

Shark breeding grounds and seasons in the Gulf of California: Fishery management and conservation strategy

Zonas y temporadas de reproducción y crianza de tiburones en el Golfo de California: Estrategia para su conservación y manejo pesquero

CA Salomón-Aguilar*, CJ Villavicencio-Garayzar, H Reyes-Bonilla

Departamento de Biología Marina, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Apartado postal 19-B, La Paz, CP 23080, Baja California Sur, México. * E-mail: csalomon@uabcs.mx

Abstract

Sharks show high biological fragility and, given the intense fishing regimes to which they are exposed in the Gulf of California, it is necessary to establish a conservation and management strategy providing for the protection of their nursery areas. We reviewed the literature concerning shark reproductive biology to determine priority management areas in the Gulf of California by complementarity analysis and different selection criteria. Four levels of management and conservation priority were determined for six quadrants: level 1 corresponded to the area off Mazatlán (Sinaloa) and the area of El Sargento, La Ventana, and Punta Arenas (Baja California Sur); level 2 to the areas of Teacapán (Sinaloa) and Seri (Sonora); level 3 to the areas of San Francisquito-El Barril (Baja California) and Kino Bay (Sonora); and level 4 to the area of La Manga (Sonora). Analysis of space-time variables in a geographic information system indicated that 71% of the commercially important shark species concentrate in coastal zones, mainly in bays, coastal lagoons, estuaries, and wetlands (central and southern Gulf of California) during spring and summer (May–August), except for *Prionace glauca*, *Isurus oxyrinchus*, *Alopias pelagicus*, and *Squatina californica* that reproduce in winter and spring. The protection of recruitment areas (critical habitats) during peak breeding periods should be an essential part of any resource management plan.

Key words: neonates, mating, recruitment, nursery area, gravid females.

Resumen

Los tiburones presentan gran fragilidad biológica y debido a los intensos regímenes de pesca a los que están expuestos en el Golfo de California es necesario establecer una estrategia de manejo y conservación que contemple la protección de sus zonas de crianza. Se realizó una revisión de literatura existente en relación a la biología reproductiva de los tiburones para localizar áreas prioritarias de manejo en el Golfo de California mediante análisis de complementariedad y diversos criterios de selección. Se encontraron seis cuadrantes en cuatro niveles de prioridad de manejo: el nivel 1 incluyó la zona adyacente a Mazatlán (Sinaloa) y el área de El Sargento, La Ventana y Punta Arenas (Baja California Sur); el nivel 2 las zonas de Teacapán, (Sinaloa) y seri (Sonora); el nivel 3 las zonas de San Francisquito-El Barril (Baja California) y Bahía Kino (Sonora); y el nivel 4 la zona de La Manga (Sonora). El análisis de las variables espacio-tiempo en un sistema de información geográfica indicó que 71% de las especies de tiburones de importancia comercial se concentra en la zona costera, principalmente en bahías, lagunas costeras, estuarios y marismas (regiones central y sur del Golfo de California) durante la temporada primavera-verano (mayo a agosto), excepto *Prionace glauca*, *Isurus oxyrinchus*, *Alopias pelagicus* y *Squatina californica*, que se reproducen en invierno y primavera. La protección de estas áreas críticas de reclutamiento (hábitats críticos) en las temporadas de máxima reproducción y crianza debe ser parte fundamental del plan de manejo del recurso.

Palabras clave: neonatos, apareamiento, reclutamiento, área de crianza, hembras grávidas.

Introduction

Sharks are susceptible to overfishing because of their low reproductive potential, small number of offspring, long gestation period, slow growth, and late sexual maturity (Walker 1992, Castro 1993). Moreover, factors like an increase in fishing effort and degradation of important nursery grounds in coastal, estuarine, and fresh-water habitats contribute to a decrease in populations (Camhi *et al.* 1998, Stone *et al.* 1998). Shark mating and nursery grounds are thus considered critical habitats of the utmost importance to maintain continuity of

Introducción

Los tiburones son un recurso pesquero vulnerable y susceptible a la sobrepesca dado que se caracterizan por un bajo potencial reproductivo, un reducido número de crías, tienen periodos de gestación largos y crecimiento lento, y requieren de un periodo largo para alcanzar la madurez sexual (Walker 1992, Castro 1993). Además, factores como el incremento en el esfuerzo pesquero y la degradación de importantes sitios de crianza en hábitats costeros, estuarinos y de agua dulce, propician que las poblaciones disminuyan (Camhi *et al.* 1998, Stone

recruitment (SEMARNAP 2000a, Anislado and Robinson 2001, Heupel and Simpfendorfer 2002, Heupel *et al.* 2007).

Nursery grounds are geographically discrete locations in the spatial distribution range of a species, where gravid females expel their young or lay their eggs, and where juveniles spend their first weeks, months or years of life (Castro 1993). Adults congregate for reproduction at mating grounds, which do not necessarily coincide with the nursery areas (Hanchet 1988, Castro 1993). The migration of sharks to shallow waters is a prevalent behaviour, since there are records of nurseries in fossilized marine communities of more than 320 million years (Lund 1990).

Several studies have been conducted on shark nurseries. Based on the presence of gravid females with embryos in late stages of development, neonates, and young individuals, Castro (1993) determined that Bulls Bay, South Carolina (USA), serves as a nursery ground for nine shark species in spring and summer, that waters off southern Florida and the Bahamas are used as nurseries by *Negaprion brevirostris*, and that the lagoons on the east coast of Florida are the main nursery grounds for *Carcharhinus leucas*. Simpfendorfer and Milward (1993) examined the catch composition and diets of members of the families Carcharhinidae and Sphyrnidae in Cleveland Bay, Australia, and found that the length of time young individuals remain in the nursery areas depends on the abundance of prey. Heupel and Simpfendorfer (2002) estimated fishing and natural mortality rates using telemetry data for *Carcharhinus limbatus* juveniles and concluded that they are more vulnerable whilst they remain in nursery areas.

Priority management areas (marine reserves) are Marine Protected Areas (MPAs) or no-take zones designed under the principle of connectivity. They contribute to the recovery of stocks, conservation of breeding grounds, increased catch in adjacent areas, reduced overfishing of vulnerable species, and tourism-related economic benefits (FCRR 1997, Bonfil 1999, Dahlgren and Sobel 2000, Roberts *et al.* 2001). Some of the disadvantages of using MPAs as a fishery management tool are: fishing effort directed toward smaller portions of the stock, conflicts among different fisheries, and community resistance to their implementation. Regarding sharks in particular, there are two aspects that complicate the implementation of MPAs: their limited effectiveness in the case of highly migratory species and the difficulty of protecting habitats for all life stages (FCRR 1997, Bonfil 1999).

Three types of MPAs have been established for sharks worldwide. The first are the informal MPAs, designed by government legislation for the protection of species vulnerable to overexploitation in waters under a country's jurisdiction; for example, those established for *Carcharodon carcharias*, *Rhincodon typus*, *Cetorhinus maximus*, *Carcharias taurus*, *Odontaspis noronhai*, and *Pristiophorus schroederi* in the United States, Australia, and other countries. The second are the official or formal MPAs designed to protect species for ecological purposes; there are only two examples of this type: 15 sites in the Maldives for *Carcharhinus amblyrhynchos* and

et al. 1998). Por lo anterior, se reconoce que sus áreas de reproducción y crianza son hábitats críticos de vital importancia para mantener la continuidad del reclutamiento (SEMARNAP 2000a, Anislado y Robinson 2001, Heupel y Simpfendorfer 2002, Heupel *et al.* 2007).

Las áreas de crianza son zonas geográficamente discretas en el rango de distribución espacial de una especie donde las hembras grávidas expulsan a sus crías o depositan sus huevos, y donde los jóvenes pasan sus primeras semanas, meses o años de vida (Castro 1993). En las zonas de reproducción los adultos se congregan para aparearse y éstas no necesariamente coinciden con las áreas de crianza (Hanchet 1988, Castro 1993). La migración de tiburones a aguas someras es un comportamiento prevalente, ya que existen registros de áreas de crianza en comunidades marinas fosilizadas de hace más de 320 millones de años (Lund 1990).

Se han realizado diversos trabajos relacionados con las áreas de crianza de tiburones. Castro (1993) determinó, mediante la presencia de hembras grávidas con embriones próximos a la expulsión, neonatos y jóvenes, que Bahía Bulls, en la parte sur de Carolina, EUA, es área de crianza para nueve especies en primavera y verano; mientras que la región del sur de Florida y las Bahamas es utilizada con los mismos fines por *Negaprion brevirostris*, y las lagunas de la costa oriental de Florida son las principales áreas de crianza para *Carcharhinus leucas*. Simpfendorfer y Milward (1993) examinaron la composición de capturas y dietas de integrantes de la familia Carcharhinidae y Sphyrnidae en la Bahía de Cleveland, Australia, y encontraron que la permanencia de individuos jóvenes en las áreas de crianza depende de la abundancia de las presas. Heupel y Simpfendorfer (2002) estimaron las tasas de mortalidad natural y por pesca usando datos de telemetría de los jóvenes de *Carcharhinus limbatus* y concluyeron que éstos son más vulnerables durante su permanencia en áreas de crianza.

Las zonas prioritarias de manejo (reservas marinas) son áreas marinas protegidas (AMPs) o de no pesca diseñadas bajo el principio de conectividad, que aportan beneficios como la recuperación de stocks, conservación de los sitios de congregaciones reproductivas y de reclutamiento, incremento de las capturas en áreas contiguas, disminución de la sobrepesca de especies vulnerables y mejoramiento económico a través del turismo (FCRR 1997, Bonfil 1999, Dahlgren y Sobel 2000, Roberts *et al.* 2001). Algunas de las desventajas del uso de AMPs como herramienta de manejo pesquero son: la concentración del esfuerzo pesquero en porciones más pequeñas del stock, beneficios económicos pesqueros evidentes a largo plazo, conflictos entre diversas pesquerías, resistencia de la comunidad a su implementación y para los tiburones en particular existen dos aspectos que complican la aplicación de las AMPs, su limitada utilidad con especies altamente migratorias y la dificultad de incluir hábitats donde estén representados todos los estadios de vida (FCRR 1997, Bonfil 1999).

A nivel mundial las AMPs establecidas para tiburones son de tres tipos. El primero son las AMPs informales, diseñadas

Dry Tortugas, Florida, where *Ginglymostoma cirratum* is protected during its breeding season (May–August). The third are the no-take zones (marine reserves) used as fishery management tools; before 1999 only one existed in Australia to protect the breeding stocks of *Carcharhinus obscurus*, *C. plumbeus*, *Galeorhinus galeus*, and *Mustelus antarcticus*, but in the past few years they have been implemented in the United States for dusky, sandbar, and night sharks, and in India for nine shark species (Bonfil 1999, ICSF 2001). With regard to Mexico, Official Mexican Norm NOM-029-PESC-2006 establishes ten refuge areas to protect shark and ray mating and/or birthing grounds during June of each year, three of which are found in the Gulf of California; however, closed seasons and sites are not specified due to the lack of information regarding breeding grounds and seasons (Alejo-Plata *et al.* 2007, SAGARPA 2007a).

Total shark production in the Gulf of California in 2006 was 12,089 t, representing 67% of the Mexican Pacific production, with a value of \$122,933 thousands of Mexican pesos (SAGARPA 2006). Unfortunately, 50% of the landings of commercially important species in this region consist of immature organisms or gravid females (Madrid *et al.* 1997, SAGARPA 2007a), so identifying shark breeding areas is essential to be able to protect them from apparent overfishing (Camhi *et al.* 1998, Anislado and Robinson 2001). This study thus aimed to detect shark mating and nursery grounds in the Gulf of California and identify the seasons when they are most used. This information was used together with a series of basic attributes of different shark species to propose potential priority management areas.

