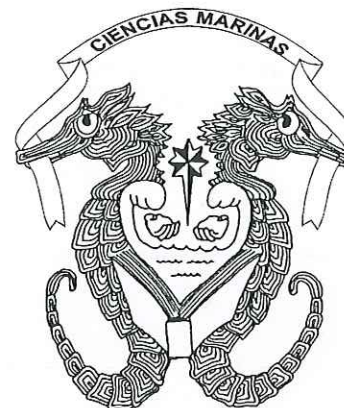

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**

POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA



**ESTATUS ACTUAL DE UNA ESPECIE EN PELIGRO DE
EXTINCIÓN, LA VAQUITA (*Phocoena sinus*): UNA
APROXIMACIÓN POBLACIONAL CON MÉTODOS ACÚSTICOS Y
BAYESIANOS**

TESIS

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS
NECESARIOS PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**

PRESENTA

ARMANDO MARTÍN JARAMILLO LEGORRETA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. ABRIL DE 2008

ESTATUS ACTUAL DE UNA ESPECIE EN PELIGRO DE EXTINCIÓN, LA VAQUITA (*Phocoena sinus*): UNA APROXIMACIÓN POBLACIONAL CON MÉTODOS ACÚSTICOS Y BAYESIANOS

RESUMEN

La vaquita (*Phocoena sinus*) es la especie de pequeño cetáceo en mayor peligro de extinción alrededor del mundo, y su hábitat se restringe a una porción del Alto Golfo de California. La vaquita ha experimentado, desde los años 1940, una captura incidental en redes de pesca (totoaba, camarón, chano, tiburones, rayas, sierra y macarela). Esta captura, que se estima continua hasta hoy día, ha puesto a la vaquita en un grave peligro de extinción. Algunas acciones se han tomado encaminadas a su recuperación, tal como el decreto de la "Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado" y la instauración del "Comité Internacional para la Recuperación de la Vaquita" (CIRVA). Dicho Comité tuvo como mandato crear un plan de recuperación efectivo, que tomara en cuenta no sólo a la especie en sí, sino a las comunidades pesqueras de la región. En 1997, a recomendación del CIRVA, se estimó la abundancia de la vaquita en un esfuerzo cooperativo entre los gobiernos de México y Estados Unidos. El resultado de 567 individuos (I.C. 95% 173-1077) ya indicaba lo mermado de la población, según los criterios usados por la comunidad internacional. Por otro lado, los niveles de captura incidental conocidos indicaron que la población debería estar sufriendo tasas de mortalidad mayores a su capacidad reproductiva. Con el fin de sentar bases cuantitativas, que permitan definir el estatus actual de la especie, así como metas de manejo, en esta tesis se realizó un trabajo de análisis poblacional teniendo a conocer la distribución, uso de hábitat, nivel de reducción y tendencias de la población. Dado que las técnicas tradicionales basadas en la búsqueda visual de organismos en su hábitat no son efectivas para la vaquita, se aplicaron técnicas acústicas pasivas de detección. Entre 1997 y 2007 se realizaron 15 cruceros para la obtención de datos de campo. La variable obtenida fue tasa de encuentro acústico medida como número de detecciones por hora. La distribución de esta variable indica que la vaquita habita una pequeña porción en el occidente del Alto Golfo, cerca del poblado de San Felipe, B.C., durante todo el año. La tendencia en el tiempo de esta variable indica una reducción, lo que debe estar asociado a una reducción de la densidad poblacional, dado que lo que se detecta son los sonidos emitidos por las vaquitas. Utilizando esta información, así como datos generados sobre captura incidental de vaquita, esfuerzo pesquero, y un modelo poblacional sin estructura, se modeló la historia poblacional de la especie desde el inicio de su captura en redes hasta la actualidad. Se utilizó un marco bayesiano de estimación, utilizando la información previa conocida del problema. El principal hallazgo es que, con 90% de credibilidad, la población actual es menor a 10% de la población histórica. Si se logra eliminar por completo su captura en redes, su recuperación a niveles de máxima productividad neta podría tomar no menos de 50 años. Estos resultados indican la urgencia de tomar medidas efectivas para evitar su extinción.

CURRENT STATUS OF AN ENDANGERED SPECIES, THE VAQUITA (*Phocoena sinus*): A POPULATION APPROACH WITH ACOUSTICS AND BAYESIAN METHODS

ABSTRACT

The vaquita (*Phocoena sinus*) is the small cetacean species in the highest risk of extinction around the world, and its habitat is restricted to a portion of the Upper Gulf of California. The vaquita has been subjected, since the 1940's, to by-catch in fishing gill and mesh nets (totoaba, shrimp, chano, sharks, rays, sierra and mackerel). This by-catch, that is estimated continues until nowadays, has taken vaquita to a much endangered status. Some actions have been taken addressed to its recovery, as such the decree of the "Biosphere Reserve Upper Gulf of California and Colorado River Delta" as well as the establishment of the International Committee for the Recovery of Vaquita (CIRVA for its acronym is Spanish). Such Committee was instructed to design an effective recovery plan, which takes into account not only the vaquita, but the fishing communities in the region. In 1997, as recommended by CIRVA, it was estimated the abundance of vaquita under cooperative efforts of the U.S.A. and Mexico governments. The result of 567 individuals alone (95% C.I. 173-1077) already indicated the damaged the population was, as evaluated by international criteria. In addition to, the known by-catch levels, indicated that population must has been undergoing mortality rates higher than reproductive capabilities. With the aim to establish quantitative basis, that allow the definition of the current status of the species, as well as recovery goals, in this thesis it is presented a population analysis addressed to investigate the distribution, habitat use, depletion level and population trends. Due that traditional techniques based on sightings are unreliable to study vaquita, it was applied passive acoustic techniques as a reliable alternative. Between 1997 and 2007 it was performed 15 surveys to obtain field data. The variable obtained was acoustic detection rate, measured as number of vaquita detections per hour. The geographical distribution of this variable shows that vaquita inhabits an small area in the west of the Upper Gulf, near from San Felipe, B.C., all year round. The trend of this variable with time shows a reduction, which must be associated with a population density reduction, due that the signals detected are emitted by vaquitas. Using this information, as well as data on by-catch, fishing effort and an unstructured population model, it was modeled the population history of the species since time when it was by-caught for first time until nowadays. It was used a Bayesian framework of estimation, using the available prior information. The main finding is that, with 90% credibility, the current abundance is lower than 10% the historical population. If it is possible to avoid further mortality in nets, the recovery of the population up to levels of maximum net productivity can take no less than 50 years. These results indicate the extreme urgency to take effective measures to avoid its extinction.

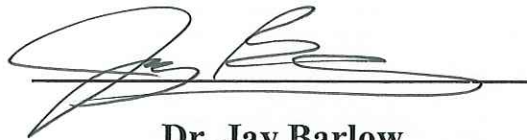
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**ESTATUS ACTUAL DE UNA ESPECIE EN PELIGRO DE EXTINCIÓN,
LA VAQUITA (*Phocoena sinus*): UNA APROXIMACIÓN
POBLACIONAL CON MÉTODOS ACÚSTICOS Y BAYESIANOS**

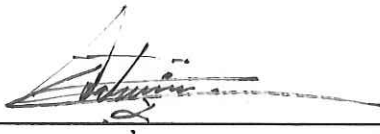
**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS**

Aprobada por:



Dr. Jay Barlow

Director de Tesis



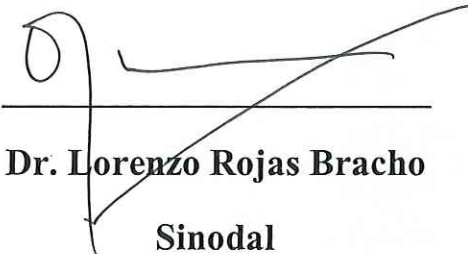
Dr. Eduardo Santamaría del Ángel

Sinodal



Dr. Tim Gerrodette

Sinodal



Dr. Lorenzo Rojas Bracho

Sinodal



Dr. Roberto Millán Núñez

Sinodal

A mis hijos y esposa, Keka, Iván y Edws, gracias por años de arrebatadora felicidad

Mamí, ya llegamos, te amo

Bertitas, la adoro

Tía Lipa, aquí estoy para tí

AGRADECIMIENTOS

Sería un completo despropósito decir que una sola persona es la responsable de que un trabajo como este se haya podido concluir. La vaquita es un tema de prioridad que debe rebasar egos o pretensiones individuales. Debe ser, más bien, un factor que detone el desarrollo de la Región del Alto Golfo de California, como ejemplo de manejo sustentable y uso responsable de los recursos naturales.

En ese sentido es que debo, al menos tratar, de incluir y nombrar aquí a todas aquellas personas e instituciones que colaboraron para que este trabajo culminara. Por facilidad proseguiré en orden cronológico. Lorenzo Rojas Bracho, jefe y amigo, ha sido definitivamente el luchador incansable en favor de la vaquita. Gracias a sus buenas gestiones se logró la construcción de la embarcación *Koipai Yú-Xá*, abordo de la cual logré realizar la última fase de cruceros que sustentan este trabajo de Tesis. A él le debo gran parte de este trabajo. Gracias chief.

En 1997 llegó a nosotros, el Programa Nacional de Investigación y Conservación de Mamíferos Marinos del Instituto Nacional de la Pesca (PNICMM-INP), la oportunidad de probar un equipo de detección acústica de marsopas para el estudio de la vaquita. Jonathan Gordon, en ese tiempo en IFAW-UK, accedió y facilitó que se realizara la prueba con un grupo de investigadores que vino a México, entre los que estaban Kit y Jese Rodgers y Oliver Chappell, este último el ingeniero que diseñó el equipo. La prueba fue exitosa y un equipo se quedó en México para iniciar un proyecto de investigación de uso de hábitat con técnicas de detección acústica pasiva, proyecto que quedó bajo mi responsabilidad gracia a Lorenzo Rojas.

El apoyo que brindó Antonio Díaz de León, Director del INP en esas fechas, fue vital para el desarrollo e la investigación de la especie. Su visión del problema, mezclando perfectamente los puntos de vista científicos y políticos, fue de gran valía y enseñanza. Dentro del INP el PNICMM estaba bajo la dirección de Oscar Ramírez, quien desde entonces ha sido un incansable trabajador en favor de los recursos naturales mexicanos, así como interminable fuente de bomberazos. Gracias carnal.

Desde 1997 hasta el 2001 el matrimonio Sommers de San Felipe, B.C., fue el apoyo clave para la realización del trabajo de campo, ya que amablemente nos ofrecieron el uso de sus dos embarcaciones, el *Viento Loco* y el *Pasaporte* a precios de operación. El capitán de estas embarcaciones, Armando Peralta, con el tiempo se hizo amigo y querido San Felipense. El y su familia, Lolis, Armandito y Adolfo, fueron siempre fraternales y solidarios con nosotros. Armando nos permitió el uso del *Pasaporte* hasta el 2002, cuando dejó la compañía y lamentablemente se alejó del mar.

En 1999 Jonathan Gordon y Doug Gillespie visitaron el Alto Golfo de California para probar la segunda generación del detector acústico. Fue una campaña de gran aprendizaje, ya que Jonathan es una de las personalidades en el mundo sobre bioacústica de cetáceos y Doug es un experto en el diseño de equipo y software de detección acústica. Él, junto con Oliver Chappell, son los ingenieros que diseñaron la segunda generación del detector. Doug y Jonathan, desde entonces, han sido valiosos asesores.

