de esfuerzo.	Es previsible un aumento en la densidad y esfuerzo de pesca e innovación en la aplicación de nuevas tecnologías de captura.	

Figura 1



Conclusión

En la última década, quizás con mayor celeridad y claridad, se ha generado una carga de prueba que confirma las modificaciones climáticas de megascale que están ocurriendo en el planeta producto del calentamiento global, y despeja las dudas sobre las alteraciones ecosistémicas que los grandes depredadores, como los tiburones, están experimentando. Particularmente, hay consenso mundial en que los ecosistemas acuáticos siguen siendo irremediablemente empujados hacia condiciones de inestabilidad y funcionamiento muy cerca o en el límite de la capacidad de resiliencia,

modificando sus procesos biogénicos y dinámica en la forma de producir y distribuir energía.

Literalmente, el aumento de temperatura global es considerado como la fuerza más clara, determinante e influyente que está ejerciendo sobre los ambientes acuáticos una presión exógena creciente de proporciones inimaginables, y la inestabilidad ecosistémica es el denominador común que mejor define la situación en la que actualmente viven los tiburones. No hay duda de que la Tierra ha entrado en una nueva era, la del cambio climático, en que las concentraciones de CO₂ en el mar están provocando cambios desde el nivel micro, con la interrupción de la asimilación de carbonatos y silicios por parte de especies

carbono-dependientes, hasta el nivel macro, como ocurre con la alteración de las cadenas tróficas, corrientes y grandes masas de agua marina.

¿Qué es lo predecible para los tiburones? Aunque se requiere un mayor nivel de detalle en las evidencias y profundidad en los estudios, los expertos señalan que a pesar de las modificaciones evolutivas que les han capacitado para permanecer por millones de años, estos condricios tienen escasas defensas ante los embates del cambio climático. Los tiburones son tremendamente vulnerables, su estrategia de vida no tiene mecanismos de respuesta temprana que les permitan evadir los cambios ecosistémicos que están transformando irremediabilmente sus nichos. Serán desplazados porque no son lo suficientemente efectivos para combatir a un enemigo prácticamente invisible. Las ámpulas de Lorenzini, la línea lateral, el olfato y las modificaciones morfofisiológicas y etológicas resultan poco útiles para enfrentar los impactos que genera el aumento de la temperatura global. La velocidad del cambio en las condiciones físico-químicas del agua superan las reacciones de estos elasmobranquios.

Al igual que lo hicieron hace millones de años en que fue necesario cambiar de alimentación mediante la liberación de los arcos mandibulares, a los tiburones les espera un período de transformaciones adaptativas en la forma de obtener alimento, reproducirse y dispersarse.

¿Qué podemos hacer? Reforzar todas las iniciativas nacionales, regionales y mundiales para reducir la emisión de gases de efecto invernadero y enfocarnos en las actividades humanas que afectan directamente el ambiente marino, en específico todas las formas de contaminación acuática, sedimentación, control del crecimiento demográfico en zonas costeras, mortalidad por pesca debida al uso de artes de pesca prohibidos y desaleteo. Relacionado con los ambientes marinos será importante proteger y restaurar hábitats esenciales (arrecifes coralinos, manglares, estuarios) y mejo-



Tiburones, isla del Coco, Costa Rica. Avi Klapfer

rar el conocimiento sobre aspectos demográficos y patrones de dispersión. La permanencia de los tiburones en la Tierra está comprometida, su continuidad dependerá de la velocidad con que logren adaptarse, de lo contrario la evolución seguirá su rumbo.

Referencias bibliográficas

- Arauz, R. (2002). *La pesca del tiburón en Costa Rica*. Programa de restauración de la tortuga marina. (Pretoma). Wildaid.
- Arauz, R., Cohen, Y., Ballesterero, J., Bolaños, A. y Pérez, M. (2004). Decline of Shark Populations in the Exclusive Economic Zone of Costa Rica. *International Sympo-*