It is important to note that using MPAs as a fishery conservation and management strategy is complicated due to historical misconceptions regarding the concept of shark nurseries and to the lack of standardized criteria for their identification (Heithaus 2007, Heupel *et al.* 2007). Since most authors agree that these areas benefit young individuals because they provide protection against predators and have high food availability, these are considered the main criteria for their identification (Springer 1967, Bass 1978, Branstetter 1990). The concept has currently been broadened and improved and the possibility of defining nursery grounds based on three quantitative criteria for organisms less than one year old has been proposed: (1) sharks are more commonly found in this area than in others, (2) individuals tend to remain or return for long periods (weeks or months), and (3) the habitat is used repeatedly over the years. Using this perspective and considering life-history characteristics of the species (birth size, growth rate, age at first maturity, size structure of gravid females and neonates) simplifies the process of selecting these areas by a more rigorous scheme (Heupel *et al.* 2007, Kinney and Simpfendorfer 2009). There are few numerical records of gravid females and neonates in the Gulf of California, and the information found in the literature is often anecdotal due to the absence of a clear theoretical framework regarding all the data that should be recorded and documented to study the reproductive biology of

mediante la legislación de los gobiernos para la protección de algunas especies vulnerables a sobreexplotación en aguas de su jurisdicción; por ejemplo, las establecidas para *Carcharodon carcharias*, *Rhincodon typus*, *Cetorhinus maximus*, *Carcharias taurus*, *Odontaspis noronhai* y *Pristiophorus schroederi* en EUA, Australia y otros países. Después están las AMPs oficiales o formales, que tienen como propósito proteger especies con fines ecológicos, y de las cuales existen solamente dos ejemplos: 15 sitios de las Maldivas para *Carcharhinus amblyrhynchos*, y Dry Tortugas, Florida en donde se protege a *Ginglymostoma cirratum* durante su temporada de apareamiento (mayo a agosto). El tercer tipo son las áreas de no pesca (reservas marinas) que se utilizan como herramientas de manejo pesquero, de las cuales hasta antes de 1999 sólo existía una en Australia para proteger stocks reproductivos de *Carcharhinus obscurus*, *C. plumbeus*, *Galeorhinus galeus* y *Mustelus antarcticus*; no obstante, en los últimos años éstas se han implementado en EUA para los tiburones oscuro, arenero y nocturno, y en la India para nueve especies de tiburón (Bonfil 1999, ICSF 2001). Con respecto a México, en la Norma Oficial Mexicana NOM-029-PESC-2006 se establecen diez áreas de refugio para proteger la reproducción y/o el nacimiento de tiburones y rayas durante el mes de junio de cada año, de las cuales tres se encuentran en el Golfo de California; sin embargo, no se especifican zonas y épocas de veda debido a que no existe un conocimiento suficiente de las áreas y temporadas reproductivas (Alejo-Plata *et al.* 2007, SAGARPA 2007a).

La producción total de tiburón en el Golfo de California fue de 12,089 t en 2006, lo que representó 67% de la producción mexicana en el Pacífico, con un valor de \$122,933 miles de pesos (SAGARPA 2006). Desafortunadamente, 50% de la producción de especies de importancia comercial en esta zona está integrada por organismos inmaduros y hembras grávidas (Madrid *et al.* 1997, SAGARPA 2007a). Por ello es indispensable identificar las áreas de reproducción y crianza de tiburones, para que exista la posibilidad de protegerlas frente a los evidentes indicios de sobre pesca (Camhi *et al.* 1998, Anislado y Robinson 2001). El objetivo de este trabajo fue detectar zonas de reproducción y crianza de tiburones en el Golfo de California e identificar las temporadas de máxima utilización por estas especies. Finalmente, esta información fue empleada junto con una serie de atributos básicos de las diferentes especies de tiburón para sugerir áreas potencialmente prioritarias para el manejo.

Es importante aclarar que el uso de AMPs como estrategia de conservación y manejo pesquero es complicada debido a la imprecisión histórica que se ha presentado en la comprensión del concepto de área de crianza para tiburones, y dada la falta de criterios estandarizados para identificarlas (Heithaus 2007, Heupel *et al.* 2007). La mayoría de los autores sugieren que estas zonas son benéficas para los jóvenes dada su disponibilidad de alimento y protección contra depredadores; por lo tanto, éstos son considerados como los principales criterios para identificarlas (Springer 1967, Bass 1978, Branstetter 1990).

elasmobranchs; hence, the nursery grounds identified here can be considered potential and their proposal is a heuristic exercise on possible priority management areas based on the best available information for the region.

Material and methods

An analysis was made of published papers, theses, and technical reports containing information on the reproductive biology and behaviour of commercially important shark species in the Gulf of California, in order to identify and select breeding grounds and seasons according to the criteria proposed by Castro (1993):

- To identify and propose sites as mating grounds, the literature had to provide information regarding females with mating scars, gravid females with embryos in early stages of development, females and males in reproductive phase, and a sex ratio of close to 1:1.
- To designate a site as a nursery ground, the literature had to provide information regarding gravid females with embryos in late stages of development (close to expulsion), and the presence of neonates and young individuals in the catches.

Mating and nursery grounds and seasons

The Gulf of California was divided into three regions depending on the fishing areas targeted by the shark fishery (Castillo-Géniz *et al.* 2000, CONAPESCA-INP 2004). The data collected on the breeding grounds and seasons were introduced into a geographic information system in order to detect similarities and differences by space-time analysis (ESRI 1999).

Priority management areas

Geographic quadrants of 1° latitude × 1° longitude containing shark mating and nursery areas were used for the analysis (fig. 1). The quadrants were classified according to conservation priority status by complementarity analysis (Humphries *et al.* 1991, Scout *et al.* 2001). This method allows maximizing the number of species to be protected in a certain part of the study area (in this case, the coastal area of the Gulf of California) but at the same time designating a minimum number of areas for their protection, two essential criteria for optimal conservation work (Vane-Wright *et al.* 1991, van Jaarsveld *et al.* 1998). The complementarity technique is of importance in defining relevant areas since, at the researcher's discretion, both ecological and phylogenetic factors of the group in question can be included (Rodrigues and Gaston 2002, Faith *et al.* 2003). This technique is widely used in land environments (Sarkar *et al.* 2006), and in Mexico it has been used in particular to analyze the situation of mammals and plants (Contreras-

Actualmente, el concepto se ha ampliado y mejorado, y se ha planteado la posibilidad de definir estas zonas usando tres criterios cuantitativos para organismos menores a un año: (1) los tiburones son más comunes de encontrar en esta área que en otras, (2) los individuos presentan una tendencia a permanecer o regresar por largos periodos (semanas o meses), y (3) el hábitat es usado repetidamente a través de los años. Con esta perspectiva y considerando las características de las historias de vida de las especies (talla de nacimiento, tasa de crecimiento, edad de primera madurez, estructura de tallas de las hembras grávidas y los neonatos) se facilita el proceso de selección de estos sitios mediante un esquema más riguroso (Heupel *et al.* 2007, Kinney y Simpfendorfer 2009). Los registros numéricos de hembras grávidas y neonatos en el Golfo de California son limitados; incluso la información presente en la literatura muchas veces es anecdótica debido que no existía un marco teórico claro sobre todos los datos que se deben de registrar y documentar para el estudio de la biología reproductiva de los elasmobranchios. Por ello, las áreas de crianza identificadas en el presente trabajo se pueden considerar potenciales y su propuesta es un ejercicio heurístico sobre las posibles zonas prioritarias de manejo realizado con la mejor información disponible de la región.

Materiales y métodos

Se realizó la recopilación y análisis de la literatura publicada, tesis e informes técnicos que contienen información sobre conducta y biología reproductiva de las especies de tiburones de importancia comercial en el Golfo de California, con la finalidad de identificar áreas y temporadas de reproducción y crianza, las cuales fueron seleccionadas utilizando los criterios establecidos por Castro (1993):

- Para identificar y proponer sitios como área de reproducción la literatura tenía que manejar información referente a hembras con cicatrices de cópula, hembras grávidas con embriones en etapas tempranas de desarrollo, hembras y machos en fase reproductiva, y una proporción de sexos cercana a 1:1.
- Para denominar una zona como área de crianza, la literatura debía contemplar información pertinente a hembras grávidas con embriones en etapas tardías de desarrollo (próximo a la expulsión), y la presencia de neonatos e individuos jóvenes en las capturas.

Áreas y temporadas de reproducción y crianza

Se dividió el Golfo de California en tres regiones en función de las áreas de captura que se manejan en la pesquería de tiburón (Castillo-Géniz *et al.* 2000, CONAPESCA-INP 2004). La información recopilada sobre áreas y temporadas de reproducción y crianza de las especies se incorporó en un sistema de información geográfica con la finalidad de detectar similitudes y diferencias mediante el análisis espacio-tiempo (ESRI 1999).

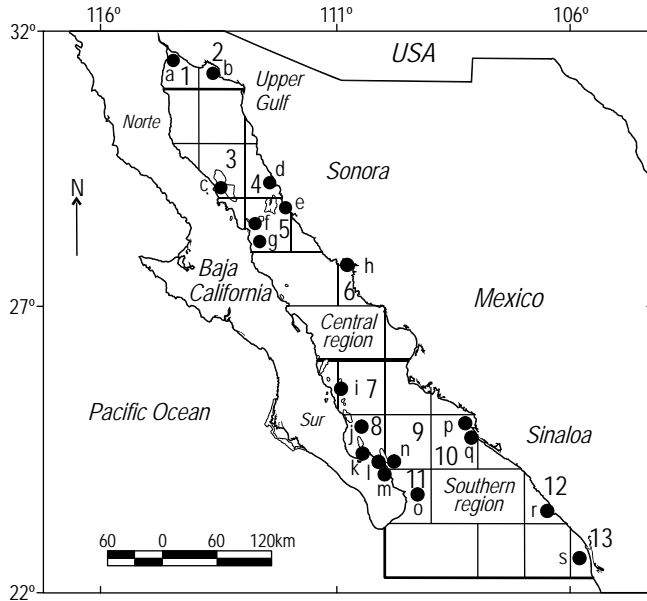


Figure 1. Shark mating and/or nursery areas in the Gulf of California and location of the quadrants where these sites are located.

Figura 1. Áreas de crianza y/o reproducción de tiburones en el Golfo de California y localización de los cuadrantes donde se ubican estos sitios.

(a) Golfo de Santa Clara and (b) Puerto Peñasco, Sonora (Son); (c) Bahía de los Ángeles, Baja California (BC); (d) Seri area and (e) Bahía Kino, Son; (f) San Francisquito and (g) El Barril, BC; (h) La Manga, Son; (i) Agua Verde, (j) El Paredito, (k) Bahía de La Paz, (l) El Sargento, (m) La Ventana, (n) Punta Arenas and (o) Gulf mouth, Baja California Sur; and (p) Bahía Santa María, (q) Bahía Altata, (r) Mazatlán and (s) Teacapan, Sinaloa.

Medina *et al.* 2001, Ceballos 2007). In the case of marine species, this algorithm has been used to define priority areas for the protection of bony fishes in South Africa, Australia, Chile, and the United States (Turpie *et al.* 2000, Fox and Beckley 2005, Tognelli *et al.* 2005, Geselbracht *et al.* 2009), but this is the first time it has been used for cartilaginous fishes.

Based on the bibliographic review, the following criteria were considered for the selection of areas (tables 1, 2, 3): (a) total number of species that reproduce and/or use nursery grounds in each quadrant, (b) presence of species that have a low fecundity (less than 10 potential offspring), (c) presence of species that mature at sizes greater than 200 cm total length, (d) presence of species that have limited mating sites, (e) presence of species that are most commonly caught (Castillo-Géniz *et al.* 2000, Smith *et al.* 2009), and (d) presence of species that have high-value fins (Smith *et al.* 2009).

Finally, maps were elaborated specifying the priority conservation quadrants relative to each criteria, and a final map was elaborated integrating all the criteria, representing the relative levels of importance for the management of each shark mating and nursery ground. Moreover, a discrepancy or space analysis was conducted to detect how many priority management areas corresponded to a MPA. The map was constructed using ArcView 3.2 software (ESRI 1999).

Zonas prioritarias de manejo

Para el análisis se utilizaron cuadrantes geográficos de 1° de latitud × 1° de longitud, en los que se ubicaron las áreas de reproducción y crianza de tiburones (fig. 1). Para clasificar los cuadrantes en orden prioritario de conservación se realizó un análisis de complementariedad (Humphries *et al.* 1991, Scout *et al.* 2001). Este método permite maximizar el número de especies que se protegerían en una región dada de la zona de estudio (en este caso, la zona costera del Golfo de California) pero designando al mismo tiempo para su protección un número mínimo de áreas, los cuales son dos criterios fundamentales para la optimización de las labores de conservación (Vane-Wright *et al.* 1991, van Jaarsveld *et al.* 1998). La técnica de complementariedad se ha vuelto clave para definir áreas relevantes pues, a criterio del investigador, se pueden involucrar aspectos tanto ecológicos como filogenéticos del grupo de interés (Rodrigues y Gaston 2002, Faith *et al.* 2003). Es una técnica ampliamente utilizada en ambientes terrestres (Sarkar *et al.* 2006), y en México ha sido empleada en especial para analizar la situación de mamíferos y plantas (Contreras-Medina *et al.* 2001, Ceballos 2007). Para especies marinas este algoritmo ha sido usado en la definición de áreas prioritarias para protección de peces óseos en Sudáfrica, Australia, Chile y EUA (Turpie *et al.* 2000, Fox y Beckley 2005, Tognelli *et al.* 2005, Geselbracht *et al.* 2009), pero ésta es su primera aplicación al caso de peces cartilaginosos.

Con base en la revisión bibliográfica, en el presente estudio se consideraron para la selección de áreas los siguientes criterios (tablas 1, 2 y 3): (a) número total de especies que se reproducen y/o utilizan áreas de crianza en cada cuadrante, (b) presencia de especies con fecundidad baja (menos de 10 crías potenciales), (c) presencia de especies que maduran a tallas mayores a los 200 cm de longitud total, (d) presencia de especies con sitios limitados de reproducción, (e) presencia de especies cuyas capturas son más importantes (Castillo-Géniz *et al.* 2000, Smith *et al.* 2009), y (d) presencia de especies consideradas de primera categoría por el valor comercial de sus aletas (Smith *et al.* 2009).