Desde 1997, cuando era subdirector de la *Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado*, y desde hace varios años en su calidad de Director, José Campoy ha sido un desinteresado y ferviente luchador de la Reserva y la vaquita. Son incontables las

ocasiones en que José me ha brindado apoyo, consejos, información y tips. Gracias amigazo. Paco Valverde, representante de la Reserva en San Felipe, ha sido también un punto de apoyo, siempre ayudándonos durante nuestras estancias en el puerto. Su familia, pescadores de abolengo, calidad y sensibilidad, son muestra de que se puede explotar recursos naturales en comunión con la ciencia, la política, la administración de recursos y la sabiduría pesquera. Para todos ellos mi reconocimiento.

En el año 2000 WWF-US nos brindó apoyo para el inicio de cruceros utilizando el detector acústico. Con este financiamiento es que logramos rentar el *Viento Loco* y el *Pasaporte* para los cruceros. En particular agradezco a Karen Baragona este apoyo, así como a Carlos Manterola y Ricardo Medina de Unidos para la Conservación por el siempre desinteresado y entusiasta apoyo con la administración de este recurso. En 2001 recibimos otro apoyo del Programa UC-MEXUS – CONACyT – CICESE para el Delta del Colorado y Alto Golfo de California. Mucho agradezco las finas atenciones de la Dra. Andrea Kauz, que mostró siempre un gran interés por la vaquita.

En 2002 recibimos un apoyo más de la Comisión de Mamíferos Marinos de los Estados Unidos (US-MMC) para continuar con los cruceros. Es en este momento cuando conozco a Tim Ragen, hoy día el flamante comisionado, y que siempre, siempre, nos ha mostrado su amistad y decisión en pos de la vaquita. No tengo forma de agradecerle tanta confianza. Con el apoyo que la US-MMC nos brindó en 2003 es que estuvimos en condiciones de finalizar la construcción de un barco de investigación que actualmente usamos para la investigación de la vaquita y que les ha servido a algunos otros investigadores.

En el 2003 llegaron a nosotros verdaderos ángeles a nombre de IFAW México. Definitivamente no hay palabras para explicar el impulso que recibió el proyecto gracias a su ayuda. Entre Betina, Marce, Joaquín y todos en IFAW nos han sacado a flote en variadas ocasiones. Baste decir que IFAW fue el principal apoyo para la construcción de mi querido barco, casi mi hijo, el Koipai Yú-Xá. Muchos dolores de cabeza le causó a IFAW, pero finalmente anda y actualmente todavía nos apoyan con su mantenimiento, aspecto fundamental. La única forma de pagarles realmente es con el compromiso de un buen trabajo. Espero que lo estemos logrando. Gracias mis ángeles de la guarda.

Una mención especial merecen los miembros del CIRVA, quienes en el seno de este comité han desarrollado en forma estructurada la información científica que ha sido la base para la confección del plan de recuperación. La experiencia adquirida durante las ya tres reuniones de este comité ha sido invaluable en mi desarrollo profesional.

Así mismo, he de expresar mi profundo agradecimiento al Instituto Nacional de Ecología, institución para la que trabajo desde hace algunos años y en la que he encontrado gente valiosa e interesante. En los inicios su presidente, el Dr. Exequiel Ezcurra y mi jefe Gerardo Bocco fueron ejemplo de profesionalismo y humanismo. En su nueva etapa, Adrián Fernández su presidente, Ana Córdoba nuestra directora, Eduardo Peters nuestro director de área y todo el grupo del segundo piso han sido la base en la cual se ha cimentado nuestro grupo de investigación. Sin su decidido apoyo no seríamos nada. Dos personas nos han mostrado paciencia infinita y al final ayuda extrema y desinteresada. Manuel Valencia, que haríamos sin ti. Gloria Portales, cómo te extrañamos.

Un agradecimiento infinito a los co-autores del paper que sirvió como requisito para la obtención del grado: Lorenzo Rojas, Bob Brownell, Andy Read, Randy Reeves, Kathy Ralls y Barb Taylor. Debo decir que colaborar en la escritura de este artículo ha sido una de las experiencias más enriquecedoras e interesantes. En particular las discusiones con Barb las gocé por su intensidad y contenido. Gracias Barb.

Mi Comité de Tesis incluyó a Jay Barlow y Tim Gerrodette, del SWFSC en San Diego. Jay como mi director y Tim como mi sinodal (y director en la maestría) han sido la base científica necesaria para mejorar y afinar este trabajo. Les estaré eternamente agradecido por su formalidad y rigor científico. Ha sido un gran aprendizaje y gratas horas de intercambio científico.

Cuando el análisis bayesiano se cruzó en mi camino un gurú llegó a Ensenada. Carlos Álvarez, recién desempleado de Washington, llegó a vivir a Ensenada y desde entonces me ha servido de profesor, pañuelo y gurú. Carnal muchas gracias, sin tu apoyo hubiera sido mucho más difícil. Por cierto niños, no traten de aprender ADMB sólo leyendo el manual, mínimo necesitan los apuntes de Andre Punt y mejor su gurú particular.

Roberto Millán y Eduardo Santamaría aceptaron ser mis otros sinodales. Mucho he de agradecer su paciencia, apoyo y confianza. A Angélica no hay forma de agradecerle su siempre pronta disposición para ayudarme en tantos trámites. A la UABC en su conjunto, gracias por permitirme la oportunidad de formarme en esta etapa de mi desempeño profesional.

No me puedo olvidar del famoso Juan 23, el capitán del Koipai y compañero de ya muchas aventuras abordo, incluso una noche al garete en medio del Alto Golfo. El, todo un personaje, y su familia, los siento ahora como la mía por las tantas atenciones que me han tenido. A Juan y Malú muchas gracias.

Mucho agradezco la beca 93214 que CONACyT me otorgó y que me permitió sobrevivir en años duros.

Por último e igual de importante, Edws, mi amada esposa, ha estado encargada de los cruceros en los últimos tiempos. Siempre admiraré la forma en que se desempeña abordo, no hay mejor jefe de crucero que ella. Además, como nuestra administradora, es nuestro ángel de la guarda. El factor femenino que faltaba en la oficina. Gracias beba.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen.....	i
Abstract	ii
Página de aprobación	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Tabla de contenidos.....	viii
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras.....	xii

CAPÍTULO I.- LA VAQUITA (*Phocoena sinus*): UNA ESPECIE AMENAZADA

INTRODUCCIÓN	1
Estatus de la vaquita.....	1
Esfuerzos recientes para la recuperación de la vaquita.....	4
Necesidades para el Plan de Recuperación de la Vaquita.....	6
OBJETIVO.....	7
Objetivos Específicos.....	7

CAPÍTULO II. USO DE HÁBITAT Y TENDENCIA POBLACIONAL DE LA VAQUITA: UNA APROXIMACIÓN ACÚSTICA.....

INTRODUCCIÓN	8
METODOLOGÍA	13
Bioacústica de marsopas y vaquita	13
Equipo de detección acústica	13
Diseño de muestreo.....	15
Análisis de datos	21
Identificación de encuentros acústicos con vaquitas	21
Interpretación de los datos de CTD.....	23
Tendencia de la serie de tiempo de la tasa de encuentro acústico	24
RESULTADOS.....	28
Esfuerzo	28

Encuentros acústicos y tasa de encuentro acústico	31
Datos de CTD.....	32
Tendencia de la serie de tiempo de la tasa de encuentro acústico	33
DISCUSIÓN	37
Proceso de muestreo.....	37
Distribución.....	47
Implicaciones del patrón de distribución	49
Tendencias poblacionales recientes evidenciadas por la tasa de detección acústica.....	51
CONCLUSIÓN	54

CAPÍTULO III. ESTATUS ACTUAL DE LA POBLACIÓN DE LA VAQUITA: UNA APROXIMACIÓN BAYESIANA UTILIZANDO DATOS BIOLÓGICOS Y PESQUEROS DISPONIBLES

INTRODUCCIÓN	55
OBJETIVO.....	59
MÉTODOS	60
Modelo Poblacional	60
Modelado de la captura incidental	61
<i>Pesquería de Totoaba</i>	61
<i>Pesquería de camarón</i>	64
<i>Otras pesquerías con redes agalleras</i>	66
<i>Flota artesanal operacional (P)</i>	67
<i>Captura incidental anual total</i>	68
Modelo completo	68
Ensamblado del modelo	68
Estimación de parámetros	69
<i>Componentes del modelo</i>	69
<i>Marco de estimación</i>	70
<i>Verosimilitud</i>	71
<i>Distribuciones previas</i>	75
<i>Cálculo de la distribución posterior</i>	75

<i>Convergencia de la distribución posterior</i>	76
RESULTADOS.....	80
Distribuciones previas y valores iniciales de los parámetros.....	80
Primeros pasos para correr el modelo	81
Ejecución del proceso MCMC y revisión de convergencia.....	83
Distribuciones posteriores.....	87
Evolución 1920-2007 de la población de vaquita según el modelo.....	91
Estimación del estatus de la población para 2007.....	92
DISCUSIÓN	94
Distribuciones posteriores marginales	94
Bondad de ajuste del modelo	95
Estatus actual de la población	96
Tiempo esperado para recuperar a la población suponiendo la interrupción total de la pesca incidental.....	97
Formas de mejorar el modelo.....	98
CONCLUSIÓN.....	99
LITERATURA CITADA.....	100
Apéndice A	109
Apéndice B	112
Apéndice C	113
Apéndice D	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.	Esfuerzo de muestreo acústico aplicado en transectos.....	17
Tabla II.	Estaciones de muestreo usadas para la estimación de la tendencia de la tasa de encuentro acústico	27
Tabla III.	Esfuerzo de muestreo comparado entre estratos.....	31
Tabla IV.	Datos sobre ruido de fondo durante el muestreo	41
Tabla V.	Descripción de las direcciones de nado de vaquitas en relación con la marea	44
Tabla VI.	Parámetros del modelo.....	80
Tabla VII.	Matriz de correlación de los parámetros del modelo después de la fase de optimización en ADMB.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Área de estudio	1
Figura 2.	Esfuerzo de muestreo acústico durante el crucero 1997-04.....	16
Figura 3.	Esfuerzo aplicado con la segunda generación del detector acústico de 1999 a junio de 2001	18
Figura 4.	Estratos definidos para comparar la tasa de encuentro acústico entre regiones en el área de estudio	19
Figura 5.	Representación esquemática de la forma en que el hidrófono es colocado en el agua para el muestreo en estaciones	20
Figura 6.	Ejemplos de series de chasquidos de vaquita, delfines y otras fuentes	22
Figura 7.	Serie de chasquidos típica de vaquita	23
Figura 8.	Distribución del esfuerzo y de la tasa de encuentro acústico, incluyendo todos los cruceros con esfuerzo en estaciones fijas reportados en el Apéndice A.....	30
Figura 9.	Datos oceanográficos obtenidos durante el muestreo acústico	34
Figura 10.	Dispersión de los datos sobre tasa de encuentro acústico	35
Figura 11.	Gráfica de convergencia para el millón de simulaciones generadas para la estimación de la pendiente del modelo de regresión ajustado a los datos sobre tasa de detección acústica.....	35
Figura 12.	Distribución del millón de simulaciones generadas para estimar la pendiente del modelo de regresión ajustado a los datos sobre tasa de detección acústica.....	36
Figura 12bis.	Ruido de fondo medido durante el muestreo acústico	36
Figura 13.	Dirección de nado de vaquitas a tres niveles de velocidad de la marea (componente vertical).....	44
Figura 14.	Número de avistamientos y encuentros acústicos contra amplitud de la marea del día en que fueron obtenidos.....	45
Figura 15.	Avistamientos de vaquitas y ubicación de encuentros acústicos	50
Figura 16.	Distribución de los encuentros acústicos reportados en este trabajo	52
Figura 17.	Resultado del proceso de optimización en ADMB para seis puntos de inicio de los parámetros del modelo.....	82
Figura 18.	Gráfica de convergencia para el parámetro K en la primera especificación del modelo.....	84