Tiburones, isla del Coco, Costa Rica. Avi Klapfer

- sium on Marine Biological Indicators for Fisheries Management*. Unesco, Fao. Paris.
- Araya, H. Análisis de la pesquería del tiburón en el Pacífico de Costa Rica. En: Rojas M., R. & I. Zanella (eds). (2006). Primer seminario taller “*El estado del conocimiento de la condrictiofauna de Costa Rica*”. Inbio, Costa Rica.
- Baker, A., Starger, C., McClanahan, J. y Glynn, P. Corals’ adaptive response to climate change. *Nature* 430, 2004.
- Baum, J., Myers, R., Kehler, D., Worm, B., Harley, S. y Doherty, P. Collapse and Conservation of Shark Populations in the Northwest Atlantic. *Science* 299, 2003.
- Bernal, P. A. Global climate change in the oceans: a review. En: Mooney, H. A., Fuentes, E. R., Kronberg, B. I. (eds). (1993). *Earth System Responses to Global Change: Contrast between North and South America*, San Diego, USA.
- Bonfil, R. (1994). *Overview of world elasmobranch fisheries*. *FAO Fisheries Technical Paper 341*. Rome.
- Brenes, C., Hernández, A. y Campos, J. Distribución espacial de capturas de tiburón en el pacífico nicaragüense y su relación con algunas variables oceanográficas. *Rev. Biol. Trop.*, 48, 2000.
- Brenes, C., Coen, E., Chelton, D., Enfield, D., León, S. y Ballesteros, D. Wind driven upwelling in the Gulf of Nicoya, Costa Rica. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 2003.
- Cajiao, M. V. (2006). *Diagnóstico legal de la problemática de aleteo de tiburón en Centroamérica*. Asociación Mar-Viva.
- Camhi, M., Valenti, S., Fordham, S., Fowler, S. y Gibson, C. (2009). *The Conservation Status of Pelagic Sharks and Rays: Report of the IUCN Shark Specialist Group Pelagic Shark Red List Workshop*. UK.
- Cites. (2011). *Lista de especies 2011*. PNUMA Centro de Monitoreo de la Conservación Mundial. Secretaría Cites, Ginebra.
- Compagno, L. Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. *FAO Fish Synop.* 125, 1984.
- Compagno, L. Pelagic elasmobranch diversity. En: Camhi, M., E. K. Pikitch y E. A. Babcock (eds). (2008). *Sharks of the Open Ocean: Biology, Fisheries and Conservation*. Blackwell Publishing, Oxford.
- DCC, Minaet. (2011). Dirección de Cambio Climático. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Informe Técnico
- Dulvy, N., Ellis, J., Goodwin, N., Grant, A., Reynolds, J. y Jennings, S. Methods of assessing extinction risk in marine fishes, en *Fish Fish.* 5, 2004.
- Dulvy, N., J. Baum, K. Clarke, L. Compagno, E. Cortés, A. Domingo, S. Fordham, S. Fowler, P. Francis, C. Gibson, J. Martínez, J. Musick, A. Soldo, J. Stevens y S. Valenti. You can swim but you can’t hide: The global

- status and conservation of oceanic pelagic sharks and rays. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems* 18, 2008.
- Dulvy, N., K., Metcalfe, J. Glanville, J. Pawson, M. y J. Reynolds. Fishery stability, local extinctions and shifts in community structure in skates. *Conservation Biology* 14, 2000.
- Fao. (1995). *Code of conduct for responsible fisheries*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Fao. (1996). *Precautionary approach to capture fisheries and species introductions. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries 2*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Fao. (1999). *Indicators for sustainable development of marine capture fisheries. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Fowler, S. Red list assessments for sharks and rays. *Shark News. Newsletter of the IUCN Shark Specialist Group* 8, 1996.
- Frid, A., G. Baker y L. Dill. Do shark declines create fear-released systems? *Oikos* 1-13, 2007.
- Gitay, H., A. Suarez y R. Watson (Eds.). (2002). *Climate Change and Biodiversity*. IPCC Technical Paper.
- Hall, M. On bycatches. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 6, 1996.
- Hitz, S. & J. Smith. Estimating global impacts from climate change. *Glob. Environ. Change-Human Policy Dynamics*, 14, 2004.
- Hughes, L. Biological consequences of global warming: is the signal already. *Tree* 15: 2000.
- IPCC. (2007). *Cuarto informe de evaluación: Cambio Climático 2007. Informe técnico*.
- Julius, S. H. y J. M. West. (2008). *Preliminary Review of Adaptation Options for Climate-sensitive Ecosystems and Resources. (Report by the US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research)*. Washington.
- Kleypas, J. A., R. A. Feely, V. J. Fabry, C. Langdon, C. L. Sabine y L. L. Robbins. (2006). *Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a Workshop held 18–20 April 2005, St. Petersburg, FL*
- Kohin, S., R. Arauz, D. Holts y R. Vetter. Preliminary results: behavior and habitat preferences of silky sharks (*Carcharhinus falciformis*) and a big eye thresher shark (*Alopias superciliosus*) tagged in the eastern tropical Pacific. En: Rojas M., R. & I. Zanella (eds.). (2006). *Primer seminario taller "El estado del conocimiento de la condriectiofauna de Costa Rica"*. Inbio. Costa Rica.
- Martin, R. A. y J. Treberg. (2002). *Biology of Deep-Sea Sharks: a Review. International Congress on the Biology of Fish*. Vancouver, 2002.
- McCarthy, J. J., O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken, y K. S. White. (2001). *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge.
- Musick, J. (ed.). (1999). *Life in the Slow Lane: Ecology and Conservation of Long-Lived Marine Animals. American Fisheries Society Symposium 23, 1999*.
- Musick, J. A. & Bonfil, R. (eds). Management techniques for elasmobranch fisheries. *Fisheries Technical Paper* 474, 2005. Rome.
- Musick, J. A. Stocks at risk. *Fisheries* 22, 1997.
- Myers, R., y B. Worm. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* 423, 2003.
- Nerem, R. S., E. Leuliette, y A. Cazenave. Present-day sea-level change: A review. *Comptes Rendus Geoscience* 338, 2006.
- Pacala, S y A. P. Kinzig. Introduction to theory and the common ecosystem model. En: Kinzig, Myers, R. & B. Worm. (2003). Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* 423, 2002.
- Porrás, O., A. Seko y K. Miyamoto. *Extracción científica y comercialización de las especies pelágicas existentes en la Zona Económica Exclusiva del Pacífico de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica. Imprenta Acosta. 1993.
- Pradepesca. *Diagnóstico de la pesca de tiburón en Centroamérica*. San José, Costa Rica. 1999.
- Pratt, H. L. y J. G. Casey. Shark reproductive strategies as limiting factors in directed fisheries, with a review of Holden's method of estimating growth parameters. En Pratt, H., S. H. Gruber and T. Taniuchi (eds.). (1990). *Elasmobranchs as Living Resources: Advances in the Biology, Ecology, Systematics, and Status of the Fisheries*. NOAA Tech. Rep. 90, USA.
- Rahmstorf, S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419, 2002.
- Rahmstorf, S. Thermohaline circulation: The current climate. *Nature* 421, 2003.
- Ransom A., J. Baum, T. Shepherd, S. Powers y C. Peterson. Cascading Effects of the Loss of Apex Predatory Sharks from a Coastal Ocean. *Science*, 315, 2007.
- Rojas, R., J. Campos, A. Segura, M. Mug, R. Campos y O. Rodríguez. Shark fisheries in Central America: A Review and Update. *Uniciencia* 17, 2000.
- Rojas, R. (2006). Reproducción y alimentación del tiburón enano *Mustelus dorsalis* (Pisces: Triakidae) en el golfo de Nicoya, Costa Rica: elementos para un manejo sostenible. En: Rojas M. & I. Zanella (eds.). (2006).