Finalmente, se elaboraron mapas donde se especifican los cuadrantes prioritarios para la conservación con respecto a cada criterio y uno final resultante de la integración de todos los criterios, que representa los niveles relativos de importancia para el manejo de cada área de crianza y reproducción de tiburones. Además se realizó el análisis de discrepancias o espacios para detectar cuántas de las áreas prioritarias de manejo identificadas corresponden a un AMP. El mapa se construyó empleando el programa ArcView 3.2 (ESRI 1999).

Resultados

Especies de importancia comercial

Con base en la literatura se estableció que existen registros de áreas de crianza y reproducción de 14 especies de tiburones

Table 1. Commercially important shark species reported for mating and/or nursery areas in the Gulf of California. The asterisk denotes the species with the highest number of records and the number indicates the number of records found. Distribution: tropical and warm areas (Tr), and temperate areas (Te). Selection criteria used for each species: (A) total number of species, (B) species that have low fecundity, (C) species that mature at larger sizes, (D) species that have limited mating grounds, (E) species caught most frequently, and (F) species that have high-value fins.

Tabla 1. Especies de tiburones de importancia comercial que se reproducen y/o utilizan áreas de crianza en el Golfo de California. * Especies con mayor número de registros. El número indica la cantidad de registros encontrados. Distribución: zonas tropicales y cálidas (Tr) y zonas templadas (Te). Criterios utilizados para la selección de especies: (A) número total, (B) baja fecundidad, (C) madurez a tallas mayores, (D) sitios limitados de reproducción, (E) especies que más se capturan y (F) especies de primera categoría.

Family and species	Common name	Distribution	Criteria					
			A	B	C	D	E	F
Carcharhinidae								
<i>Carcharhinus falciformis</i> * 5	Silky shark	Tr	×				×	×
<i>Carcharhinus obscurus</i> * 4	Dusky shark	Tr	×	×	×	×		
<i>Carcharhinus limbatus</i> * 6	Blacktip shark	Tr, Te	×	×	×		×	×
<i>Carcharhinus leucas</i> 1	Bull shark	Tr	×	×	×	×		
<i>Prionace glauca</i> 3	Blue shark	Tr, Te	×			×	×	×
<i>Rhizoprionodon longurio</i> * 6	Pacific sharpnose shark	Tr	×				×	
<i>Nasolamia velox</i> 1	Whitenose shark	Tr	×	×		×		
Sphyrnidae								
<i>Sphyrna lewini</i> * 6	Scalloped hammerhead shark	Tr	×		×		×	×
<i>Sphyrna zygaena</i> 3	Hammerhead shark	Tr, Te	×	×		×	×	×
Triakidae								
<i>Mustelus lunulatus</i> 2	Sicklefin smoothhound shark	Tr, Te	×	×		×	×	
<i>Mustelus henlei</i> 3	Brown smoothhound shark	Tr, Te	×			×	×	
Squatinaidae								
<i>Squatina californica</i> * 5	Pacific angel shark	Tr, Te	×	×			×	
Lamnidae								
<i>Isurus oxyrinchus</i> 2	Shortfin mako shark	Tr, Te	×		×	×	×	×
Alopiidae								
<i>Alopias pelagicus</i> 2	Pelagic thresher shark	Tr, Te	×	×	×	×	×	×

Results

Species of commercial importance

The bibliographic review showed that mating and nursery grounds had been recorded for 14 shark species of commercial importance in the Gulf of California, belonging to six families: Carcharhinidae, Sphyrnidae, Triakidae, Squatinaidae, Lamnidae, and Alopiidae (table 1).

The six species with most records in relation to mating grounds were *Carcharhinus limbatus*, *Sphyrna lewini*, *Rhizoprionodon longurio*, *Carcharhinus falciformis*, *Squatina californica*, and *Carcharhinus obscurus* (table 1).

Breeding grounds and seasons

In spring, *R. longurio*, *Mustelus henlei*, and *S. californica* congregate for reproduction in the upper Gulf of California. The central gulf serves as a mating, birthing, and nursery area

de importancia comercial en el Golfo de California, distribuidas en seis familias: Carcharhinidae, Sphyrnidae, Triakidae, Squatinaidae, Lamnidae y Alopiidae (tabla 1).

Las seis especies que presentaron más registros en cuanto a sitios de reproducción fueron: *Carcharhinus limbatus*, *Sphyrna lewini*, *Rhizoprionodon longurio*, *Carcharhinus falciformis*, *Squatina californica* y *Carcharhinus obscurus* (tabla 1).

Áreas y temporadas de reproducción y crianza de tiburones

En el Alto Golfo de California se congregan *R. longurio*, *Mustelus henlei* y *S. californica* con fines reproductivos en primavera. La región central del Golfo de California es utilizada como área de reproducción, nacimiento y crianza por varias especies durante la temporada de máxima utilización de primavera y verano: en San Francisquito y El Barril, Baja California (BC), se han observado congregaciones de *R. longurio*, *C. falciformis*, *C. obscurus*, *C. limbatus* y *S. lewini*; en Bahía Kino y La Manga, Sonora, se han observado de *C. falciformis*,

for several species during the peak spring and summer period: *R. longurio*, *C. falciformis*, *C. obscurus*, *C. limbatus*, and *S. lewini* have been observed in San Francisquito and El Barril, Baja California (BC), and *C. falciformis*, *C. obscurus*, and *C. limbatus* have been observed in Kino Bay and La Manga, Sonora. In the southern gulf, *C. falciformis*, *C. limbatus*, *R. longurio*, *S. lewini*, and *Sphyrna zygaena* reproduce primarily in Santa María-Altata Bay, Sinaloa, while *C. falciformis*, *R. longurio*, *Nasolamia velox*, *S. lewini*, *S. zygaena*, and *M. lunulatus* breed in Mazatlán, Sinaloa (tables 2, 3).

Similarities and differences in the seasonality of the mating and nursery cycle

Seventy-one percent of the commercially important shark species that reproduce and use nursery grounds in the Gulf of California complete their cycle during spring and summer. Only four species differ in regard to this behaviour: *Squatina californica* occupies mating and nursery grounds from De Los Ángeles Bay, BC, to La Paz Bay, Baja California Sur (BCS), and off Sonora during winter and spring; *Alopias pelagicus* congregates for reproduction in the central Gulf of California and in the area off Mazatlán in autumn, winter, and spring; and *Isurus oxyrinchus* and *Prionace glauca* reproduce in the southern gulf in winter and spring (tables 2, 3, 4).

Priority management areas

The bibliographic review revealed 19 mating and nursery grounds in the Gulf of California in 13 quadrants, six corresponding to Sonora and Sinaloa and seven to BC and BCS (fig. 1). Only three of the 13 quadrants (5, 10, and 12) showed breeding activity of five or more species, and of these, quadrant 12 (off Mazatlán) had the highest number of species (table 4).

According to the complementarity analysis, the priority management areas considering the total number of species that reproduce and use nursery grounds per quadrant occur in quadrants 12 (off Mazatlán), 9 (El Sargento, La Ventana, and Punta Arenas, BCS), 5 (San Francisquito and El Barril, BC, and Kino Bay), 4 (Seri area in Sonora), and 13 (Teacapán Bay, Sinaloa) (fig. 2a). Considering the species that have a low fecundity (producing less than 10 offspring per breeding season), the main mating and nursery grounds that should be considered priority areas occur in quadrants 12, 6 (La Manga, Sonora), 4, and 13 (fig. 2b). Considering the species that mature at sizes greater than 200 cm total length, the priority areas occur in quadrants 5, 9, and 13 (fig. 2c). Considering the species with limited number of mating and nursery grounds, the priority areas occur in quadrants 12, 9, 5, 4, and 13 (fig. 2d). Considering the number of species per quadrant that are most fished in the Gulf of California, quadrants 12, 9, 6, and 4 are the most important (fig. 2e). Finally, considering the species with high-value fins, the priority areas occur in quadrants 12 and 9 (fig. 2f).

C. obscurus y *C. limbatus*. En la región sur del Golfo de California, *C. falciformis*, *C. limbatus*, *R. longurio*, *S. lewini* y *Sphyrna zygaena* se reproducen principalmente en Bahía Santa María-Altata, Sinaloa; mientras que *C. falciformis*, *R. longurio*, *Nasolamia velox*, *S. lewini*, *S. zygaena* y *M. lunulatus* lo hacen en Mazatlán, Sinaloa (tablas 2, 3).

Similitudes y diferencias en la temporalidad del ciclo reproductivo y de crianza

El 71% de las especies de tiburones de importancia comercial que se reproducen y utilizan áreas de crianza en el Golfo de California completan su ciclo durante las temporadas de primavera y verano, a excepción de cuatro (*Prionace glauca*, *Isurus oxyrinchus*, *Squatina californica* y *Alopias pelagicus*) que difieren en cuanto a este comportamiento. El angelito (*S. californica*) presenta áreas de crianza y reproducción desde Bahía de Los Ángeles, BC, hasta Bahía de La Paz, Baja California Sur (BCS), pero también en Sonora durante invierno-primavera. El zorro azul (*A. pelagicus*) se congrega con fines reproductivos en la región central del Golfo de California y en la zona adyacente a Mazatlán en otoño, invierno y primavera. Las especies *I. oxyrinchus* y *P. glauca* se reproducen en la región sur del golfo en invierno y primavera (tablas 2, 3, 4).

Zonas prioritarias de manejo

Como resultado de la revisión bibliográfica se identificaron 19 zonas de reproducción y crianza de tiburones en el Golfo de California presentes en 13 cuadrantes, de los cuales seis corresponden a Sonora y Sinaloa y siete a BC y BCS (fig. 1). De los 13 cuadrantes sólo tres (5, 10 y 12) presentaron actividad reproductiva de cinco especies o más, destacando entre ellos el cuadrante 12 (zona adyacente a Mazatlán; tabla 4).

De acuerdo con los análisis de complementariedad, las áreas prioritarias para el manejo con base en el total de especies que se reproducen y utilizan áreas de crianza por cuadrante se encuentran en los cuadrantes 12 (zona adyacente a Mazatlán), 9 (área de El Sargento, La Ventana y Punta Arenas, BCS), 5 (San Francisquito y El Barril, BC, y Bahía Kino), 4 (zona seri de Sonora) y 13 (Bahía de Teacapán, Sinaloa) (fig. 2a). Considerando a las especies con fecundidad menor a 10 crías potenciales por temporada reproductiva, las principales áreas de reproducción y crianza que deben considerarse como prioritarias para el manejo de tiburones están en los cuadrantes 12, 6 (La Manga, Sonora), 4 y 13 (fig. 2b). Con base al criterio de las especies que maduran a tallas mayores a los 200 cm de longitud total, las áreas prioritarias de manejo están localizadas en los cuadrantes 5, 9 y 13 (fig. 2c); pero partiendo de las especies con número limitado de sitios de reproducción y crianza, los cuadrantes prioritarios serían el 12, 9, 5, 4 y 13 (fig. 2d). En la figura 2e se presentan los cuadrantes 12, 9, 6 y 4 como los más importantes considerando, por cuadrante, el número de especies más pescadas en el Golfo de California. Finalmente,

Table 2. Shark breeding grounds and seasons in the Gulf of California (BC = Baja California; BCS = Baja California Sur).
 Tabla 2. Áreas y temporadas de reproducción y crianza de tiburones en el Golfo de California (BC = Baja California; BCS = Baja California Sur).