Figura 19.	Distribución posterior obtenida para el parámetro z después de la primera corrida del modelo	85
Figura 20.	Verosimilitudes comparadas con sus distribuciones posteriores para tres valores del parámetro z (0.5, 1.0 y 1.5).	86
Figura 21.	Recorrido de la cadena para el valor de la Ecuación 15 para las primeras 10400 simulaciones y para las simulaciones 3400 a 4300.....	88
Figura 22.	Gráficas de convergencia para los parámetros del modelo	89
Figura 23.	Distribuciones posteriores de los parámetros del modelo y parámetros de interés	90
Figura 24.	Distribuciones posteriores comparadas para el parámetro K con y sin <i>burn-in</i> aplicado	91
Figura 25.	Evolución estimada de la población de vaquita entre 1920 y 2007, de acuerdo a los estimadores puntuales de los parámetros del modelo.....	92

I.- LA VAQUITA (*Phocoena sinus*): UNA ESPECIE AMENAZADA

INTRODUCCIÓN

Estatus de la vaquita

La vaquita (*Phocoena sinus*) es el más pequeño de los odontocetos al rededor del mundo y, junto con el baiji (*Lipotes vexillifer*), es una de las dos especies más amenazadas de pequeños cetáceos (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002; Kaiya, 2002). Ambas

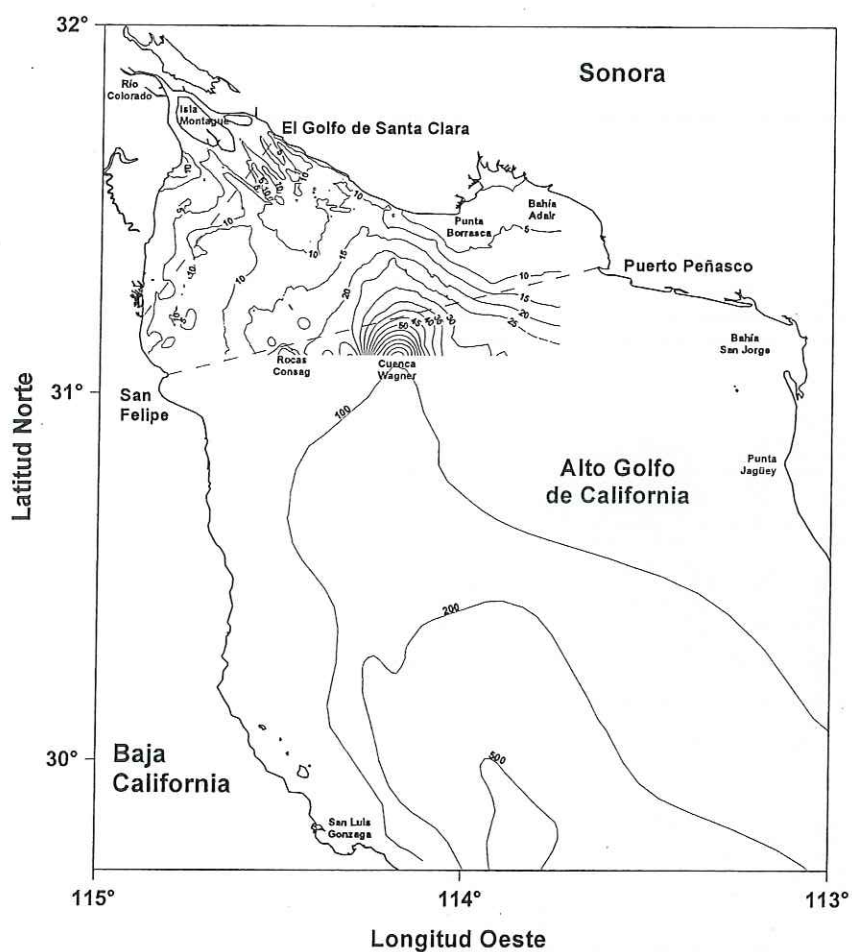


Figura 1. Área de estudio. Las líneas batimétricas entre 0 y 80 metros fueron cortesía del Instituto nacional de la Pesca, SEMARNAP, 1996. La línea de costa y las líneas batimétricas entre 100 y 500 metros fueron obtenidas de GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans Digital Atlas. British Oceanographic Data Centre. 1994). Las líneas punteadas definen los límites de la reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y delta del Río Colorado. La línea al sur delimita la zona de amortiguamiento y la línea al norte la zona núcleo.

especies tienen distribuciones muy restringidas, y la de la vaquita se halla localizada en aguas del Alto Golfo de California (Figura 1), lo cual la hace la única especie de cetáceo endémica de aguas mexicanas (Brownell Jr., 1986; Silber y Norris, 1991; Gerrodette *et al.*, 1995). A comparación del baiji, el cual fue declarado como extinto funcionalmente en el año 2007 (Turvey *et al.*, 2007), la vaquita aún tiene una esperanza de ser recuperada si se aplican las medidas necesarias (Rojas-Bracho *et al.*, 2006).

Después de su descripción (Norris y McFarland, 1958), y ante la carencia de hallazgos frecuentes de individuos vivos o muertos, se creó la percepción de que la vaquita era una especie rara, con una distribución restringida y quizá endémica del Alto Golfo de California. El hecho de que la vaquita estuviera siendo capturada incidentalmente en redes agalleras y de enmalle (Norris y Prescott, 1961), junto a la rareza de la especie, preocupó a la comunidad científica del mundo y, en 1978, fue incluida en el Libro Rojo de la IUCN-World Conservation Union clasificada como vulnerable, y también fue agregada a la Lista de Especies Mexicanas de Vertebrados Silvestres raras o en Peligro de Extinción (Vidal, 1995). Después, en 1979, fue incluida en el Apéndice I de CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres) y finalmente, en 1985, fue incluida en el Acta de Especies de Mamíferos Marinos de los Estados Unidos (US Marine Mammal Species Act) (Vidal, 1995). Actualmente la vaquita se halla listada en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001 Protección Ambiental - Especies Nativas de México de Flora y Fauna Silvestres - Categorías de Riesgo y Especificaciones para su Inclusión, Exclusión o Cambio - Lista de Especies en Riesgo, bajo la clasificación de “en peligro de extinción” (SEMARNAT, 2002).

La más reciente estimación de abundancia (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999) indica que 567 vaquitas (I.C. 95% 177 – 1073) habitaban en el Alto Golfo en el verano de 1997. Su distribución se restringió a una pequeña zona en la región nortea del Golfo de California, la cual es la más restringida de cualquier cetáceo marino (Brownell Jr., 1986; Silber, 1990; Gerrodette *et al.*, 1995; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999; Rojas-Bracho *et al.*, 2006).

Únicamente existe un trabajo publicado enfocado al estudio del ciclo de vida y parámetros reproductivos de la vaquita, el cual se basó en individuos capturados en redes o encontrados varados en playas (Hohn *et al.*, 1996). A partir de este estudio se sabe que la mayor parte de las hembras reproductoras no ovulan en años consecutivos, de tal forma que una hembra es capaz de producir una cría cada dos años como máximo. El ciclo de vida descrito para la vaquita es similar a los reportados para otras especies emparentadas, tal como la marsopa común (*Phocoena phocoena*). Las hembras de esta especie, en el Atlántico norte canadiense, ovulan anualmente y su fecundidad es cercana a una cría por año (Woodley y Read, 1991). Estos autores estiman que la tasa de crecimiento poblacional máxima para esta población es de aproximadamente 4% anual. Si el régimen de mortalidad natural es similar para ambas especies, la tasa de crecimiento poblacional debe ser probablemente menor, debido a una fecundidad más baja.

Por otro lado se estimó que 39 vaquitas (I.C. 95% 14 - 93) fueron incidentalmente capturadas durante un año de pesca, en redes agalleras y de enmalle, entre enero de 1993 y enero de 1994. Dichas capturas fueron realizadas por la flota artesanal de El Golfo de Santa Clara, Son., uno de los tres poblados pesqueros en el Alto Golfo de California (D'Agrosa *et al.*, 2000). Esta estimación es considerada un mínimo, ya que no se incluyeron las capturas realizadas por la flota de los otros dos poblados, particularmente San Felipe, B.C., cuya flota pesca en la zona principal de distribución de la vaquita (Rojas-Bracho *et al.*, 2006). Esta información, aunada a la estimación de abundancia antes mencionada, indica que la tasa de mortalidad por pesca *mínima* es alrededor de 6.5% anual.

El escenario esperado bajo estas condiciones, donde la mortalidad por pesca puede ser más alta que la tasa de natalidad, es que la población de la vaquita ha experimentando un decremento neto (Rojas-Bracho y Taylor, 1999). Dadas estas circunstancias, es clara la urgencia de evitar que los eventos de mortalidad por pesca sigan ocurriendo.

Esfuerzos recientes para la recuperación de la vaquita

Atendiendo a la preocupación de la comunidad internacional, el Gobierno Mexicano estableció en 1992 el Comité Técnico para la Preservación de la Vaquita y la Totoaba (Rojas-Bracho y Urbán-Ramírez, 1993). La principal recomendación de este comité fue la creación de una reserva. Como resultado en 1993 se decretó y estableció la “Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado” (Figura 1) para la protección de flora y fauna silvestres, pero primordialmente la vaquita y la totoaba (SEDESOL, 1993). El Gobierno Mexicano también incluyó a la vaquita, bajo la clasificación de “en riesgo de extinción”, en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-1994 (SEDESOL, 1994).

Sin embargo, la *Reserva de la Biósfera* no mostró ser una medida suficiente, por sí misma, para recuperar a la población de vaquita (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002). Después de tres años de operación la IUCN-World Conservation Union decidió cambiar el estatus de la vaquita a críticamente amenazada, debido a que los factores de riesgo seguían operando, es decir la mortalidad incidental en artes de pesca (IUCN, 1996).

En 1996 el Programa Nacional de Investigación y Conservación de Mamíferos Marinos (un grupo de investigación del Instituto Nacional de la Pesca hasta 2001, actualmente una coordinación parte del Instituto Nacional de Ecología de la SEMARNAT) estableció el Comité Internacional para la Conservación de la Vaquita (CIRVA). Este Comité se conformó con un grupo de especialistas en el tema, con el conocimiento necesario para diseñar un *Plan de Recuperación para la Vaquita*. El mandato del grupo fue el de crear un plan para recuperar a la especie que tomara en cuenta los aspectos socio-económicos de las comunidades y residentes de la región (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002).

Durante su primera reunión en 1997, el CIRVA analizó la información científica disponible sobre la vaquita y su hábitat para realizar un diagnóstico sobre su estatus. Se concluyó que su captura incidental en redes configura el principal factor de riesgo para

su supervivencia, aunque el CIRVA también recomendó que, en el largo plazo, se debieran revisar los efectos potenciales de la modificación de su hábitat. La principal de ellas ha sido la interrupción del flujo del Río Colorado a mediados del siglo pasado (Rojas-Bracho y Taylor, 1999; Rojas-Bracho *et al.*, 2006). La principal recomendación del CIRVA fue la de obtener una estimación de abundancia, aplicando técnicas de “muestreo de distancias” o “transecto lineal” (Buckland *et al.*, 1993), con el fin de contar con información de referencia para el diseño del Plan de Recuperación. El CIRVA indicó que esta información permitiría establecer con mayor precisión el estatus de la especie y permitiría justificar la obtención de los recursos monetarios necesarios para su recuperación.