- Primer seminario taller "El estado del conocimiento de la condriciofauna de Costa Rica". Inbio. Costa Rica
- Rojas, R. *Diagnóstico de la pesca del tiburón en Centro América*. PRADEPESCA & INRECOSMAR. Aspectos socioeconómicos. 1999.
- Rojas, R. y Zanella, I. 2006. *Memoria: primer seminario taller sobre el estado del conocimiento de la condriciofauna de Costa Rica*. INBIO.
- Rojas, R., J. Campos; M. Mug y A. Segura. (1999). *Diagnóstico de la Pesca de Tiburón en Centroamérica*, en Memorias XX Años de Investigación: Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología CIMAR 1979-1999. Universidad de Costa Rica, San José.
- Rose, D. (1996). *An Overview of World Trade in Sharks and Other Cartilaginous Fishes*. TRAFFIC International, Cambridge.
- Segura, A. y Rojas, C. (2006). El aporte del sistema de rencias pesqueras al ordenamiento de los desembarques de tiburón en Costa Rica. En: Rojas M., R. & I. Zanella (eds). (2006). *Primer seminario taller "El estado del conocimiento de la condriciofauna de Costa Rica"*. INBIO, Costa Rica
- Sergio, F., I. Newton, L. Marchesi y P. Pedrini. Ecological justified charisma: preservation of top predators delivers biodiversity conservation. *Journal of Applied Ecology* 43, 2006.
- Shotton, R. (ed.). (1999). Case studies of management of elasmobranch fisheries. FAO Fisheries Technical Paper 378. 920 pp. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome.
- Simpfendorfer, C., E. Cortés, M. Heupel, E. Brooks, E. Babcock, J. Baum, R. McAuley, S. Dudley, J. Stevens, S. Fordham, y A. Soldo. An integrated approach to determining the risk of overexploitation for data-poor pelagic Atlantic sharks, en *ICCAT* 140, 2008.
- Simpfendorfer, C. y Heupel, M. Assessing habitat use and movement. En: Carrier, J., J. Musick y M. Heithaus (eds.) (2004). *Biology of Sharks and their Relatives*. Boca Raton.
- Smith, B. y Wandel, J. Adaptation, adaptive capacity, and vulnerability. *Global Environmental Change* 16, 2006.
- Smith, B. y Pilifosova, O. From adaptation to adaptive capacity and vulnerability reduction. En: McCarthy, J., O. Canziana, N. Leary, Dokken, D. and White, K. (eds.) (2003). *Climate Change, Adaptive Capacity and Development*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Soto, C. The potential impacts of global climate change on marine protected areas. *Rev. Fish Biol. Fish.* 11, 2002.
- Srivastava, D. S. y Vellend, M. Biodiversity-Ecosystem Function Research: Is It Relevant for Conservation? *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 36, 2005.
- Stevens, J. D., Bonfil, R., Dulvy, N. y Walker, P. The effects of fishing on sharks, rays, and chimaeras (chondrichthyans), and the implications for marine ecosystems. *ICES Journal of Marine Science* 57, 2000.
- Teng, W. How much more global warming and sea level rise? *Science* 307, 2005.
- Timmermann, A., Latif, M., Bacher, A., Oberhuber, J. y Roeckner, E. Increased El Nino frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature* 398, 1996.
- Zarate P. y Hearn, A. (2008). *Conservation Status of Sharks in Nicaragua, Costa Rica, Panama, Colombia and Ecuador*. Consultancy by the Charles Darwin Foundation for IUCN. Santa Cruz, Galápagos, Ecuador.