Region	Species	Mating area and season	Nursery area and season	Reference
Upper Gulf	<i>Rhizoprionodon longurio</i>	Golfo de Santa Clara, May		Cudney and Turk (1998)
	<i>Rhizoprionodon longurio</i>	Puerto Peñasco (Sonora), February to June		Cudney and Turk (1998)
Central Gulf	<i>Mustelus henlei</i>	Puerto Peñasco (Sonora), March to June	Puerto Peñasco (Sonora), January to April	Pérez-Jiménez and Sosa-Nishizaki (2008)
	<i>Squatina californica</i>	Puerto Peñasco (Sonora), April to June	Puerto Peñasco (Sonora), May to June	Cudney and Turk (1998)
	<i>Alopias pelagicus</i>	August to November	October and November	Mendizábal <i>et al.</i> (2000)
	<i>Squatina californica</i>	Bahía de los Ángeles (BC), March to June	Bahía de los Ángeles (BC), December and January	Villavicencio-Garayzar (1996a), Smith <i>et al.</i> (2009)
	<i>Carcharhinus limbatus</i> , <i>C. obscurus</i>	San Franciscoquito and El Barril (BC), July and August	San Franciscoquito and El Barril (BC), May to August	Bernal (1999), Bizarro <i>et al.</i> (2007), Smith <i>et al.</i> (2009)
	<i>Rhizoprionodon longurio</i>	San Franciscoquito (BC), March to May		Cudney and Turk (1998), Bizarro <i>et al.</i> (2007)
	<i>Carcharhinus falciformis</i> , <i>Sphyrna lewini</i>	San Franciscoquito and El Barril (BC), May to October	San Franciscoquito and El Barril (BC), June to September	Torres (1999), Cadena (2001), Smith <i>et al.</i> (2009)
	<i>Mustelus henlei</i>	Seri area (Sonora), March to May		Sánchez (1977), Bizarro <i>et al.</i> (2007)
	<i>Carcharhinus limbatus</i> , <i>C. obscurus</i>	Bahía Kino (Sonora), July and August	Bahía Kino (Sonora), May to August	Bernal (1999), Bizarro <i>et al.</i> (2007)
	<i>Squatina californica</i>	Bahía Kino (Sonora), March to June	Bahía Kino (Sonora), December and January	Villavicencio-Garayzar (1996a), Zayas (1998)
<i>Carcharhinus falciformis</i> , <i>C. obscurus</i> , <i>C. limbatus</i>	La Manga (Sonora), May to August	La Manga (Sonora), May to August	Cadena (2001), Bizarro <i>et al.</i> (2007)	

(Continued)

Region	Species	Mating area and season	Nursery area and season	Reference
Southern Gulf	<i>Sphyrna lewini</i>	Southeastern coast of BCS, May to September		Torres (1999)
	<i>Squatina californica</i>	Agua Verde, El Pardito, and Bahía de La Paz (BCS), March to June	Agua Verde, El Pardito, and Bahía de La Paz (BCS), December to February	Villavicencio-Garayzar (1996a), Zayas (1998), Bizarro <i>et al.</i> (2007)
	<i>Prionace glauca</i>	El Sargento, La Ventana, and Punta Arenas (BCS), April to July	El Sargento, La Ventana, and Punta Arenas (BCS), December to May	Guerrero (2002), Bizarro <i>et al.</i> (2007)
	<i>Isurus oxyrinchus</i>	El Sargento, La Ventana, and Punta Arenas (BCS), March to May	El Sargento, La Ventana, and Punta Arenas (BCS), February to June	Guerrero (2002), Bizarro <i>et al.</i> (2007)
	<i>Carcharhinus limbatus</i>	Gulf mouth, March		Mendizábal <i>et al.</i> (2000)
	<i>Prionace glauca</i>	Gulf mouth, March to May		Mendizábal <i>et al.</i> (2000)
	<i>Carcharhinus falciformis</i> , <i>C. limbatus</i> , <i>Sphyrna lewini</i> , <i>S. zygaena</i> , <i>Rhizoprionodon longurio</i>	Bahía Santa María-Altata and Playa Sur (Sinaloa), March to August	Bahía Santa María-Altata and Playa Sur (Sinaloa), March to August	Saucedo <i>et al.</i> (1982), Castillo (1990), Vázquez (2003), Márquez <i>et al.</i> (2005), Bizarro <i>et al.</i> (2007)
	<i>Rhizoprionodon longurio</i>	Mazatlán (Sinaloa), March to June	Mazatlán (Sinaloa), February to April	Saucedo <i>et al.</i> (1982), Manjarrez <i>et al.</i> (1983)
	<i>Carcharhinus falciformis</i>		Mazatlán (Sinaloa), June to September	Saucedo <i>et al.</i> (1982)
	<i>Sphyrna lewini</i> , <i>S. zygaena</i> , <i>Mustelus lunulatus</i> , <i>Nasolamia velox</i>		Mazatlán (Sinaloa), March to June	Saucedo <i>et al.</i> (1982), Bizarro <i>et al.</i> (2007)
	<i>Alopias pelagicus</i>	Northern Mazatlán (Sinaloa), November to April	Northern Mazatlán (Sinaloa), November to April	Mendizábal (1995), Mendizábal <i>et al.</i> (2000)
	<i>Sphyrna lewini</i>	Teacapán (Sinaloa), March to June	Teacapán (Sinaloa), June to August	Manjarrez <i>et al.</i> (1983), Anislado (2008)
	<i>Carcharhinus leucas</i>		Teacapán (Sinaloa), May to August	Saucedo <i>et al.</i> (1982), Manjarrez <i>et al.</i> (1983)

Table 3. Life history characteristics of commercially important shark species in the Gulf of California. Size given in total length (TL) or precaudal length (PL). The presence of neonates and gravid females with initial and terminal embryos is indicated. The asterisk relates the quantitative data with the reference per species; the other references provide only qualitative information.

Tabla 3. Características del ciclo de vida de las especies de tiburones de importancia comercial en el Golfo de California. Tallas en longitud total (TL) o longitud precaudal (LP). Se indica la presencia de neonatos y hembras grávidas con embriones iniciales y terminales. El asterisco relaciona la información cuantitativa con la cita por especie; el resto de la bibliografía manejan sólo datos cualitativos.

Ref.: (a) Anislado (2008), (b) Bernal (1999), (c) Bizarro *et al.* (2007), (d) Blanco-Parra *et al.* (2008), (e) Cadena (2001), (f) Conde (2005), (g) Guerrero (2002), (h) Manjarrez *et al.* (1983), (i) Márquez *et al.* (2005), (j) Mendizábal (1995), (k) Mendizábal *et al.* (2000), (l) Pérez-Jiménez & Sosa-Nishizaki (2008), (m) Saucedo *et al.* (1982), (n) Torres (1999), (o) Vázquez (2003), (p) Villavicencio-Garayzar (1996a), (q) Villavicencio-Garayzar (1996b).

Species	Maximum size		Maturity size (M/F)	Birth size	Fecundity	Gestation (months)	Gravid females/ Neonates	Ref.
	Males (M)	Females (F)						
<i>Carcharhinus falciformis</i>	280 cm TL	261 cm TL	180 cm TL	70 cm TL	2–12	12	70*/2*	e*, k, m, o
<i>Carcharhinus obscurus</i>	260 cm PL	300 cm PL	200/210 PL	–	3–9	18	Yes/yes	b, c, q
<i>Carcharhinus limbatus</i>	223 cm PL	263 cm PL	200/215 PL	60 cm PL	2–6	11	Yes/yes	b, c, j, k
<i>Carcharhinus leucas</i>		330 cm TL	200 cm TL	62–93 cm TL	3–7	11	2*/yes	c, h*, m
<i>Nasolamia velox</i>	127 cm TL	156 cm TL	92 cm TL	37 cm TL	4	9	Yes/–	m
<i>Rhizoprionodon longurio</i>	120 cm TL	127 cm TL	97 cm TL	37 cm TL	4–12	12	Yes/yes	c, h, i, m, o
<i>Prionace glauca</i>	230 cm TL	290 cm TL	182 cm TL	45–49 cm TL	10–60	12	10*/–*	c, d, g*
<i>Sphyrna lewini</i>			170/205 TL	49–56 cm TL	22–48	10–11	5*/59*	a*, h, m, n, o
<i>Sphyrna zygaena</i>	154 cm TL	155 cm TL	115 cm TL	56 cm TL	6	10	Yes/yes	c, m, o
<i>Mustelus lunulatus</i>	94 cm TL	86 cm TL	–	–	4	10	–/–	m
<i>Mustelus henlei</i>	71 cm TL	90.5 cm TL	55/57–66 TL	28 cm TL	1–21	10	219*/–*	c, l*
<i>Squatina californica</i>	90 cm TL	92 cm TL	82/86 TL	25–26 cm TL	2–7	10	27*/–*	p*
<i>Isurus oxyrinchus</i>	208 cm TL	290 cm TL	180/290 TL	80 cm TL	4–25	12	Yes/yes	c, f, g
<i>Alopias pelagicus</i>	367 cm TL	390 cm TL	280/290 TL	150 cm LT	2	12	Yes/–	c, j, k

Priority levels for the management of shark mating and nursery grounds

Integrating the priority conservation quadrants based on each of the criteria (a–f), four levels of relative importance were identified for the management of shark mating and nursery grounds. The first level corresponded to quadrants 12 and 9, the second to quadrants 13 and 4, the third to quadrant 5, and the fourth to quadrant 6 (fig. 3). Management of these six quadrants would result in the protection of all the shark species that breed in the Gulf of California (table 4).

Finally, only one (16.7%) of the six quadrants or key regions identified contained a Protected Natural Area (PNA) (fig. 3).

Discussion

Species of commercial importance

Mating and nursery grounds had been reported for 14 of the 24 shark species caught in the Gulf of California (Villavicencio-Garayzar 1996c, Castillo-Géniz *et al.* 2000, Villavicencio 2000), and of these, *C. limbatus*, *S. lewini*, *R. longurio*, *C. falciformis*, *S. californica*, and *C. obscurus* had the most number of records. This is possibly due to three situations: (a) they are the species most commonly caught in the

los cuadrantes 12 y 9 (fig. 2f) son los prioritarios para el manejo de las especies de tiburón si se toma como base aquellas cuyas aletas son consideradas de primera clase para su comercialización.

Niveles de prioridad para el manejo de las áreas de crianza y reproducción de tiburones

Integrando los cuadrantes prioritarios de conservación con base a cada uno de los criterios (a–f), se identificaron cuatro niveles de importancia relativa para el manejo de las áreas de reproducción y crianza. El primer nivel corresponde a los cuadrantes 12 y 9, el segundo al 13 y el 4, el tercero al 5, y el cuarto al 6 (fig. 3). Con el manejo los seis cuadrantes mencionados se protegería a todas las especies que usan el Golfo de California para crianza y reproducción (tabla 4).

Finalmente, se observó que de los seis cuadrantes o regiones clave identificados, solamente en una (16.7%) existe un AMP (fig. 3).

Discusión

Especies de importancia comercial

De las 24 especies de tiburones que se capturan en el Golfo de California (Villavicencio-Garayzar 1996c, Castillo-Géniz *et*

Table 4. Breeding seasons (Sp = spring, Su = summer, A = autumn, and W = winter) of commercially important sharks in the Gulf of California, and mating and nursery areas per species per quadrant.

Tabla 4. Temporadas reproductivas (Sp = primavera, Su = verano, A = otoño, W = invierno) de las especies de tiburones de importancia comercial en el Golfo de California, y cuadrantes donde tienen sus áreas de reproducción y crianza.

Species	Season				Quadrant												
	Sp	Su	A	W	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Carcharhinus falciformis</i>	*	*							x	x				x		x	
<i>Carcharhinus obscurus</i>	*	*							x	x							
<i>Carcharhinus limbatus</i>	*	*							x	x				x	x	x	
<i>Carcharhinus leucas</i>	*	*															x
<i>Nasolamia velox</i>	*	*															x
<i>Sphyrna lewini</i>	*	*							x					x	x	x	x
<i>Sphyrna zygaena</i>	*	*												x		x	
<i>Rhizoprionodon longurio</i>	*					x	x		x					x		x	
<i>Mustelus lunulatus</i>	*						x										x
<i>Mustelus henlei</i>	*					x	x		x								
<i>Prionace glauca</i>	*			*										x		x	
<i>Squatina californica</i>	*			*			x	x		x	x	x					
<i>Isurus oxyrinchus</i>	*			*										x			
<i>Alopias pelagicus</i>	*		*	*					x								x

study area; (b) hence, more information is available if the data generated by the artisanal fisheries are also taken into account; and (c) the resource is accessible for observation in coastal areas during their reproductive aggregation season (Villavicencio-Garayzar 1996c, Castillo-Géniz *et al.* 2000, Alejo-Plata *et al.* 2007).

Breeding grounds and seasons

Onset of the mating, gestation, birthing and nursery period is governed primarily by temperature (Pratt and Casey 1990). In the Gulf of California, temperature values are 18–19°C in April (spring) and increase to 30–31°C between August and September (summer) (Álvarez-Borrego *et al.* 1978, García-Pámanes and Lara-Lara 2001). During this period, tropical sharks (*C. falciformis*, *C. leucas*, *C. limbatus*, *C. obscurus*, *R. longurio*, *M. lunulatus*, *M. henlei*, *N. velox*, *S. lewini*, and *S. zygaena*) find the biotic and abiotic conditions that will allow neonates to grow quickly and enter the juvenile and adult population (Castro 1993, Castillo-Géniz *et al.* 2000, Mendizábal *et al.* 2000, Alejo-Plata *et al.* 2007).

In the Gulf of California, mainly in the central and southern regions, the most significant upwelling events occur in winter and spring (Álvarez-Borrego and Schwartzlose 1979, García-Pámanes and Lara-Lara 2001), increasing primary productivity that in turn enriches the main food sources for shark neonates and juveniles in the nursery grounds (coastal lagoons, bays, estuaries, and marshes) during peak breeding months (May to August) (Villavicencio 2000). Moreover, the California

al. 2000, Villavicencio 2000) se encontraron reportes de áreas de crianza y reproducción de 14, sobresaliendo *C. limbatus*, *S. lewini*, *R. longurio*, *C. falciformis*, *S. californica* y *C. obscurus* por tener el mayor número de registros. Esto se debe posiblemente a tres situaciones: (a) son las que más se pescan en el área de estudio; (b) por ello se tiene más información, ya que se aprovechan los datos que se generan en las pesquerías ribereñas; y (c) el recurso es accesible para su observación durante sus temporadas de congregaciones reproductivas en la zona costera (Villavicencio-Garayzar 1996c, Castillo-Géniz *et al.* 2000, Alejo-Plata *et al.* 2007).