Durante la segunda reunión del CIRVA, en 1999, se presentaron los resultados de la estimación de abundancia, la cual fue realizada en cooperación entre los gobiernos de México y Estados Unidos (Instituto Nacional de la Pesca y NOAA respectivamente). Se estimó que alrededor de 567 vaquitas componían a la población cuando se realizó la estimación (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Al confrontar esta cifra con los datos publicados sobre mortalidad incidental en redes (D'Agrosa *et al.*, 2000), el CIRVA recomendó evitar que más capturas siguieran ocurriendo tan pronto como fuera posible. El CIRVA indicó que cualquier medida de mitigación que se aplicara resultaría en impactos a las comunidades pesqueras involucradas, por lo que recomendó desarrollar estrategias socio-económicas y artes alternativos de pesca dirigidos a solucionar dichos impactos (Rojas-Bracho *et al.*, 2006).

El CIRVA se reunió una vez más en 2004. Los miembros acordaron que la información científica disponible indicaba que la actividad pesquera con redes era incompatible con la supervivencia de la vaquita. Después de revisar información sobre su distribución, se recomendó establecer una zona de refugio en la que la pesca con redes fuera prohibida.

El CIRVA también discutió sobre alternativas socio-económicas para mitigar los impactos de medidas restrictivas en la comunidad pesquera. Los expertos pusieron sobre la mesa algunas alternativas, e indicaron que sería recomendable aplicar las medidas

restrictivas en fases, de manera que se evitaran presiones excesivas sobre las comunidades afectadas.

Necesidades para el Plan de Recuperación de la Vaquita

El diseño de un plan viable de recuperación para la vaquita debe incluir la identificación de áreas y temporadas críticas para la especie, así como del establecimiento de metas de manejo y estrategias de monitorización. Los fondos necesarios para operar el plan de recuperación serán limitados, por lo que tener información biológica más precisa sobre uso de hábitat, así como metas de manejo claras, será clave para la obtención de dichos fondos y para el éxito del plan. El esquema de monitorización debe, por tanto, ser capaz de detectar cambios en abundancia y distribución, de manera que se esté en posibilidades de conocer si se está cumpliendo con la meta de manejo. Esta meta puede ser expresada como una proporción de la abundancia histórica de la vaquita, antes de que empezara a ser capturada en redes, si se considera que esta abundancia era cercana a la capacidad de carga.

El conocimiento sobre el uso de hábitat de la vaquita es escaso. Se sabe que los avistamientos han ocurrido en aguas entre los 10 y 50m, a distancias de la costa de hasta aproximadamente 50Km (Vidal, 1995; Gerrodette *et al.*, 1995; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Los estudios sobre captura incidental en las pesquerías de camarón, chano, sierra, macarela, mantas y tiburones (D'Agrosa *et al.*, 2000) indican que las vaquitas eran capturadas por pescadores de El Golfo de Santa Clara frente a las costas de Sonora, en aguas cercanas al Delta del Río Colorado y en las proximidades de las Rocas Consag (Figura 1). No hay datos sistemáticos sobre capturas para los otros dos poblados en la región (San Felipe en Baja California y Puerto Peñasco en Sonora), sin embargo los datos científicos basados en avistamientos indican que la vaquita habita en el Alto Golfo todo el año en la porción oeste de la cuenca, entre Rocas Consag y la Bahía de San Felipe (Silber, 1990; Silber y Norris, 1991) (Figura 1). Consecuentemente, no hay una coincidencia geográfica entre las zonas estimadas para la captura incidental y el área conocida de distribución. Esto puede ser debido a la falta de estudios sistemáticos sobre

distribución o a un conocimiento impreciso sobre captura incidental. Alternativamente, puede ser el resultado de una población con movimientos parte de sus usos de hábitat no descritos hasta ahora. Una explicación más para este fenómeno puede ser que la población se ha reducido constantemente debido a su mortalidad en artes de pesca, lo que puede haber reducido su área de distribución a lo que se conoce actualmente.

OBJETIVO

Este trabajo se enfoca a aportar elementos que incrementen el conocimiento sobre el estatus de la población de la vaquita, específicamente distribución, abundancia y uso de hábitat.

La meta es aportar elementos técnico-científicos para el establecimiento de un Plan de Recuperación, así como para la meta de manejo. Por último, pretende aportar conocimiento para diseñar un esquema de monitorización a largo plazo.

Objetivos Específicos

- Proveer elementos para determinar la distribución y uso de hábitat de la vaquita con base en técnicas acústicas pasivas.
- Proveer elementos para determinar el estatus actual de la población de la vaquita, con base en información sobre esfuerzo pesquero y parámetros poblacionales bajo un marco bayesiano.
- Determinar cuales son las áreas y temporadas críticas para la recuperación, con el apoyo de la información sobre distribución y uso de hábitat.
- Identificar los parámetros necesarios para diseñar un esquema de monitorización con base en el uso de técnicas acústicas pasivas.

II. USO DE HÁBITAT Y TENDENCIA POBLACIONAL DE LA VAQUITA: UNA APROXIMACIÓN ACÚSTICA

INTRODUCCIÓN

La vaquita es una especie en peligro de extinción, listada en las más críticas niveles categorías de fauna silvestre en el mundo (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002). El principal factor de riesgo que ha empujado a la vaquita a este escenario es su captura en redes de pesca artesanal en el Alto Golfo de California (Figura 1). El crítico nivel poblacional estimado para 1997 (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999) debe ser más bajo hoy día, debido a que las operaciones pesqueras en que es capturada no han cesado y, al contrario, podría haber aumentado el esfuerzo pesquero (com. pers. José Campoy, Director de la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, 2007).

El Comité Internacional para la Recuperación de la Vaquita (CIRVA) recomendó, en su segunda reunión, evitar tan pronto como fuera posible que más capturas siguieran ocurriendo (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002; Rojas-Bracho *et al.*, 2006). Bajo cualquier esquema de mitigación que se aplique será necesario obtener información sobre áreas y temporadas críticas. Esto es, conocer con precisión la distribución actual y usos de hábitat de la vaquita, lo que requiere de un esquema adecuado de muestreo y un eficiente sistema de detección de individuos.

En 1997 se llevó al cabo un crucero para obtener una estimación de abundancia de la vaquita lo más robusta posible (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). El trabajo incluyó el uso de tres embarcaciones con la posibilidad de cubrir toda el área potencial de distribución de la especie, que comprende incluso aguas muy someras. Una de las embarcaciones fue un buque oceanográfico (52m de eslora) que cubrió la zona conocida de mayor densidad de vaquita en aguas con profundidad mínima de 20m, así como las zonas más profundas de la cuenca. Una embarcación de investigación pesquera (19m de eslora) fue usada para cubrir las zonas costeras del Alto Golfo. Finalmente, una panga de

7m, adaptada con una plataforma, fue usada para navegar en la parte más somera del delta y canales del Río Colorado.

El buque oceanográfico estuvo equipado con binoculares de alta potencia (25x150), mientras que abordo de las otras dos embarcaciones se usaron binoculares estándar 10x50. La única muestra adecuada para modelar la estimación de abundancia fue la obtenida en el buque oceanográfico, ya que sólo 12 avistamientos se lograron abordo del buque de investigación pesquera y ninguno abordo de la panga. Se estimó que las vaquitas evitaron aproximarse al buque oceanográfico a menos de 900m. Es decir, las vaquitas evitaron a la embarcación conforme se aproximaba. Debido a que se utilizaron poderosos binoculares se logró avistar vaquitas a distancias de hasta 2mn. Debido a esto se pudo obtener un buen número de avistamientos; sin embargo, este tipo de instrumento no es posible usarlo abordo de embarcaciones pequeñas, debido a su peso y dimensiones.

El costo de operación de un barco como el mencionado hace imposible sostener una investigación a mediano y largo plazo. Por lo tanto, el futuro de la investigación de la ecología de la vaquita dependió de encontrar metodologías alternativas a las tradicionales basadas en avistamientos.

El CIRVA, durante su segunda reunión, discutió respecto a este tema. Sus miembros acordaron recomendar, como alternativa viable, la aplicación de técnicas acústicas pasivas para la localización de individuos (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002). Este tipo de técnicas pueden ser aplicadas desde embarcaciones pequeñas por grupos reducidos de personal científico. Además, el esfuerzo de muestreo puede ser extendido a horas de oscuridad y aquellas bajo condiciones meteorológicas más adversas. Esto, por supuesto, resulta en gastos de operación reducidos y mejor rentabilidad en la toma de datos (Mellinger *et al.*, 2007). Por ejemplo, durante el crucero de 1997 para estimar abundancia (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999), cada avistamiento tuvo un costo aproximado de 4,400 dólares, mientras que los encuentros acústicos reportados en este

trabajo tuvieron un costo aproximado de 250 dólares. Es decir, los encuentros acústicos tienen un costo aproximado de 6% el valor de los avistamientos.

El uso de sonares para el estudio de peces es ampliamente conocido, y de hecho el uso de instrumentos comerciales para la pesca recreativa es del dominio público. Este tipo de instrumentación es activa, en la que el instrumento emite un sonido y analiza su rebote.

La acústica pasiva, sin embargo, es relativamente reciente en el estudio de especies acuáticas. En este tipo de estudios la instrumentación no emite ninguna señal, más bien recibe el sonido que es naturalmente producido por las especies de interés, la cual es procesada para ser identificada. Se han estudiado especies de peces que producen sonido y también se ha intentado el seguimiento de peces que han sido marcados con instrumentos generadores de señales acústicas (Hawkins, 1974; Lyse *et al.*, 1998).

Las prospecciones acústicas pasivas de mamíferos marinos no se aplicaron sino hasta hace relativamente pocos años. En 1994, durante la Reunión 128 de la Acoustical Society of America (una de las más renombradas sociedades en prácticamente todos los temas sobre acústica, incluida la bioacústica), William Evans y Robert Benson presentaron un trabajo sobre la posibilidad de evaluar poblaciones de mamíferos marinos con sonar pasivo. En la misma reunión se presentó un par de trabajos sobre el uso de sismómetros y del sistema integrado de vigilancia subacuática de la Naval de Estados Unidos para seguir sonidos generados por mamíferos marinos en baja frecuencia. En la siguiente reunión de la sociedad Jeffrey Norris, William Evans, Troy Sparks y Robert Benson presentaron lo que podría ser considerado como la primera prospección acústica de mamíferos marinos, en la que se utilizó un arreglo de hidrófonos jalado desde una embarcación para buscar sonidos de cetáceos. En la misma reunión Adam Frankel y Chris Clark presentaron una comparación entre prospecciones acústicas y visuales de ballenas jorobadas.

Desde aquel tiempo se ha incrementado notablemente el estudio y prospecciones acústicas de cetáceos. Se han realizado estudios para identificar las señales acústicas producidas por cetáceos y otros mamíferos marinos (Stafford, 2003; Oswald *et al.*, 2003;

Rankin *et al.*, 2006) y ya se han realizado estudios de prospección poblacional sobre distribución, uso de área y abundancia (Gordon *et al.*, 2000; Van Parijs *et al.*, 2002; Jones y Sayigh, 2002; Laurinolli *et al.*, 2003; Mellinger *et al.*, 2004; George *et al.*, 2004; Barlow y Taylor, 2005; Mellinger *et al.*, 2007; Oleson *et al.*, 2007). También ya se han desarrollado equipos más sofisticados de detección acústica (Van Parijs *et al.*, 1999; Janik, 1999). En el caso de marsopas (Familia Phocoenidae) se han diseñado equipos de detección automatizados, tanto operados por personal científico (Chapell *et al.*, 1996), como totalmente autónomos (Tregenza, 2006; Gillespie y Chappell, 2002). Este último equipo ya ha sido utilizado para el estudio de ecología, conductas de ecolocación, impactos del ruido en poblaciones de cetáceos, y habituación a la operación de alarmas acústicas (Cox *et al.*, 2001; Culik *et al.*, 2001; Jefferson *et al.*, 2002; Cox y Read, 2004; Carlström, 2005; Cartensen *et al.*, 2006).