Áreas y temporadas de reproducción y crianza

El comienzo de la temporada de apareamiento, gestación, nacimientos y crianza depende principalmente de la temperatura (Pratt y Casey 1990). En el Golfo de California, la temperatura alcanza sus valores mínimos de 18–19°C en abril (primavera) y comienza a incrementarse hasta llegar a su máximo, entre agosto y septiembre (verano), de 30–31°C (Álvarez-Borrego *et al.* 1978, García-Pámanes y Lara-Lara 2001). Durante este periodo los tiburones tropicales (*C. falciformis*, *C. leucas*, *C. limbatus*, *C. obscurus*, *R. longurio*, *M. lunulatus*, *M. henlei*, *N. velox*, *S. lewini*, *S. zygaena*) encuentran en el Golfo de California las condiciones bióticas y abióticas que permitirán a los neonatos crecer rápidamente para incorporarse a la población de juveniles y adultos (Castro 1993, Castillo-Géniz *et al.* 2000, Mendizábal *et al.* 2000, Alejo-Plata *et al.* 2007).

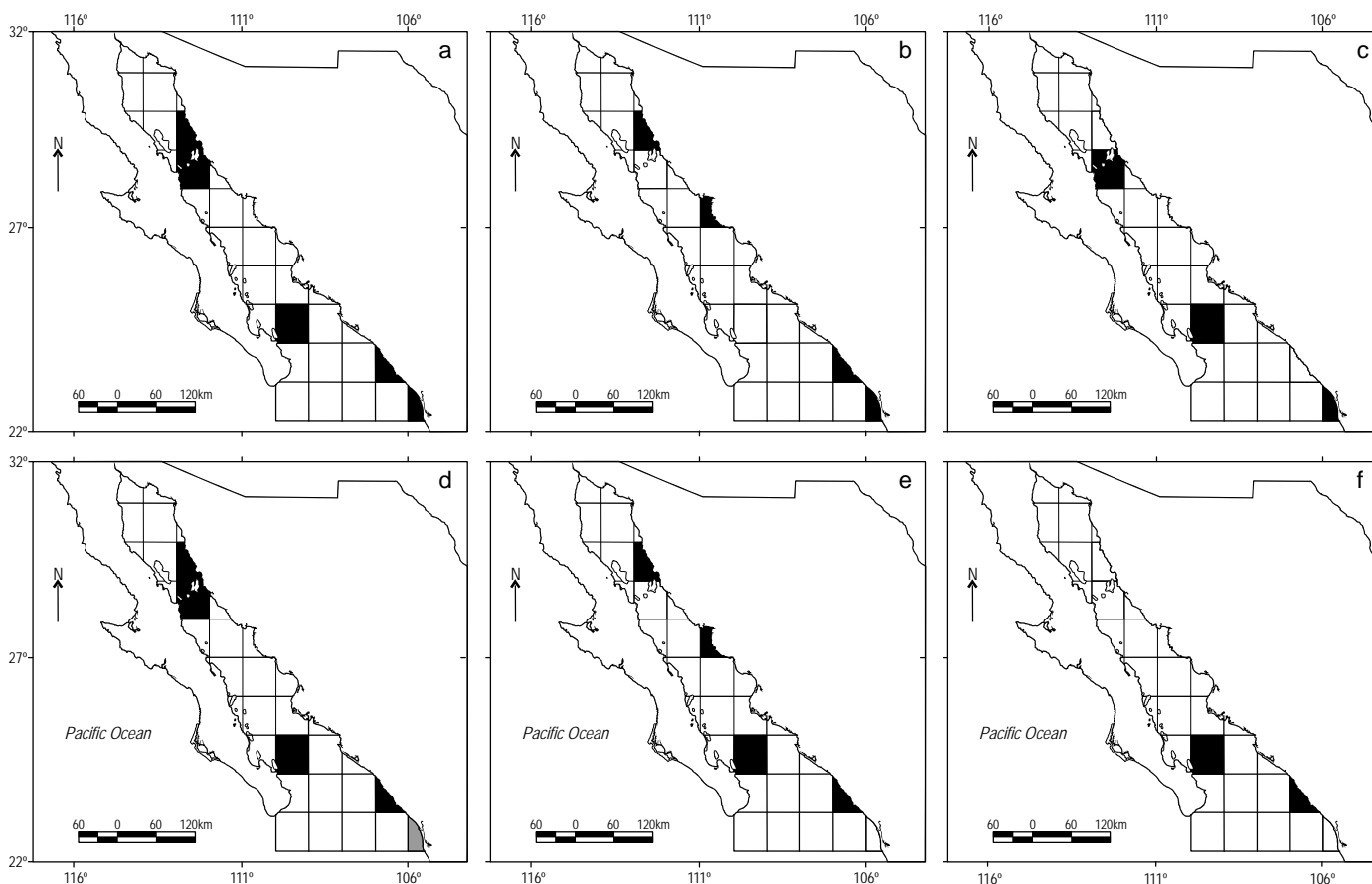


Figure 2. Shark priority mating and nursery areas in the Gulf of California. Selection criteria: (a) total number of species that reproduce per quadrant, (b) presence of species that have low fecundity, (c) presence of species that mature at larger sizes, (d) presence of species with limited breeding grounds, (e) presence of the most commonly caught species, and (f) presence of species with high-value fins.

Figura 2. Áreas prioritarias de reproducción y crianza de tiburones en el Golfo de California. Criterios de selección: (a) número total de especies que se reproducen por cuadrante, (b) ocurrencia de especies con fecundidad baja, (c) presencia de especies que maduran a tallas mayores, (d) presencia de especies con sitios limitados de reproducción, (e) tiburones que más se pescan, y (f) presencia de especies con aletas consideradas de primera categoría.

Current enters the gulf in winter and early spring, favouring the migration of blue, mako, and thresher sharks to the southern region during these seasons for their mating and nursery cycle (Mendizábal 1995, Arias 1998, Mendizábal *et al.* 2000).

Similarities and differences in the seasonality of the mating and nursery cycle

Castro (1993), Simpfendorfer and Milward (1993), and Alejo-Plata *et al.* (2007) reported that the common use of a nursery area by several shark species occurs because food availability is high. This behaviour was observed for *C. falciformis*, *C. leucas*, *C. limbatus*, *C. obscurus*, *R. longurio*, *M. lunulatus*, *M. henlei*, *N. velox*, *S. lewini*, and *S. zygaena* during the peak breeding period (May to August), while the mating and nursery cycle of cold- to temperate-water sharks (e.g., mako, blue, angel, and thresher sharks) occurs in winter and spring (see tables 1–4), mainly at the mouth of the Gulf of California (Mendizábal *et al.* 2000, Villavicencio 2000).

En el Golfo de California, principalmente en las regiones central y sur, las surgencias más importantes se presentan en invierno-primavera (Álvarez-Borrego y Schwartzlose 1979, García-Pámanes y Lara-Lara 2001) propiciando el incremento de la productividad primaria que a su vez enriquecerá las fuentes primordiales de alimento para los tiburones neonatos y jóvenes en las áreas de crianza (lagunas costeras, bahías, estuarios y marismas) durante los meses de máximas congregaciones reproductivas, mayo a agosto (Villavicencio 2000). Además, la Corriente de California entra al Golfo de California en invierno y principios de primavera, lo que favorece la migración de los tiburones azul, mako y zorro azul en esas temporadas a la región sur del golfo, para llevar a cabo sus ciclos de reproducción y crianza (Mendizábal 1995, Arias 1998, Mendizábal *et al.* 2000).

Similitudes y diferencias en la temporalidad del ciclo reproductivo y de crianza

Castro (1993), Simpfendorfer y Milward (1993) y Alejo-Plata *et al.* (2007) mencionan que el uso común de un área de

Priority management areas

Several authors (Castro 1993, Klimley *et al.* 1993, Simpfendorfer and Milward 1993, Bonfil 1997, Anislado and Robinson 2001) have documented that the horizontal movements of sharks toward shallow waters are an evolution strategy that has been maintained in their life history; hence, these areas should be considered critical areas to conserve the stock-recruitment relations (Lund 1990, Castro 1993, SAGARPA 2007a).

The priority management quadrants (fig. 2a–f) are in the central and southern Gulf of California, where significant upwelling occurs, generating high primary productivity that likely results in important concentrations of squid, sardine, mackerel, and anchovy. They, in turn, support populations of top predators, such as sharks, when they approach the coastal zone to breed (Álvarez-Borrego *et al.* 1978, Castillo-Géniz *et al.* 2000, Villavicencio 2000).

The main problems in designing MPAs for sharks is being able to include most of the habitats where they spend their different life stages, and implementing them in the case of highly migratory and oceanic species (*A. pelagicus*, *P. glauca*, *I. oxyrinchus*, and *C. limbatus*), which because of their wide distribution would mean protecting very large areas, an almost impossible task (Nakano 1994, Bonfil 1999, Mendizábal *et al.* 2000). In this study, we therefore considered the coastal breeding grounds where species coincide and life history characteristics (tables 1, 3) as selection criteria, in order to choose few interconnected areas, complying with a fundamental requirement for the feasible conservation of fishery resources (Bonfil 1999, Contreras-Medina *et al.* 2001).

Priority levels for the management of shark breeding areas

All the 13 quadrants detected in this study (fig. 1) are important because they represent possible breeding grounds (Cudney and Turk 1998, Mendizábal *et al.* 2000, Villavicencio 2000, Márquez *et al.* 2005), but present different levels of priority for the optimum management of the mating and nursery grounds identified by the complementarity analysis. Priority level 1 was assigned to quadrants 12 and 9; six main species (*R. longurio*, *N. velox*, *S. lewini*, *S. zygaena*, *A. pelagicus*, and *M. lunulatus*) would be protected in quadrant 12, while *I. oxyrinchus* and *P. glauca* would be protected in quadrant 9. Priority level 2 was assigned to quadrants 13 and 4 for the protection of *C. leucas* and *M. henlei*, respectively. Priority level 3 was assigned to quadrant 5, where *C. falciformis* and *C. limbatus* (San Francisco-El Barril) and *S. californica* (Kino Bay) would be managed. Finally, priority level 4 was assigned to quadrant 6 for the protection of *C. obscurus*. Protecting these areas would assure a more suitable management of the resource in the Gulf of California because they are complementary relative to the species.

In the Gulf of California, the main sources of shark mortality from fishing (fishery production and number of vessels) are

crianza por varias especies de tiburón ocurre porque la disponibilidad de alimento es alta. Este comportamiento se observó en *C. falciformis*, *C. leucas*, *C. limbatus*, *C. obscurus*, *R. longurio*, *M. lunulatus*, *M. henlei*, *N. velox*, *S. lewini* y *S. zygaena* en la temporada de máxima reproducción en primavera-verano (mayo a agosto); mientras que los tiburones de aguas frías a templadas, como el mako, el azul, el angelito y el zorro azul, presentan temporadas de crianza y reproducción que corresponden a invierno y primavera (ver tablas 1 y 4), principalmente en la boca del Golfo de California (Mendizábal *et al.* 2000, Villavicencio 2000).

Zonas prioritarias de manejo

Varios autores (Castro 1993, Klimley *et al.* 1993, Simpfendorfer y Milward 1993, Bonfil 1997, Anislado y Robinson 2001) han documentado que los movimientos horizontales que realizan los tiburones hacia aguas someras son una estrategia evolutiva que se ha mantenido en su historia de vida y por lo tanto deben éstas ser consideradas como áreas críticas para conservar las relaciones stock/reclutamiento (Lund 1990, Castro 1993, SAGARPA 2007a).

Los cuadrantes prioritarios para el manejo (fig. 2a–f) están en la regiones central y sur del Golfo de California, donde se presentan las zonas de surgencias más importantes. Posiblemente su elevada productividad primaria permite el establecimiento de importantes concentraciones de calamares, sardinas, macarela y anchoveta, las que a su vez soportan poblaciones de grandes depredadores, como los tiburones, cuando se acercan a la zona costera con fines reproductivos y de crianza (Álvarez-Borrego *et al.* 1978, Castillo-Géniz *et al.* 2000, Villavicencio 2000).

Los principales problemas para diseñar AMPs para los tiburones radican en poder incluir en ellas la mayoría de los hábitats donde pasan sus diferentes estadios de vida, e implementarlas para especies altamente migratorias y oceánicas (*A. pelagicus*, *P. glauca*, *I. oxyrinchus* y *C. limbatus*) por su amplia distribución, lo que implicaría proteger áreas muy grandes, una tarea imposible de conseguir (Nakano 1994, Bonfil 1999, Mendizábal *et al.* 2000); por eso en este trabajo se consideraron los centros de congregaciones reproductivas donde coinciden las especies en la zona costera y las características de las historias de vida (tablas 1, 3) como criterios de selección, a fin de escoger pocas áreas interconectadas, lo cual cumple con un requisito fundamental para que la conservación de recursos pesqueros sea factible (Bonfil 1999, Contreras-Medina *et al.* 2001).

Niveles de prioridad para el manejo de las áreas de crianza y reproducción de tiburones

Los 13 cuadrantes detectados en este estudio (fig. 1) son todos importantes porque representan posibles zonas de congregaciones reproductivas (Cudney y Turk 1998, Mendizábal *et al.* 2000, Villavicencio 2000, Márquez *et al.* 2005), pero

found, in order of importance, at Sinaloa, BC, BCS, and Sonora (table 5), which is consistent with the priority levels detected in this study. This is due to the relationship between the fishing areas and the mating and nursery grounds during the main breeding seasons (Villavicencio-Garayzar 1996c, Bizarro *et al.* 2007).

The Gulf of California is the area with the highest annual shark production of all the Mexican Pacific. The possible implementation of the six priority management areas proposed herein for multispecific shark fisheries could have a strong socioeconomic impact on coastal communities if they happen to depend exclusively on this activity for their subsistence. To address this situation, the MPA management authorities and fishermen will have to work together to avoid conflicts. They will also have to consider complementary or alternative activities, such as tourism (FCRR 1997; Bonfil 1997, 1999; SAGARPA 2006).

Establishing protection zones to manage one fishery can affect other fisheries and lead to failure. For example, the US National Marine Fisheries Service tried closing shark nursery areas to fishing, but this measure was rejected because of a lack of research on the subject and the adverse effect that it could have on the shrimp fishery. This problem was also encountered in Australia when the implementation of MPAs was considered for *Squalus acanthias*, since this species is frequently caught incidentally in trawl nets (Castro 1993, Bonfil 1999). A similar situation could arise in the Gulf of California should protection zones be implemented for *Squatina californica*, *M. lunulatus*, *M. henlei*, and young individuals of other species like *Sphyrna lewini* and *S. zygaena*, because these species constantly become entangled in gillnets used to catch scale fishes (Anislado and Robinson 2001, Pérez-Jiménez and Sosa-Nishizaki 2008).

An analysis has not been made of the size structure of gravid females and neonates in shark nurseries of the Gulf of California, or of their local or seasonal movements (Heupel *et al.* 2007). Regarding the residence time of neonates, whether

presentan diferentes niveles de prioridad si se quiere lograr un manejo óptimo de las áreas de reproducción y crianza identificadas con los análisis de complementariedad. En los cuadrantes correspondientes al nivel 1 de prioridad, los cuadrantes 12 y 9, se protegería a seis especies principales (*R. longurio*, *N. velox*, *S. lewini*, *S. zygaena*, *A. pelagicus*, *M. lunulatus*) en el primero y a *I. oxyrinchus* y *P. glauca* en el segundo. En los de nivel 2, en los cuadrantes 13 y 4 se protegería a *C. leucas* y *M. henlei*, respectivamente; mientras que en el nivel 3, las tres especies que estarían siendo objetos de manejo en el cuadrante 5 serían *C. falciiformis* y *C. limbatus* (San Francisquito-El Barril) y *S. californica* (Bahía Kino). Finalmente, dentro del nivel 4 se protegería a *C. obscurus* en el cuadrante 6. Con la protección de las zonas antes mencionadas se aseguraría un manejo más adecuado del recurso en el Golfo de California porque se trata de sitios complementarios con respecto a las especies.

En el Golfo de California las principales fuentes de mortalidad por pesca (producción pesquera y cantidad de embarcaciones) para tiburones se encuentran por orden de importancia en sitios de Sinaloa, BC, BCS y Sonora (tabla 5), lo cual resulta consistente con los niveles de prioridad detectados en el presente trabajo. Esto se debe a la correspondencia que existe entre las zonas de pesca y las áreas de reproducción y crianza en sus principales temporadas (Villavicencio-Garayzar 1996c, Bizarro *et al.* 2007).

El Golfo de California es la zona con mayor producción anual de tiburones en todo el Pacífico mexicano. La posible implementación de las seis áreas prioritarias de manejo propuestas en este trabajo para pesquerías multiespecíficas de tiburones podría tener fuertes impactos socioeconómicos en las comunidades ribereñas si éstas dependen exclusivamente de esta actividad para subsistir. Para hacer frente a esta situación las autoridades administrativas de las AMPs y los pescadores deberán trabajar en conjunto para evitar conflictos; además, se tendrían que buscar actividades complementarias o alternativas enfocadas al aprovechamiento de otros recursos, como el

Table 5. Shark fishing vessels, gear, areas and seasons, and production per state along the Gulf of California (SAGARPA 2006, 2007a; Bizarro *et al.* 2007).
Tabla 5. Embarcaciones, artes, producciones, zonas y temporadas de pesca de tiburón por estado del Golfo de California (SAGARPA 2006, 2007a; Bizarro *et al.* 2007).

State	Number of artisanal boats (gear) (<10.5 m in length, 115 HP motor)	Number of medium-sized boats (gear) (10.5–27 m in length, 365 HP motor)	Fishing areas and seasons	Production (2006)
Baja California	367 (two longlines per boat with 350 hooks each, 750-m-long net with 6" mesh size)	55 (one longline net of 1000 hooks and 1500 m in length, occasionally 12 km in length)	Coinciding with breeding areas and seasons	2880 t
Baja California Sur	708 (same fishing gear)	12 (same fishing gear)	Also coinciding	1997 t
Sonora	181 (same fishing gear)	35 (same fishing gear)	Also coinciding	1735 t
Sinaloa	799 (same fishing gear)	98 (same fishing gear)	Also coinciding	5477 t

the areas are primary or secondary is not known, and as to the degree of exposure to predators, whether they are protected or open areas has yet to be determined (Bass 1978, Branstetter 1990, Heupel *et al.* 2007). Information is evidently lacking to be able to propose conservation sites based on robust biological criteria related to abundance, residence time, and inter-annual use of these sites by young individuals; hence, the management proposal presented here is heuristic and may not guarantee true protection. Nevertheless, the literature reviewed (see table 3) indicates the presence of neonates and gravid females, so they should not be discarded as critical habitats since the number of individuals examined in the reproductive biology studies is not known, and it is possible that some of them may have been captured during their seasonal migratory route (corridor) or that the fishing gear was not selective in regard to neonates (few individuals are reported in the literature). It is thus necessary to conduct quantitative studies and to analyze the size structure of gravid females and neonates to determine whether an area is truly a nursery ground (Beck *et al.* 2001, Heupel *et al.* 2007).

Mexican Official Norm NOM-029-PESC-2006 designates the Santa María-Altata complex and Teacapán Bay (Sinaloa), and Gorda and Espíritu Santo banks (BCS) as refuge areas to protect the reproduction and birthing of sharks in the Gulf of California (SAGARPA 2007a). Our results only coincide in regard to the area off Teacapán. This law does not include most of the priority management areas described in our heuristic proposal (fig. 3), omitting sites considered very important in this study, such as Mazatlán (Sinaloa); El Sargento, La Ventana, and Punta Arenas (BCS); San Francisquito-El Barril (BC); and the Seri area, Kino Bay, and La Manga (Sonora). This is because the available information on the number of gravid females and neonates is not sufficiently robust to identify nursery areas with the current quantitative information (Heupel *et al.* 2007), since the data needed to determine these essential habitats in the Gulf of California have been widely and liberally interpreted, and are based on qualitative definitions with insufficient criteria that only refer to the presence of these organisms (Heithaus 2007, Heupel *et al.* 2007, Kinney and Simpfendorfer 2009). For example, life history characteristics of 14 species are given in table 3, of which only six have both qualitative and quantitative information on these stages. It is not possible to accurately identify an area as a shark nursery ground because of the scant information available, and for the same reason, only a limited number of refuge areas appear in NOM-029-PESC-2006.

A comparison of the priority management quadrants found in this study and the location of PNAs in the Gulf of California showed that only 16.7% of the priority areas defined here belong to a PNA (fig. 3), corresponding to the area of San Francisquito and El Barril, located within San Lorenzo Archipelago National Park (SEMARNAT 2006). The discrepancy analysis, however, identified a series of important new areas that coincide with other proposals derived from research conducted by the Mexican Government, such as the study carried

turismo, para las comunidades (FCRR 1997; Bonfil 1997, 1999; SAGARPA 2006).

El establecimiento de zonas de protección puede causar impacto sobre pesquerías distintas a la que se busca proteger y originar el fracaso de su implementación; por ejemplo, el Servicio Nacional de Pesquerías Marinas de EUA intentó cerrar las áreas de crianza de tiburones a la pesca, pero esta medida fue rechazada debido a la falta de investigación sobre el tema y al efecto adverso que tendría sobre la pesquería de camarón. Este mismo problema se presentó en Australia al momento de tratar de implementar AMPs para *Squalus acanthias*, debido a que éste es capturado frecuentemente de manera incidental en redes de arrastre (Castro 1993, Bonfil 1999). La misma situación se podría presentar en el Golfo de California en el caso de que se quisieran implementar zonas de protección para *Squatina californica*, *M. lunulatus*, *M. henlei* e individuos jóvenes de otras especies como *Sphyrna lewini* y *S. zygaena*, ya que estas especies quedan constantemente atrapados en las redes de enmalle usadas para la captura de escama (Anislado y Robinson 2001, Pérez-Jiménez y Sosa-Nishizaki 2008).

En cuanto al conocimiento de las áreas de crianza en el Golfo de California, no se cuenta con un análisis de la estructura de tallas de hembras grávidas y de neonatos, ni de sus movimientos locales o estacionales (Heupel *et al.* 2007). En cuanto al tiempo de residencia de los neonatos, se desconoce si las zonas son primarias o secundarias; o con respecto al grado de exposición a depredadores, si las áreas son zonas protegidas o abiertas (Bass 1978, Branstetter 1990, Heupel *et al.* 2007). Por ello, cabe aclarar que hace falta información para poder proponer sitios de conservación con base en criterios biológicos robustos basados en la abundancia, residencia y uso interanual de estos sitios por organismos jóvenes; por ende, la propuesta de manejo que aquí se presenta es heurística y puede estar lejos de garantizar a una verdadera protección. Sin embargo, los reportes de las diversas fuentes bibliográficas revisadas (ver tabla 3) indican la presencia de neonatos y hembras grávidas, por lo que no se pueden descartar definitivamente como hábitats críticos dado que no se sabe la cantidad de individuos examinados en los estudios de biología reproductiva, y es posible que algunos de ellos hayan sido capturados en su ruta migratoria estacional (corredor) o que las artes de pesca no fueran selectivas para los neonatos, lo cual podría ser el caso para la bibliografía que señala pocos individuos encontrados. Por ello es importante que cuando se realicen investigaciones de este tipo se incluyan datos cuantitativos y se analice la estructura de tallas de hembras grávidas y neonatos para saber si realmente se trata de un área de crianza (Beck *et al.* 2001, Heupel *et al.* 2007).

En la Norma Oficial Mexicana NOM-029-PESC-2006 se establecen el complejo Bahía Santa María-Altata y la Bahía de Teacapán, en Sinaloa, y los bajos Gorda y Espíritu Santo, en BCS como zonas de refugio para proteger la reproducción y el nacimiento de tiburones en el Golfo de California (SAGARPA 2007a) lo cual difiere de nuestros resultados, ya que solamente coincide en cuanto a la zona adyacente a Teacapán; sin

out by CONABIO-CONANP-TNC-PRONATURA (2007) that addresses the preservation of marine biodiversity, ecosystems, and relevant ecological processes, and that of SEMARNAT (2006).

The bases for implementing PNAs are established in the General Law on Ecological Equilibrium and Environmental Protection, and in its bylaws (SEMARNAP 1988, 2000b). It is the federal government's duty to determine the legal feasibility of implementing priority areas for the conservation of sharks, based on scientific research conducted by the Ministry of Environment and Natural Resources (SEMARNAT), in collaboration with other public or private institutions. These sites could be designated Flora and Fauna Protection Areas (ecological MPAs) to preserve ecosystems and fragile processes according to the resolutions in the sixth section of the General Law for Sustainable Fishing and Aquaculture (LEGEPAS, article 36), with a respective management plan, whereas from a fishery viewpoint, technically they would be fishery refuge areas or marine reserves (LEGEPAS, article 32). The application of this type of conservation strategy can be compatible with any resource management plan since the guidelines generated by the UN's Food and Agriculture Organization (FAO) consider the protection of critical habitats and vulnerable species, which would be covered by the conservation criteria used in the complementarity analysis (SEMARNAP 1988, 2000a, b; FAO 2001; SAGARPA 2007a, b).

embargo, la ley no incluye la mayoría de las zonas prioritarias de manejo descritas en la presente propuesta heurística (fig. 3), quedando fuera sitios que se consideraron muy importantes en este estudio como Mazatlán, en Sinaloa; El Sargento, La Ventana y Punta Arenas, en BCS; el área marina San Francisquito-El Barril, en BC; y la zona seri, Bahía Kino y La Manga, en Sonora. Esto se debe a que la información disponible del número de hembras grávidas y neonatos en las fuentes compiladas y revisadas no es lo suficientemente robusta para identificar áreas de crianza con el enfoque cuantitativo actual (Heupel *et al.* 2007), ya que los datos necesarios para determinar estos hábitats esenciales en el Golfo de California han sido interpretados de manera amplia y liberal, y están basados en definiciones cualitativas con criterios insuficientes que solamente hacen referencia a la presencia de estos organismos (Heithaus 2007, Heupel *et al.* 2007, Kinney y Simpfendorfer 2009) (tabla 3). Por ejemplo, en la tabla 3 se presentan las características de las historias de vida de 14 especies, de las cuales sólo de seis se cuenta con información cualitativa y cuantitativa de estos estadios. Aún así los registros son limitados para poder identificar a una zona como área de crianza de tiburones de forma precisa. Por eso en la NOM-029-PESC-2006 aparece un número limitado de zonas de refugio, debido a que la información con que se contaba al momento de su formulación era sumamente escasa.