Los muestreos acústicos pueden ser usados para identificar especies por medio de análisis espectral (Richardson *et al.*, 1995). Por otro lado, la distancia de los individuos emisores detectados puede ser determinada con cálculos de pérdida de transmisión y análisis de rutas de rayo (McDonald y Fox, 1999), o mediante el uso de arreglos de hidrófonos, sistema que permite ubicar la posición de los emisores mediante el análisis de los tiempos de arribo de señales a los diferentes elementos del sistema con técnicas similares a la auto-correlación (Au *et al.*, 1999). Con información de este tipo se puede investigar, a diversas escalas de tiempo, sobre distribución, usos de hábitat y densidad de la especie de interés (Gordon y Tyack, 2002; Mellinger *et al.*, 2007).

Los equipos de detección acústica usados para el estudio de mamíferos marinos regularmente incluyen hidrófonos, pre-amplificadores y grabadoras comerciales. Algunos investigadores construyen arreglos de hidrófonos y pre-amplificadores de acuerdo a sus necesidades. Las señales se pueden almacenar en medios analógicos que frecuentemente son digitalizados en computadoras para su análisis. Alternativamente, la información puede ser digitalizada *in situ* como parte del diseño del equipo de detección. Los equipos usados pueden ser operados desde embarcaciones o, convenientemente, pueden ser autónomos y no requerir de la intervención del investigador sino para

recopilar información o dar mantenimiento. Con instrumentos de este tipo se pueden llevar a cabo estudios intensivos y extensivos (Mellinger *et al.*, 2007).

Las características de las señales acústicas de las marsopas (Familia Phocoenidae) permitieron el desarrollo de un detector acústico automatizado, diseñado por un grupo de investigación de Inglaterra (Chapell *et al.*, 1996). Poco después el mismo grupo creó una nueva versión mejorada (Gillespie y Chappell, 2002), la cual fue exitosa en la detección de vaquitas (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2002; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2003; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2005). En este capítulo se presentan los resultados de cruceros realizados para el estudio de la distribución, uso de hábitat y tendencias de la población de vaquita con la utilización de este equipo de detección. Este estudio cumple con la recomendación del CIRVA para continuar la investigación de vaquita con técnicas acústicas pasivas.

METODOLOGÍA

Bioacústica de marsopas y vaquita

La vaquita, tal como otras especies de la Familia Phocoenidae (marsopas), emite señales acústicas de alta frecuencia (chasquidos o “clicks” con frecuencias fundamentales centradas entre 128 y 139 KHz) y banda estrecha (11 a 28 KHz de ancho) (Silber, 1991; Kamminga *et al.*, 1996). El Género de delfines *Cephalorhyncus* emite señales con características similares, mientras que las otras especies de odontocetos también emiten pulsos de alta frecuencia, pero en bandas más amplias o con frecuencias fundamentales centradas en valores más bajos. Este tipo de señales se sabe son usadas para actividades de ecolocación (Au, 1993; Richardson *et al.*, 1995). Los chasquidos son producidos en series, compuestas de entre 3 a 57 chasquidos individuales en el caso de la vaquita (Silber, 1991). Por otro lado, se sabe que en la marsopa común (*Phocoena phocoena*) los chasquidos son emitidos en un haz, con pérdida máxima de 3 dB, de 16.5° en el sentido vertical y horizontal (Au *et al.*, 1999). Fuera de este haz la potencia de la señal decae rápidamente, lo que implica que las señales son emitidas hacia direcciones específicas. Este patrón debe ser muy similar para la vaquita, dadas las similitudes anatómicas entre ambas especies (Brownell Jr., 1983).

Equipo de detección acústica

El equipo (Chappell *et al.*, 1996; Gillespie y Chappell, 2002) consiste de un hidrófono (Sonar Research & Development HS-150) con pre-amplificador (ganancia de 40dB) conectados a un cable de cerca de 100m de largo; una caja metálica que contienen los módulos electrónicos para la manipulación de las señales; una computadora equipada con una tarjeta de digitalización tipo PCMCIA (Measurement Computing PC-CARD DAS16/330, frecuencia de muestreo de 330 KHz y resolución de 12 bits) la cual captura las señales manipuladas en los módulos electrónicos a través de un software especializado escrito por los mismos desarrolladores llamado *Porpoise*; y finalmente un GPS con conexión RS-232C, que conectado a la computadora permitió en todo

momento contar con referencias geográficas del lugar en el que se realizaron los muestreos acústicos.

Las señales recibidas en la caja de electrónicos son filtradas en tres bandas: a) una centrada a 50KHz, con 11KHz de ancho; b) otra centrada a 71KHz, con 13KHz de ancho, y c) la banda de marsopas entre 115 a 145KHz (las frecuencias fundamentales de las emisiones de vaquita se hallan contenidas en esta banda). La señal saliente de cada filtro es amplificada con una función logarítmica y pasada a través de un circuito de trazado de envoltura (*envelope tracing circuit*). Estas salidas son dirigidas a un puerto de conexión de audífonos, lo que permite escuchar las señales en tiempo real, ya que el circuito de envoltura reconvierte la señal a frecuencias audibles.

Por otro lado, las mismas salidas son enviadas a la tarjeta de digitalización en la computadora, en donde son muestreadas a una tasa de 25KHz. El software está diseñado para recibir, almacenar, medir, analizar y desplegar las señales en la pantalla de manera informativa. Una rutina de identificación de chasquidos dispara el almacenamiento de ellos cuando en cualquiera de las tres bandas la potencia de la señal excede niveles de referencia. Los chasquidos detectados son almacenados en el disco duro y, a su vez, desplegados en pantalla. Los datos almacenados consisten de formas de onda digitales de 25KHz de cada chasquido individual en cada una de las tres bandas filtradas, así como información de fecha y hora a la que fueron almacenadas. Adicionalmente, cada segundo se almacena información sobre niveles de ruido de fondo en cada una de las tres bandas. La unidad de medición son decibelios RMS (dB_{RMS} , root mean square; la intensidad de una señal se mide con la raíz cuadrada del cuadrado medio de un ciclo de onda; Urick, 1983).

Un chasquido “tipo vaquita” es identificado cuando el nivel de potencia en la banda de marsopas es más alto que en las otras dos bandas de referencia. La diferencia requerida es asignada por el investigador. Un encuentro acústico con vaquitas sólo se confirma con el análisis de series de chasquidos, no con la identificación de chasquidos individuales (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2002; Gillespie y Chappell, 2002).

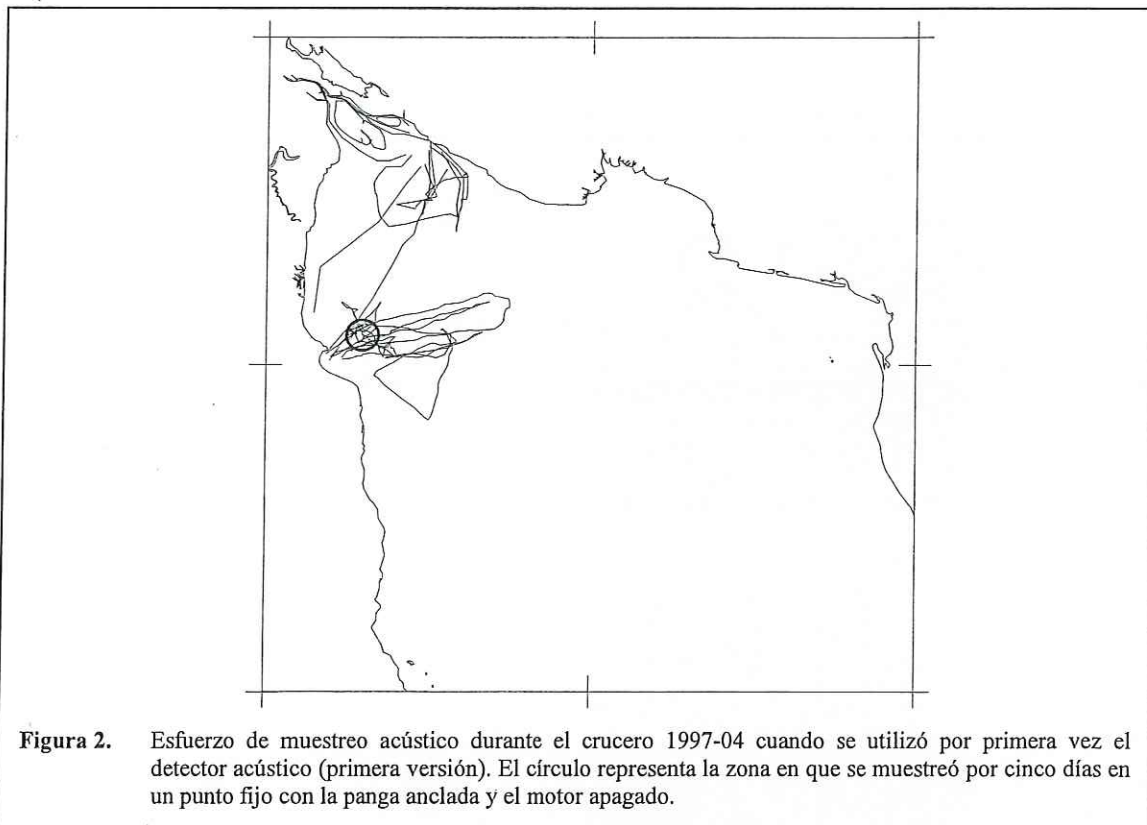
A partir del año 2004 se inició el uso de una versión estereofónica del detector acústico. Se trata de la misma tecnología, en la que se utilizan dos cajas de electrónicos iguales a la anteriormente descrita y un hidrófono con dos elementos unidos al mismo cable. Este equipo utiliza dos señales en la banda de marsopas para medir la dirección de donde se originaron los chasquidos detectados. De esta forma se facilita la identificación de señales, ya que las de una vaquita, al contrario del ruido de fondo, deben provenir de un mismo lugar. Una de las cajas de electrónicos que se usó es la misma que se había usado durante los primeros cruceros. Sólo se agregó una caja más y se cambió la versión monofónica del hidrófono por uno de versión estéreo. En ambas versiones de hidrófonos se utiliza el mismo tipo de elemento (HS-150) y pre-amplificador.

Diseño de muestreo

La primera versión del detector acústico (Chappell *et al.*, 1996) fue probada y usada para el estudio de la vaquita en abril de 1997. Durante la primera parte de este crucero se utilizó un velero, llamado *Viento Loco* (10m de eslora, dos velas, maquina diesel interna) para recorrer la zona entre Rocas Consag y la Bahía de San Felipe, lugar conocido con mayor concentración de vaquitas (Gerrodette *et al.*, 1995). En una segunda fase se utilizó una panga para recorrer la zona en los alrededores de El Golfo de Santa Clara y en los canales formados por la Isla Montague (Figura 2, Tabla I). Durante estas dos fases el hidrófono fue jalado detrás de la embarcación conforme se navegaba a través de la zona de estudio. Se recorrió un total de 1,272 Km durante 145 horas. Para la última parte del crucero se utilizó la misma panga bajo un diseño distinto. Durante cinco días consecutivos se salió a una zona cercana a la Bahía San Felipe en donde se ancló la embarcación. Durante varias horas se estuvo en el sitio con el motor apagado. Por la tarde se regresaba a puerto (Figura 2, Apéndice A). El total de esfuerzo de muestreo fue de 31 horas.