Además de lo anterior, a partir de la comparación de los cuadrantes prioritarios para manejo encontrados en el presente estudio con la ubicación de las áreas naturales protegidas (ANPs) del Golfo de California, se observó que sólo 16.7% de las zonas aquí definidas como prioritarias para tiburones son parte de una ANP (fig. 3); tal es el caso de la zona de San Francisquito y El Barril, que son sitios que están contemplados dentro del Parque Nacional Archipiélago de San Lorenzo (SEMARNAT 2006). Sin embargo, el análisis de discrepancias identificó una serie de nuevas áreas importantes que coinciden con otras propuestas derivadas de investigaciones realizadas por el gobierno federal mexicano, como la de CONABIO-CONANP-TNC-PRONATURA (2007) que está enfocada en la preservación de la biodiversidad marina, ecosistemas y procesos ecológicos relevantes, y la del Programa de Ordenamiento Ecológico Marino del Golfo de California (SEMARNAT 2006).

En la Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente, y en su reglamento, se establecen las bases para la implementación de ANPs (SEMARNAP 1988, SEMARNAP 2000b). Evaluar la factibilidad jurídica de implementar zonas prioritarias para la conservación de tiburones es una atribución del gobierno federal que debe basarse en estudios científicos elaborados por la SEMARNAT y con la colaboración de organizaciones públicas o privadas. Estos sitios podrían ser designados como Áreas de Protección de la Flora y la Fauna (tipo de AMP ecológica) para conservar ecosistemas y procesos frágiles en compatibilidad con las disposiciones del título sexto de la Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables (LEGEPAS), artículo 36, con un plan de manejo respectivo; mientras

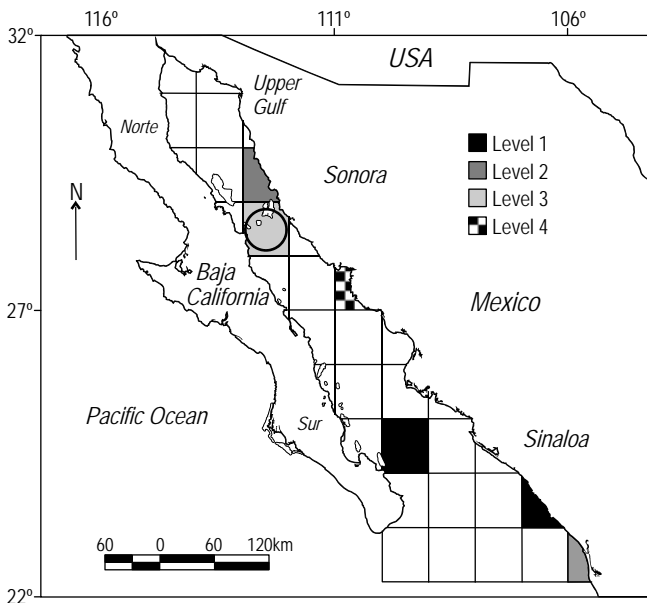


Figure 3. Hierarchy levels for the management of breeding areas and gap analysis of the priority areas. The circle indicates the only quadrant that includes a Protected Natural Area (San Lorenzo Archipelago Marine National Park).

Figura 3. Niveles de jerarquía para el manejo de las áreas de reproducción y "análisis de huecos" de las zonas prioritarias. El círculo señala el único cuadrante en el que está incluida un Área Natural Protegida (Parque Nacional Marino Archipiélago de San Lorenzo).

This study clearly showed the lack of quantitative information necessary to more accurately identify shark nursery areas in the Gulf of California according to the scheme proposed by Heupel *et al.* (2007). Moreover, the analysis indicated that regional knowledge is based on concepts supported by observations that were not originally designed to examine the functions of these essential habitats (Kinney and Simpfendorfer 2009). These areas should thus be subjected to oceanographic, biological, and fishery research, preferably including pilot neonatal shark mark-recapture programs, stable isotope analyses in young organisms, acoustic monitoring programs, and the application of genetic techniques to determine the fidelity and interannual use of the sites. It is also necessary to examine in detail the influence of the physical characteristics of the environment (water temperature and habitat structure) on young organisms and determine the historical degradation caused by anthropogenic activities in the region (Heithaus 2007, Heupel *et al.* 2007). To achieve these research and monitoring objectives, which would generate more robust databases for management through MPAs, it is necessary to apply conservation measures as soon as possible given the condition of the populations. The model proposed to determine priority conservation areas for sharks based on complementarity analysis is applicable, with possible implications and modifications, to other regions and other K-strategy organisms (i.e., organisms that produce fewer offspring, each of which has a relatively high probability of surviving to adulthood, slow growth rates, late sexual maturity, etc.). Though the protection strategy for priority shark mating and nursery areas proposed here is not the only option for their conservation, it is a useful tool for the recovery of elasmobranchs; however, for the elaboration of better management plans, it must be complemented with actions that favour the protection of the different age classes.

Acknowledgements

This study was supported by the Mexican Council for Science and Technology (CONACYT scholarship 8736). We thank the Autonomous University of Baja California Sur for the facilities provided and L Castillo-Geniz for his valuable comments and suggestions.

English translation by Christine Harris.

References

- Alejo-Plata C, Gómez-Márquez J, Ramos S, Herrera E. 2007. Presencia de neonatos y juveniles del tiburón martillo *Sphyrna lewini* (Griffith & Smith 1834) y del tiburón sedoso *Carcharhinus falciformis* (Müller & Henle 1839) en la costa de Oaxaca, México. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.* 42(3): 403–413.
- Álvarez-Borrego S, Rivera J, Gaxiola-Castro G, Acosta-Ruiz M, Schwartzlose R. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Cienc. Mar.* 5(2): 53–71.
- Álvarez-Borrego S, Schwartzlose R. 1979. Masas de agua del Golfo de California. *Cienc. Mar.* 6: 43–63.

que desde el punto de vista pesquero técnicamente serían zonas de refugio pesquero o reservas marinas (artículo 32 de la LEGEPAS). La aplicación de este tipo de estrategia de conservación puede ser compatible con cualquier plan de manejo del recurso debido a que los lineamientos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) prevén la protección de hábitats críticos y especies vulnerables, lo cual quedaría cubierto con los criterios de conservación utilizados en los análisis de complementariedad (SEMARNAP 1988, 2000a, b; FAO 2001; SAGARPA 2007a, b).

Finalmente, con el presente trabajo se puso de manifiesto que no existe suficiente información de tipo cuantitativo fundamental para identificar áreas de crianza de tiburones en el Golfo de California más precisas con el enfoque que actualmente manejan Heupel *et al.* (2007); además, el análisis reflejó que el conocimiento regional del tema está basado en conceptos sustentados con observaciones que en un principio no estaban diseñadas para examinar las funciones de estos hábitats esenciales (Kinney y Simpfendorfer 2009), lo que indica que las posibles áreas deben ser sujetas a investigación oceanográfica, biológica y pesquera que incluya preferentemente programas pilotos de marcado y recaptura de tiburones neonatos, análisis de isótopos estables en individuos jóvenes, monitoreo acústico, y la aplicación de técnicas genéticas para comprobar la fidelidad y el uso interanual de los sitios. Además, es necesario conocer a detalle la influencia de las características físicas del ambiente (temperatura del agua y estructura del hábitat) sobre los organismos jóvenes y desarrollar estudios que describan la degradación histórica causada por actividades antrópicas en la zona (Heithaus 2007, Heupel *et al.* 2007). Sin embargo, para alcanzar tales objetivos de investigación y monitoreo, los cuales podrían generar las bases de datos más robustos para el manejo mediante AMPs, es necesario aplicar medidas de conservación a la mayor brevedad posible debido al estado que guardan las poblaciones. El modelo propuesto para determinar zonas prioritarias de conservación para tiburones a partir de análisis de complementariedad es aplicable, con posibles implicaciones y modificaciones, en otras regiones y para otros organismos considerados estrategias K; esto es, que producen pocas crías con mayor probabilidad de llegar a adultos, tienen tasas de crecimiento lentas, madurez sexual tardía, etc. Aunque la estrategia de protección de áreas prioritarias de crianza y reproducción para tiburones aquí planteada no es la única opción para su conservación, si resulta una herramienta útil para la recuperación de los elasmobranchios, pero para la elaboración de mejores planes de manejo es necesario complementarla con acciones que favorezcan la protección de las diferentes clases de edad.

Agradecimientos

La presente investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (becario número 8736). Agradecemos a la Universidad Autónoma de Baja California Sur las facilidades brindadas durante la elaboración de este