A partir de 1999 se empezó una serie de cruceros en los que se utilizó la segunda versión del detector acústico (Gillespie y Chappell, 2002). Entre 1999 y 2000 se realizaron tres cruceros en los que se navegó en transectos por el área potencial de distribución de la

vaquita en el Alto Golfo de California (Figura 3). El esfuerzo total fue de 1,661 Km recorridos en 150 h de esfuerzo (Tabla I). El hidrófono fue jalado por la popa de la embarcación, extendiendo prácticamente la totalidad del cable de 100m. El crucero de 1999 se llevó al cabo abordo del velero *Viento Loco*. Cuando el viento lo permitió se navegó a vela. Los dos cruceros que se realizaron en el año 2000 fueron trabajados a bordo de un yate de 12m de eslora llamado *Pasaporte*, equipado con dos máquinas Caterpillar 3207 de 55hp cada una. En los tres cruceros el muestreo se realizó continuamente durante día y noche, interrumpido cuando las condiciones climatológicas lo impidieron. Sólo se identificó un par de señales acústicas que probablemente fueron emitidas por algún cetáceo, sin embargo no se pudo establecer esto con certeza (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2002).



El desplazamiento de embarcaciones introduce ruido a la columna de agua debido a vibraciones producidas por las máquinas de combustión interna y por el giro de flechas y

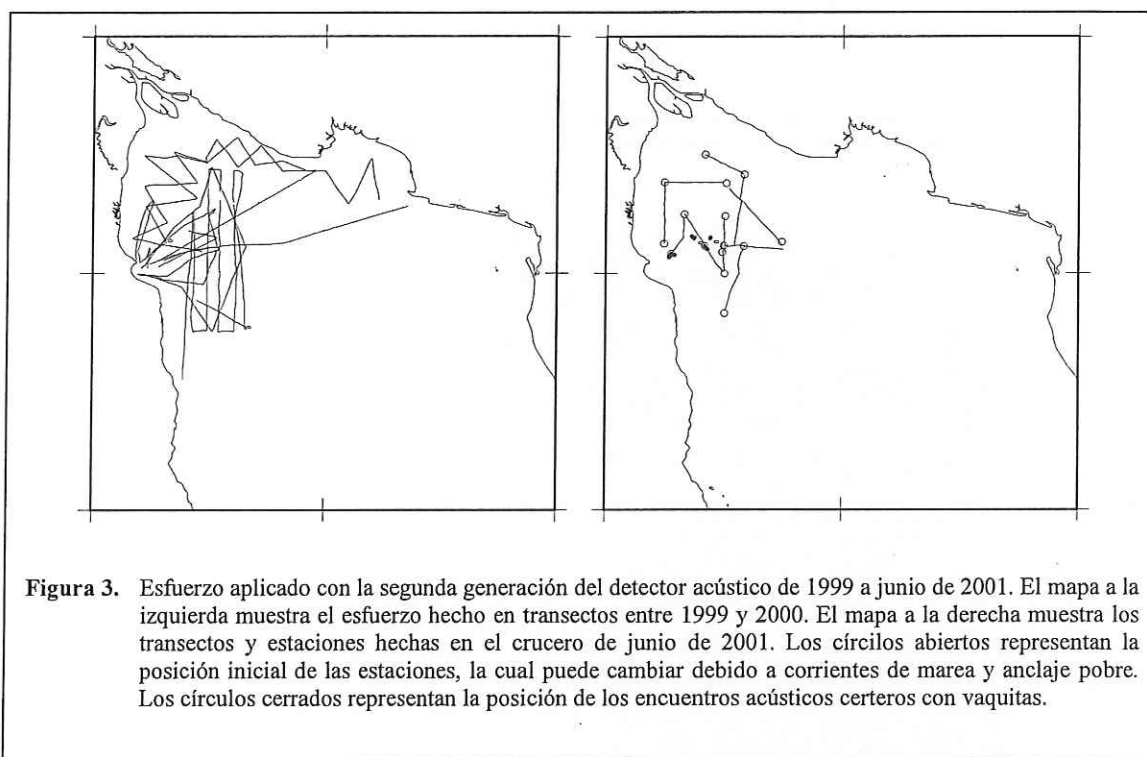
hélices. La propia fricción del casco con el agua también es un factor que produce ruido (Richardson *et al.*, 1995). Estos ruidos parece que son escuchados por las vaquitas, las cuales pueden reaccionar alejándose de la embarcación en movimiento. Se determinó que las vaquitas se alejaron del buque oceanográfico utilizado para estimar su abundancia (52m de eslora), en 1997, a una distancia aproximada de 900m (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Esto disminuye la probabilidad de avistarlas y, por otro lado, puede causar que interrumpan la emisión de chasquidos o que los dirijan en sentido contrario a la embarcación, lo que también disminuye las probabilidades de detectarlas acústicamente. Según los diseñadores del equipo de detección utilizado en este trabajo, una distancia de detección máxima razonable de acuerdo a cálculos teóricos de dispersión del sonido, y a las características propias del equipo, es de alrededor de 500 m (Gillespie y Chappell, 2002). Por lo tanto, tomando en cuenta que los animales deben estar emitiendo señales en dirección aproximada del hidrófono para ser efectivamente detectados debido a la direccionalidad de los chasquidos (Au *et al.*, 1999), parece ser que un muestreo basado en transectos (jalando el hidrófono por la popa del barco) no es efectivo para detectar vaquitas.

Tabla I. Esfuerzo de muestreo acústico aplicado en transectos

Crucero	Km	Horas
1997-04	1272.1	144.6
1999-07	183.9	17.7
2000-08	877.3	82.8
2000-10	599.6	49.4
2001-06	290.8	25.1
2001-09	1.2	0.1
2001-12	238.3	16.2
2002-03	203.9	15.9
2002-05	237.1	82.8
2003-03	599.6	49.4
Total	4503.9	484.0

En un siguiente crucero, llevado al cabo en junio de 2001, se ensayó otro esquema de muestreo utilizando transectos y puntos de muestreo estacionarios (Figura 3; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2002). Los puntos de muestreo fueron arbitrariamente seleccionados tratando de cubrir la mayor área posible. En estos puntos la embarcación (*Pasaporte*) fue

anclada, con las máquinas apagadas, por períodos de aproximadamente 5 horas cada uno (Apéndice A). El muestreo en transectos fue aplicado durante el desplazamiento entre estaciones, bajo el protocolo seguido durante los pasados cruceros. Bajo este esquema de muestreo ocho señales acústicas almacenadas fueron identificadas como vaquitas con certeza, así como otras dos con un origen incierto pero parecidas a las de cetáceos (Figura 3). De estas señales, sólo una se consiguió durante la navegación de un transecto. Estos resultados justificaron que, durante siguientes cruceros, el protocolo de muestreo se basara en estaciones fijas como la fuente principal de información (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2002). Bajo este esquema de muestreo se realizaron 10 cruceros más (Apéndice A). A partir del crucero 2004-04 se realizaron los muestreos con la versión estéreo del detector acústico, utilizando el mismo protocolo descrito.



Para analizar la correlación entre la distribución de la vaquita y factores oceanográficos, el área de estudio se dividió en seis estratos (Figura 4). La estratificación norte-sur divide el área en una región norteña con características deltaicas (muy somera y de fuertes corrientes mareales), una región intermedia somera y con corrientes suficientes

para mantener la columna de agua mezclada, y una región sureña, profunda, menos turbia y más estratificada (Lavín *et al.*, 1997). La estratificación este-oeste divide el área en una región occidental del lado de baja California, donde la mayoría de los avistamientos de vaquita han ocurrido. Del lado oriental, hacia el Estado de Sonora, es donde se reportaron varios eventos de captura incidental de vaquitas (D'Agrosa *et al.*, 1995; D'Agrosa *et al.*, 2000). Esta estratificación este-oeste también coincide con las provincias sedimentarias definidas para el Alto Golfo de California (Carriquiry y Sánchez, 1999), las cuales son el resultado de los procesos oceanográficos que prevalecen en la zona. El muestreo fue restringido a aguas con profundidades máximas de 50m, atendiendo al conocimiento previo sobre distribución (Silber, 1990; Vidal, 1995; Gerrodette *et al.*, 1995; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Por lo tanto, una porción del estrato 6 fue retirada del muestreo, dadas las profundidades de esta región que pertenecen a la Cuenca Wagner (Figura 1, Figura 4).

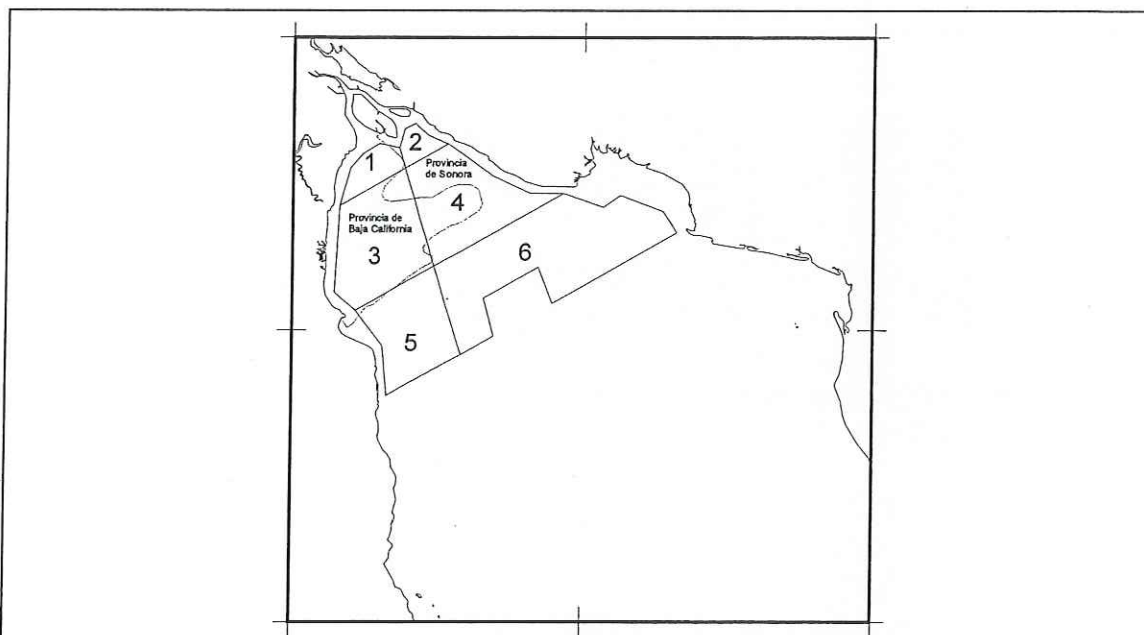
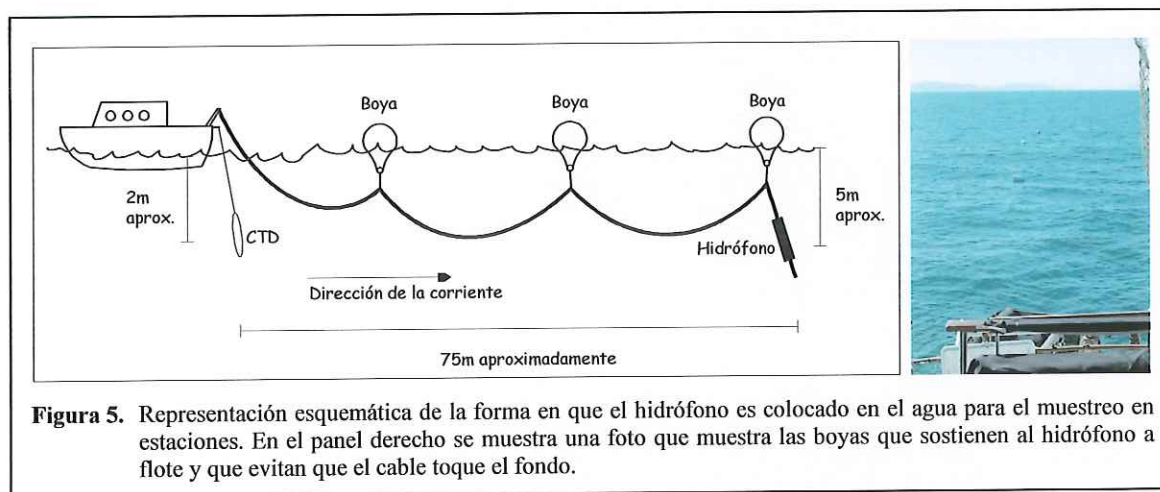


Figura 4. Estratos definidos para comparar la tasa de encuentro acústico entre regiones en el área de estudio. Los estratos al norte (1 y 2) delimitan una región norteña de características deltaicas. La región media (estratos 3 y 4) es dominada por aguas someras y corrientes mareales, lo que mantiene la columna relativamente bien mezclada. Los estratos al sur (5 y 6) delimitan una región caracterizada por aguas más profundas y estratificadas (Lavín *et al.*, 1997). La línea norte – sur divide el área en dos regiones (estratos pares al oeste y pares al este) que se sobreponen muy cercanamente a las provincias sedimentarias definidas para el Alto Golfo de California (Carriquiry and Sánchez, 1999).

En cada estrato la posición de la estación fue seleccionada al azar previo al período de muestreo. Nunca fue posible muestrear en el estrato 2, y las posiciones en el estrato 1 fueron seleccionadas por el capitán de la embarcación de acuerdo a consideraciones de seguridad, debido a la compleja batimetría y lo somero del estrato de esta región deltaica.

Para incluir posibles variaciones en la detección de vaquitas de acuerdo a ciclos circadianos, en cada estación se intentó muestrear por un día completo con el detector acústico operativo todo el tiempo. Fue necesario interrumpir el muestreo debido a condiciones climatológicas adversas (Beaufort por encima de niveles 4 ó 5), fallas en el instrumental científico o desperfectos del barco. El hidrófono fue tendido en el agua con la ayuda de tres boyas atadas al cable a intervalos regulares (Figura 5). De esta forma las corrientes permiten que el hidrófono se aleje del barco, lo que evita el ruido provocado por el oleaje o corrientes chocando con el casco. El hidrófono se intentó colocar siempre aproximadamente a 5m debajo de la boya más distal al barco. Las otras dos boyas también evitan que el cable choque con el fondo (Figura 5).



Durante los cruceros de diciembre de 2001, febrero de 2002 y mayo de 2002 se usó un CTD Ocean Sensors OS200 para obtener lecturas de salinidad, temperatura y radiación solar (usando un medidor esférico de PAR [*radiación fotosintéticamente activa*] marca Li-Cor conectado al CTD). La toma de lecturas se dio cada cinco minutos en la capa

superficial (entre 1 y 2 metros de profundidad) y se realizó un perfil vertical de superficie a fondo y de regreso cada tres a seis horas (bajo condiciones climatológicas adecuadas para permanecer en la popa del barco). Aún aunque una falla del cable oceanográfico causó la pérdida de varias series de tiempo y perfiles, aún fue posible obtener datos para analizar.

Análisis de datos

Identificación de encuentros acústicos con vaquitas

Los archivos digitales generados por el detector acústico fueron cuidadosamente analizados para identificar señales producidas por vaquitas, usando el programa *Porpoise* (Gillespie y Chappell, 2002), así como otro programa desarrollado para este trabajo. La Figura 6 muestra una serie típica de chasquidos de vaquita. También se muestran series típicas producidas por delfines, artrópodos, ecosondas y radios de comunicación, que demuestran la facilidad para identificar series producidas por vaquitas. Por supuesto no todas las series de vaquita son así de conspicuas, por lo que el programa desarrollado para este trabajo ayuda en la identificación a través de la medición de algunos parámetros que a continuación se describen.

Un chasquido tipo vaquita (Figura 7) es identificado cuando su potencia en la banda de marsopas es de por lo menos 90dB_{RMS} y es al menos 15dB_{RMS} más alta que cualquiera de las dos bandas de referencia (centradas a 50 y 71KHz). Una serie de chasquidos es identificada como vaquita con certeza, solamente cuando la serie contiene un mínimo de 50 chasquidos tipo vaquita y cuando los tiempos entre chasquidos consecutivos son regularmente espaciados (coeficiente de variación entre 0.2 a 0.4), con valores menores a 0.05 segundos (Figura 7). En las series no emitidas por vaquitas el coeficiente de variación de los tiempos entre chasquidos consecutivos típicamente rebasa la unidad y tienden a ser más grandes. Un criterio adicional para confirmar la identificación es por medio de la audición de las señales, que en el caso de vaquitas son claramente distinguibles. Esto se hizo por medio del programa *Porpoise* o con el programa desarrollado para este trabajo.

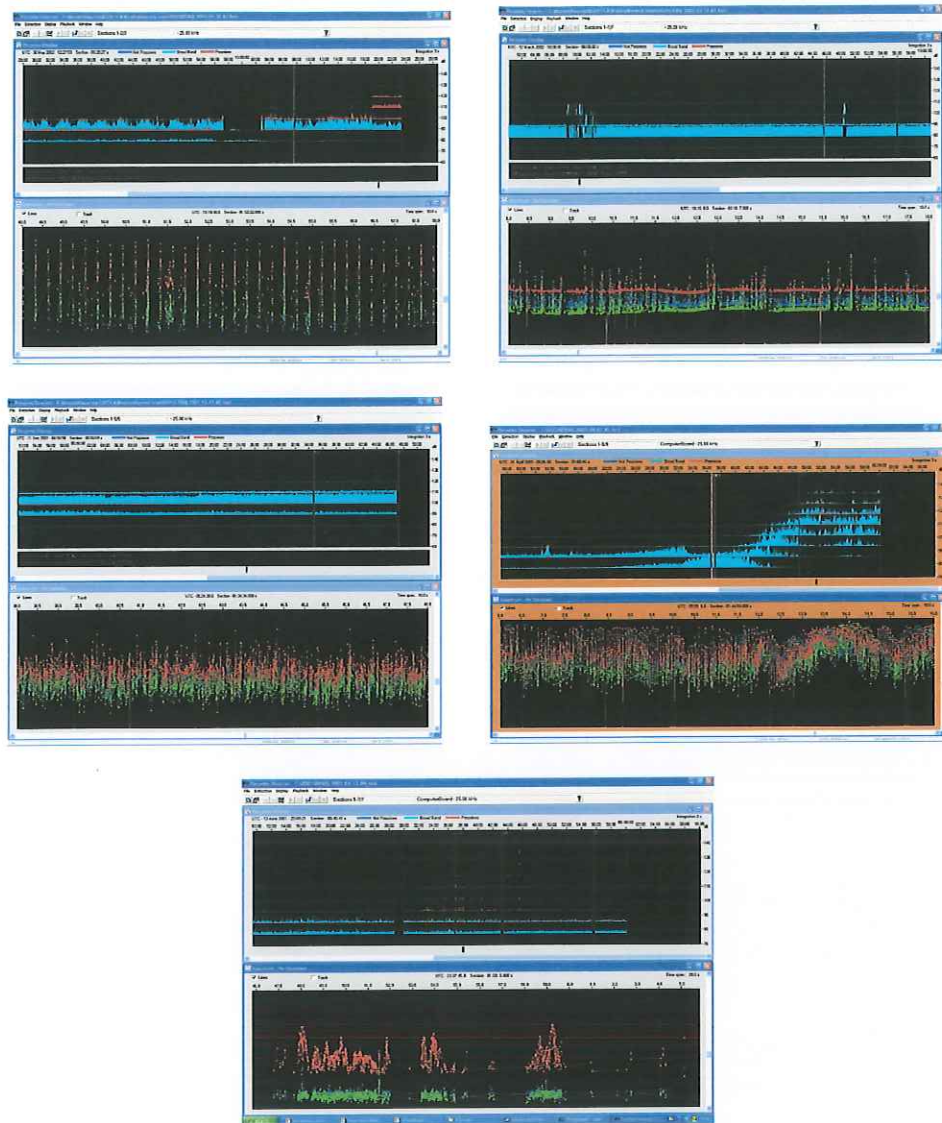
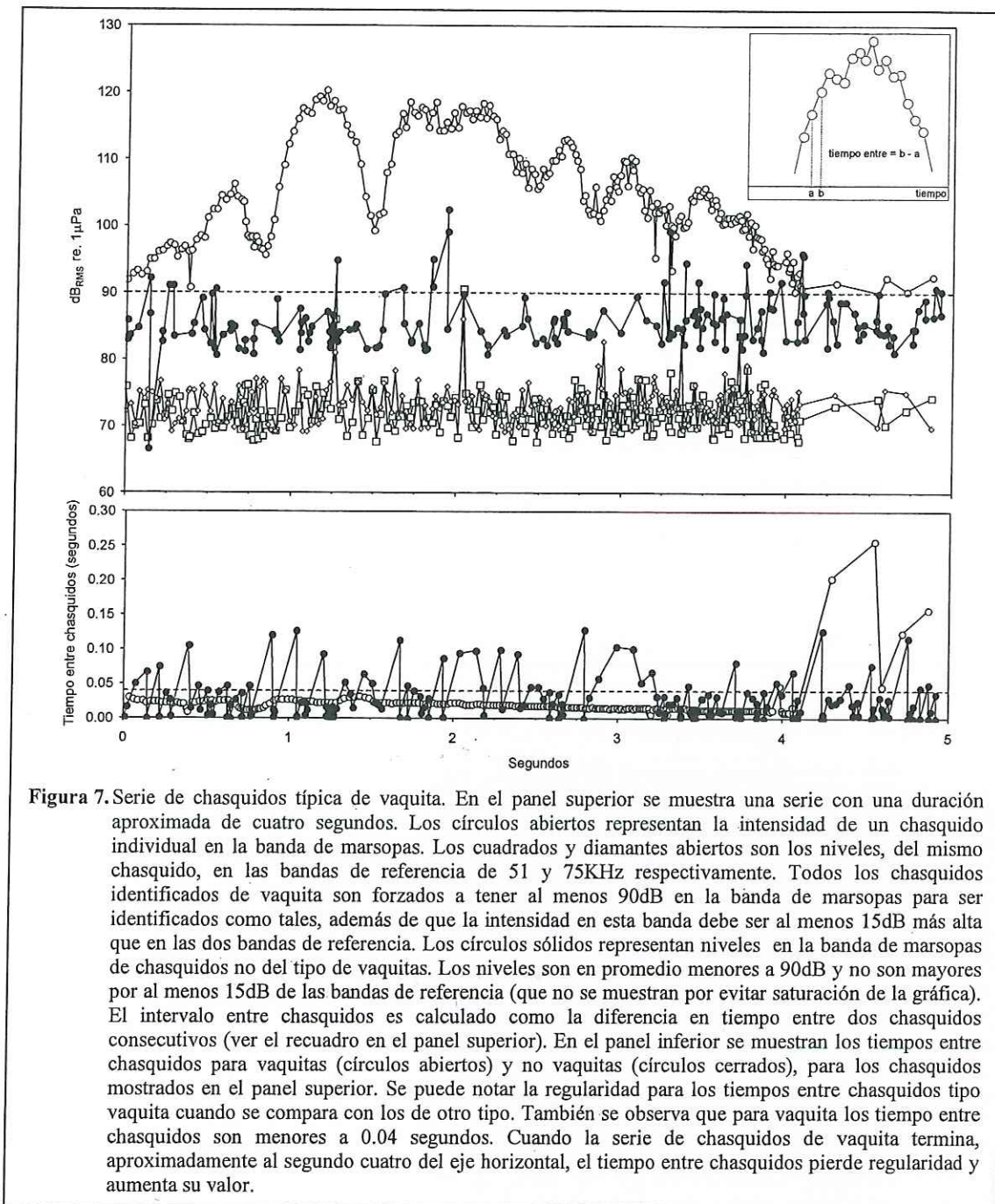