- Anislado V. 2008. Demografía y pesquería del tiburón martillo, *Sphyrna lewini* (Griffith y Smith 1834) (Pisces: Elasmobranchii), en dos provincias oceanográficas del Pacífico mexicano. Ph.D. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 252 pp.
- Anislado V, Robinson C. 2001. Edad y crecimiento del tiburón martillo *Sphyrna lewini* (Griffith y Smith 1834) en el Pacífico central de México. *Cienc. Mar.* 27(4): 501–520.
- Arias A. 1998. Regionalización del Golfo de California: Una propuesta a partir de concentración de pigmentos fotosintéticos. B.Sc. dissertation, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México, 57 pp.
- Bass AJ. 1978. Problems in studies of sharks in the southwest Indian Ocean. In: Hodgson ES, Mathewson RF (eds.), *Sensory Biology of Sharks, Skates and Rays*. Office of Naval Research, Department of the Navy, Arlington, pp. 545–594.
- Beck MW *et al.* 2001. The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates. *BioScience* 51: 633–641.
- Bernal T. 1999. Observaciones sobre la biología de *Carcharhinus obscurus* (LeSueur 1818) y *Carcharhinus limbatus* (Valenciennes 1839) (Pises: Carcharhinidae) en el Golfo de California. B.Sc. dissertation, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México, 55 p.
- Bizarro J, Smith W, Hueter R, Tyminski J, Márquez-Farías JF, Castillo-Géniz JL, Cailliet GM, Villavicencio-Garayzar CJ. 2007. The status of shark and ray fishery resources in the Gulf of California: Applied research to improve management and conservation. Report to the David and Lucille Packard Foundation, 237 pp.
- Blanco-Parra MP, Galván-Magaña F, Márquez-Farías F. 2008. Age and growth of the blue shark, *Prionace glauca* Linnaeus 1758, on the northwest coast off Mexico. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.* 43(3): 513–520.
- Bonfil R. 1997. Status of shark resources in the southern Gulf of Mexico and Caribbean: Implications for management. *Fish. Res.* 29(2): 101–117.
- Bonfil R. 1999. Marine protected areas as a shark fisheries management tool. In: Seret B, Sire J-Y (eds.), *Proc. 5th Indo-Pacific Fish Conference*, Noumea, 1997. Paris: Soc. Fr. Ichtyol., pp. 217–230.
- Branstetter S. 1990. Early life-history implications of selected carcharhinoid and lamnoid sharks of the northwest Atlantic. In: Pratt HL Jr, Gruber SH, Taniuchi T (eds.), *Elasmobranchs as Living Resources: Advances in Biology, Ecology, Systematics and the Status of the Fisheries*. NOAA Tech. Rep. 90, National Marine Fisheries Service, Silver Spring, MD, pp. 17–28.
- Cadena L. 2001. Biología reproductiva de *Carcharhinus falciformis* (Chondrichthyes: Carcharhiniformes: Carcharhinidae) en el Golfo de California. B.Sc. dissertation, Universidad Autónoma de Baja California Sur, 68 p.
- Camhi M, Fowler S, Musick J, Bräutigam A, Fordham S. 1998. Shark and their Relatives: Ecology and Conservation. IUCN Species Survival Commission, Occ. Pap. 20, 39 pp.
- Castillo J. 1990. Contribución al conocimiento de la biología y pesquería del cazón bironche, *Rhizoprionodon longurio* (Jordán y Gilbert 1882) (Elasmobranchii, Carcharhinidae), del sur de Sinaloa, México. B.Sc. dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México, 128 pp.
- Castillo-Géniz JL, Márquez-Farías JF, Cid del Prado-Vera A, Soriano-Velásquez SR, Corro-Espinosa D, Ramírez-Santiago C. 2000. Tiburones del Pacífico mexicano. Pesquería artesanal. In: *Sostenibilidad y Pesca Responsable en México: Evaluación y Manejo*. Instituto Nacional de la Pesca, SEMARNAP, pp. 127–151.
- Castillo-Géniz sus valiosas aportaciones y sugerencias al manuscrito.
-
- Castro J. 1993. The shark nursery of Bulls Bay, South Carolina, with a review of the shark nurseries of the southeastern coast of the United States. *Env. Biol. Fish.* 38: 37–48.
- Ceballos G. 2007. Conservation priorities for mammals in megadiverse Mexico: The efficiency of reserve networks. *Ecol. Appl.* 17: 569–578.
- CONABIO-CONANP-TNC-PRONATURA. 2007. Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina de México: Océanos, costas e islas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy-Programa México, Pronatura, México DF, 129 pp.
- CONAPESCA-INP. 2004. Plan de Acción Nacional para el Manejo y Conservación de Tiburones, Rayas y Especies Afines en México (PANMCT). SAGARPA, Mazatlán, México, 85 pp.
- Conde M. 2005. Aspectos de la biología reproductiva del tiburón mako *Isurus oxyrinchus* (Rafinesque 1810) en la costa occidental de Baja California Sur, México. B.Sc. dissertation, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México, 72 pp.
- Contreras-Medina R, Morrone J, Luna I. 2001. Biogeographic methods identify gymnosperm biodiversity hotspots. *Naturwissenschaften* 88: 427–430.
- Cudney R, Turk P. 1998. Pescando entre Mareas del Alto Golfo de California. CEDO AC, Puerto Peñasco, Sonora, México, 166 pp.
- Dahlgren C, Sobel J. 2000. Designing a Dry Tortugas ecological reserve: How big is big enough? *Bull. Mar. Sci.* 66: 707–719.
- ESRI. 1999. ArcView v3.2 GIS. Environmental Systems Research Institute, New York.
- Faith DP, Carter G, Cassis G, Ferner S, Wilkie L. 2003. Complementarity, biodiversity viability analysis and policy based algorithms for conservation. *Eviron. Sci. Pol.* 6: 311–328.
- FAO. 2001. La Ordenación Pesquera: Conservación y Ordenación del Tiburón. FAO orientaciones técnicas para la pesca responsable. Roma, 66 pp.
- FCRR. 1997. The Design and Monitoring of Marine Reserves. Pitcher T (ed.). Fisheries Centre Research Rep. 5(1).
- Fox NJ, Beckley LE. 2005. Priority areas for conservation of western Australian coastal fishes: A comparison of hotspot, biogeographical and complementarity approaches. *Biol. Conserv.* 126: 420–428.
- García-Pámanes J, Lara-Lara J. 2001. Pastoreo por el microzooplancton en el Golfo de California. *Cienc. Mar.* 27: 73–90.
- Geselbracht L, Torres R, Cumming GS, Dorfman D, Beck M, Shaw D. 2009. Identification of a spatially efficient portfolio of priority conservation sites in marine and estuarine areas of Florida. *Aquat. Conserv.: Mar. Freshwat. Ecos.* 19: 408–420.
- Guerrero L. 2002. Captura comercial de elasmobranchios en la costa suroccidental del Golfo de California, México. B.Sc. dissertation, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México, 54 pp.
- Hanchet S. 1988. Reproductive biology of *Squalus acanthias* from the east coast, South Island, New Zealand. *N.Z. J. Mar. Freshwat. Res.* 22(4): 537–549.
- Heithaus MR. 2007. Nursery areas as essential shark habitats: A theoretical perspective. In: McCandless CT, Kohler NE, Pratt HL Jr (eds.), *Shark Nursery Grounds of the Gulf of Mexico and the East Coast Waters of the United States*. American Fisheries Society, Symp. 50, Bethesda, Maryland, pp. 3–13.

- Heupel M, Simpfendorfer C. 2002. Estimation of mortality of juvenile blacktip sharks, *Carcharhinus limbatus*, with a nursery area using telemetry data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59: 624–632.
- Heupel M, Carlson J, Simpfendorfer C. 2007. Shark nursery areas: Concepts, definition, characterization and assumptions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 337: 287–297.
- Humphries C, Vane-Wright R, Williams P. 1991. Biodiversity reserves: Setting new priorities for the conservation of wildlife. *Park* 2: 34–38.
- ICSF (International Collective in Support of Fishworkers). 2001. India: La pesca de tiburones una veda mal pensada. SAMUDRA 30: 1–10.
- Kinney M, Simpfendorfer C. 2009. Reassessing the value of nursery areas to shark conservation and management. *Conserv. Lett.* 2: 530–60.
- Klimley AP, Cabrera-Mancilla I, Castillo LG. 1993. Descripción de los movimientos horizontales y verticales del tiburón martillo *Sphyrna lewini* del sur del Golfo de California, México. *Cienc. Mar.* 19: 95–115.
- Lund R. 1990. Chondrichthyan life history styles as revealed by the 320 million years old Mississippian of Montana. *Env. Biol. Fish.* 27: 1–19.
- Madrid J, Sánchez P, Ruiz A. 1997. Diversity and abundance of a tropical fishery on the Pacific shelf of Michoacán, Mexico. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 45: 485–495.
- Manjarrez C, Juárez F, Rodríguez J, González A, Díaz R, Lizárraga X, Vega A. 1983. Estudio sobre algunos aspectos biológicos-pesqueros del tiburón en la zona sur de Sinaloa. Memoria de Servicio Social, Universidad Autónoma de Sinaloa, 79 pp.
- Márquez F, Corro D, Castillo J. 2005. Observations on the biology of the Pacific sharpnose shark (*Rhizoprionodon longurio*, Jordan and Gilbert 1882), captured in southern Sinaloa, Mexico. *J. Northw. Atl. Fish. Sci.* 35: 107–114.
- Mendizábal D. 1995. Biología reproductiva, crecimiento, mortalidad y diagnóstico de *Alopias pelagicus* (tiburón zorro) y *Carcharhinus limbatus* (tiburón volador) de la boca del Golfo de California al Golfo de Tehuantepec (periodo 1986–1987). M.Sc. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 125 pp.
- Mendizábal, Oriza D, Vélez-Marín R, Soriano-Velásquez SR, Castillo-Géniz JL. 2000. Tiburones oceánicos del Pacífico. In: *Sustentabilidad y Pesca Responsable en México: Evaluación y Manejo*. Instituto Nacional de la Pesca, SEMARNAP, pp. 155–195.
- Nakano H. 1994. Age, reproduction and migration of blue shark in the North Pacific Ocean. *Bull. Nat. Res. Inst. Far Seas Fish.* 31: 141–256.
- Pérez-Jiménez JC, Sosa-Nishizaki O. 2008. Reproductive biology of the brown smoothhound shark *Mustelus henlei* in the northern Gulf of California, Mexico. *J. Fish Biol.* 73: 782–792.
- Pratt H, Casey J. 1990. Shark reproductive strategies as limiting factor in direct fisheries, with a review of Holden's method of estimating growth-parameter. *NOAA Tech. Rep. NMFS* 90: 97–108.
- Rodríguez ASL, Gaston KJ. 2002. Maximising phylogenetic diversity in the selection of networks of conservation areas. *Biol. Conserv.* 105: 103–111.
- Roberts CM, Bohnsack JA, Gell F, Hawkins JP, Goodridge R. 2001. Effects of marine reserves on adjacent fisheries. *Science* 294: 1920–1923.
- SAGARPA. 2006. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca. Cap. I: Producción pesquera. CONAPESCA 219: 13–100.
- SAGARPA. 2007a. Norma Oficial Mexicana NOM-029-PESC-2006. Pesca responsable de tiburones y rayas: Especificaciones para su aprovechamiento. *Diario Oficial de la Federación*, 14 de febrero de 2007, primera sección, 32 pp.
- SAGARPA. 2007b. Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables. *Diario Oficial de la Federación*, 24 de julio de 2007, primera sección, pp. 25–60.
- Sánchez J. 1977. Análisis de la pesquería del tiburón en la zona Seri, Sonora, México. B.Sc. dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México, 34 pp.
- Sarkar S *et al.* 2006. Biodiversity conservation planning tools: Present status and challenges for the future. *Ann. Rev. Environ. Res.* 31: 125–159.
- Saucedo C, Colado G, Martínez J, Burgos S, Chacón J, Espinoza J. 1982. Contribución al estudio de la pesquería del tiburón en la zona sur del estado de Sinaloa. Memoria del Servicio Social Universitario, Universidad Autónoma de Sinaloa, 68 pp.
- Scout J, Davis F, McGhie R, Wright R, Groves C, Estes J. 2001. Nature reserves: Do they capture the full range of America's biological diversity? *Ecol. Aplicat.* 11: 999–1007.
- SEMARNAP. 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. *Diario Oficial de la Federación*, 28 de enero de 1988, 96 pp.
- SEMARNAP. 2000a. Ley General de Vida Silvestre. *Diario Oficial de la Federación*, 3 de julio de 2000, segunda sección, 43 pp.
- SEMARNAP. 2000b. Reglamento de la Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Áreas Naturales Protegidas. *Diario Oficial de la Federación*, 30 de noviembre de 2000, primera sección, 44 pp.
- SEMARNAT. 2006. Programa de Ordenamiento Ecológico Marino del Golfo de California. Ed. Discover, 138 pp.
- Simpfendorfer C, Milward N. 1993. Utilisation of a tropical bay as a nursery area by sharks of the families Carcharhinidae and Sphyrnidae. *Environ. Biol. Fish.* 37: 337–345.
- Smith WD, Bizarro JJ, Cailliet GM. 2009. La pesca artesanal de elasmobranchios en la costa oriental de Baja California, México: Características y consideraciones de manejo. *Cienc. Mar.* 35: 209–236.
- Springer S. 1967. Social organization of shark populations. In: Gilbert PW, Metheson RF, Rall DP (eds.), *Sharks, Skates and Rays*. Johns Hopkins Press, Baltimore, pp. 149–174.
- Stone BR, Bailey CM, McLaughlin AS, Mace MP, Schulze MB. 1998. Federal management of Atlantic shark fisheries. *Fish. Res.* 39: 215–221.
- Tognelli MF, Silva-García C, Labra FA, Marquet PA. 2005. Priority areas for the conservation of coastal marine vertebrates in Chile. *Biol. Conserv.* 126: 420–428.
- Torres A. 1999. Observaciones sobre la biología reproductiva de la cornuda barrosa *Sphyrna lewini* (Griffith y Smith 1834) (Pises: Sphyrnidae) en aguas del noroeste de México. B.Sc. dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México-ENEPI, 68 pp.
- Turpie JK, Beckley LE, Katua SM. 2000. Biogeography and the selection of priority areas for conservation in South African coastal fishes. *Biol. Conserv.* 92: 59–72.
- Van Jaarsveld AS *et al.* 1998. Biodiversity assessment and conservation strategies. *Science* 279: 2106–2108.
- Vane-Wright R, Humphries C, Williams P. 1991. What to protect? Systematics and the agony of choice. *Biol. Conserv.* 55: 235–254.
- Vázquez R. 2003. Aspectos biológicos de tiburones y rayas en la costa del centro y sur de Sinaloa, en invierno y primavera. B.Sc. dissertation, Universidad Autónoma Metropolitana, México, 103 pp.
- Villavicencio C. 2000. Áreas de crianza de tiburones en el Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Informe Final SNIB-CONABIO proyecto L054, México.
- Villavicencio-Garayzar CJ. 1996a. Aspectos poblacionales del angelito, *Squatina californica* (Ayres), en Baja California,

- México. Rev. Invest. Cien. Ser. Cienc. Mar. UABCS 7(1–2): 15–21.
- Villavicencio-Garayzar CJ. 1996b. Reproducción de *Carcharhinus obscurus* (Pises: Carcharhinidae) en el Pacífico nororiental. Rev. Biol. Trop. 4: 141–153.
- Villavicencio-Garayzar CJ. 1996c. Pesquería de tiburón y cazón. In Casas-Valdez M, Ponce-Díaz G (eds.), Estudio del Potencial Pesquero y Acuícola en Baja California Sur. SEMARNAP, Gob. del estado de Baja California Sur, FAO, UABCS, CIBNOR, CICIMAR, INP CETMAR, México, pp. 305–316.
- Walker T. 1992. Fishery simulation model for sharks applied to the gummy shark, *Mustelus antarticus* (Günther), from southern Australian waters. Aust. J. Mar. Freshwat. Res. 43: 195–212.
- Zayas J. 1998. Biología reproductiva del tiburón ángel *Squatina californica* (Ayres 1859) (Pises: Squatinidae) en el Golfo de California. B.Sc. dissertation, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México, 49 pp.

*Recibido en mayo de 2008;
aceptado en octubre de 2009.*