Figura 6. Ejemplos de series de chasquidos de vaquita, delfines y otras fuentes. En cada ventana el eje horizontal es tiempo y el vertical es nivel de intensidad del sonido recibido. El panel superior de cada ventana es la “vista tipo marsopa” en la que cada pequeña barra es la suma de 3 segundos del número de chasquidos identificados a ese nivel de intensidad. Las barras en azul son para el conteo de chasquidos de banda amplia y las rojas para chasquidos tipo vaquita. En el panel inferior se muestra la “vista tipo espectro”, en la que cada punto es un chasquido individual. Una pequeña barra negra al fondo de la vista tipo marsopa indica el tiempo que ocupa la información presentada en la vista tipo espectro. Los puntos rojos representan la potencia del chasquido identificado en la banda de marsopas (115-145KHz), los puntos verdes en la banda de los 71KHz y los azules en la banda de los 50KHz. En la ventana superior izquierda se presenta una señal típica de ecosonda, en el superior derecho una señal de radio VHF. En la ventana en medio y a la izquierda se muestran señales típicas de artrópodos y a la derecha una clara señal de delfines. La ventana hasta abajo es una típica señal de vaquita. En todos los casos, excepto vaquitas, la señal está dominada por chasquidos de banda amplia, es decir con aproximadamente la misma intensidad en cada una de las tres bandas. La señal de vaquita contiene, marcadamente, una mayor intensidad en la banda de marsopas. Las señales de ecosonda y VHF reflejan una mayor intensidad en la banda de marsopas, sin embargo la diferencia en la forma de la serie de chasquidos es muy distinguible.



Interpretación de los datos de CTD

Como se explicó antes, las series de tiempo no fueron siempre completadas, por lo tanto en este trabajo sólo se hizo una interpretación gráfica de la información generada. Se

presentan gráficos de dispersión del valor del parámetro medido (salinidad o temperatura) *versus* tiempo. Sólo las series más consistentes son presentadas.

Durante el crucero de mayo de 2002 fue posible obtener buenos perfiles de radiación solar alrededor de la zona de estudio. Esta información también es presentada de forma gráfica para comparar entre estratos. *Cálculo de la Tasa de Encuentro Acústico*

La tasa de encuentro acústico, para cada estación, fue calculado como:

$$\frac{\text{número de encuentros certeros de vaquitas}}{\text{esfuerzo efectivo aplicado}}$$

Solamente las detecciones confirmadas de vaquitas, de acuerdo a los parámetros explicados antes, fueron incluidas en los cálculos. Al total del tiempo invertido en una estación se le restaron los tiempos muertos para obtener el tiempo efectivo. Estos tiempos incluyeron períodos de falla del equipo acústico, períodos de ruido de fondo excesivo y periodos necesarios para recalibrar o mantener los equipos.

La tasa de encuentro acústico fue comparada entre estratos y graficada en un mapa para identificar tendencias espaciales.

Tendencia de la serie de tiempo de la tasa de encuentro acústico

Del total de estaciones de muestreo realizadas (Apéndice A) se seleccionaron aquellas dentro de la zona geográfica, en la que se detectaron vaquitas acústicamente, para analizar la tendencia de la serie de tiempo de la tasa de encuentro acústico (Tabla II).

La tendencia fue descrita a través del ajuste de un modelo de regresión, de manera que la pendiente es el parámetro principal de interés. Dado que la tasa de encuentro es en realidad un conteo (número de detecciones acústicas en cada estación), la variable a manejar es discreta y positiva mayor a cero. De tal forma se eligió ajustar un modelo logarítmico, compensado por tiempo, así como una distribución discreta para el error. Se probaron dos distribuciones, Poisson y Binomial Negativa (El-Sayyad, 1973; White y

Bennetts, 1996). Además, se probaron estas distribuciones infladas por ceros para incluir, en el error, la probabilidad incrementada de conteos nulos (Ridout *et al.*, 2001). En este caso la ausencia de encuentros se puede deber a que las vaquitas no emitieron sonidos del todo, los emitieron de manera que no fueron bien identificados, o simplemente no hubo vaquitas durante el tiempo de muestreo. Por tal parece adecuado utilizar una distribución inflada. El modelo utilizado fue, entonces:

$$\# \text{ de encuentros} = e^{(\ln[\text{esfuerzo}] + \alpha + \beta * \text{tiempo})}$$

de manera que :

$$\frac{\# \text{ de encuentros}}{\text{esfuerzo}} = e^{(\alpha + \beta * \text{tiempo})} = \text{tasa de encuentro acústico}$$

El esfuerzo es el número de horas efectivas de muestreo en cada estación; el # de detecciones es el número de detecciones acústicas de vaquita confirmadas, conseguidas en cada estación durante el esfuerzo efectivo; tiempo es la fecha y hora en la que se inició el esfuerzo en cada estación, expresada como año con decimales. Los parámetros a estimar son la ordenada al origen (α) y la pendiente (β).

En una distribución de Poisson se tiene un sólo parámetro, que define la media y la desviación estándar. Tal como en una regresión con error normal, este único parámetro es un estimador del parámetro de interés (en este caso # de encuentros) para cada valor de la variable independiente (en este caso tiempo). En el caso de la distribución binomial negativa se tienen dos parámetros. Uno, como en el caso de Poisson, mide la tendencia central de la distribución y por tanto estima el # de encuentros para cada valor de tiempo. El otro es una medida de la dispersión y, como en el caso de errores normales, este se estima de la dispersión contenida en los datos.

Para incluir en el modelo la variación debida a un exceso de ceros (Ridout *et al.*, 2001) se construye otro juego de datos a partir de la información original. Esta nueva variable, de la misma dimensión que la original, es binomial, tomando un valor de uno cuando el dato original sea mayor a cero, y tomando un valor de cero cuando la variable original tome este valor. Para esta segunda variable, llamada aquí w , se ajusta una regresión también logarítmica, para luego incluir esta estimación en la regresión de la tasa de encuentro acústico. La forma de incluirla es sumarla al error de la tasa de detección. Cuando la tasa de encuentro es diferente de cero se suma al error $1-w_i$, siendo i el tiempo. Cuando la tasa tome un valor de cero se suma al error $w_i+(1-w_i)$. De esta forma, durante el proceso de ajuste, se infla el error cuando la tasa de encuentro es cero, tratando de modelar la posible probabilidad incrementada de ceros como se explicó antes.

La estimación de los parámetros de la regresión se realizó bajo una aproximación bayesiana (ver el Capítulo III para una explicación de esta metodología). La información previa para los parámetros de la regresión fue no informativa, tal como se justifica cuando el número de datos es mayor al número de parámetros a estimar (Gelman *et al.*, 1995). La verosimilitud está expresada por el error, ya sea Poisson o Binomial negativo, inflado por ceros o no. El método para describir la distribución posterior de los parámetros del modelo fue a través de un método de simulación basado en cadenas de Markov de Monte Carlo (MCMC por sus siglas en inglés) implementadas con el algoritmo Metropolis-Hastings como lo estructura el paquete AD Model Builder (copyright Otter Research Ltd., otter@otter-rsch.com; ver Capítulo III).

Tabla II. Estaciones de muestreo usadas para la estimación de la tendencia de la tasa de encuentro acústico. Toda se refiere al esfuerzo aplicado durante toda la estación de muestreo. Día es el esfuerzo durante horas luz y Noche durante horas de oscuridad.

Crucero	Estación	Horas de esfuerzo			Encuentros acústicos			Tasa de encuentro acústico		
		Toda	Día	Noche	Toda	Día	Noche	Toda	Día	Noche
1997-04	1	7.65	7.65	0.00	1	1		0.131	0.131	
	2	5.39	5.39	0.00	1	1		0.186	0.186	
	3	9.63	9.63	0.00	4	4		0.415	0.415	
	4	2.43	2.43	0.00	1	1		0.412	0.412	
	5	5.44	5.44	0.00	1	1		0.184	0.184	
2001-06	1	3.48	3.48	0.00						
	2	4.98	0.00	4.98						
	3	4.69	4.69	0.00						
	5	5.38	0.00	5.38	1		1	0.186		0.186
	6	6.09	6.09	0.00	4	4		0.657	0.657	
	8	4.54	4.54	0.00						
	9	4.45	4.45	0.00						
	11	4.59	4.59	0.00						
	12	4.54	4.54	0.00						
	13	4.70	0.00	4.70						
	14	3.75	3.75	0.00						
	15	3.79	3.79	0.00	3	3		0.791	0.791	
2001-09	4	16.06	10.34	5.72						
2001-12	4	4.44	0.00	4.44						
	5	16.11	9.23	6.87						
2002-03	1	15.36	3.12	12.24						
	2	10.96	0.00	10.96	3	1	2	0.274		0.183
	4	17.82	5.83	11.99						
	6	17.01	5.39	11.63						
2002-05	1	19.42	9.69	9.73						
	3	19.25	8.55	10.71	11	4	7	0.571	0.468	0.654
	5	22.08	12.75	9.33	1	1		0.045	0.078	0.000
	6	20.84	11.14	9.70	1	1		0.048	0.090	0.000
	8	12.40	3.17	9.23	8	1	7	0.645	0.315	0.758
	1	34.67	19.42	15.25	12	8	4	0.346	0.412	0.262
2003-03	2	9.17	9.17	0.00	1	1		0.109	0.109	
	3	16.57	11.00	5.56						
	4	3.12	3.12	0.00	2	2		0.641	0.641	
	5	10.70	9.39	1.31	5	5		0.467	0.533	0.000
	1	1.11	1.11	0.00						
2003-10	1	3.93	3.93	0.00						
2004-04	2	4.98	4.98	0.00						
2005-07	1	19.13	6.33	12.80	6	5	1	0.314	0.790	0.078
	3	6.17	6.17	0.00						
2006-05	2	25.26	16.47	8.79	2	2		0.079	0.121	0.000
2007-02	1	12.04	7.42	4.62						
	2	21.65	9.65	12.00						
	3	22.82	10.83	11.99						
2007-04	1	9.41	7.59	1.81	5	2	3	0.532	0.263	1.653
	2	21.54	11.40	10.14	3	3		0.139	0.263	0.000
	4	23.77	12.78	10.99						

RESULTADOS

Esfuerzo

Después del crucero 2001-06, en que se ensayó el esquema de muestreo con base en estaciones fijas, se continuó aplicando esfuerzo de muestreo en transectos, durante el desplazamiento entre estaciones, sólo hasta el crucero 2003-03 (Tabla I). Ninguna detección certera fue conseguida aparte de la lograda en el crucero 2001-06, razón por la cual se decidió interrumpir este tipo de esquema.

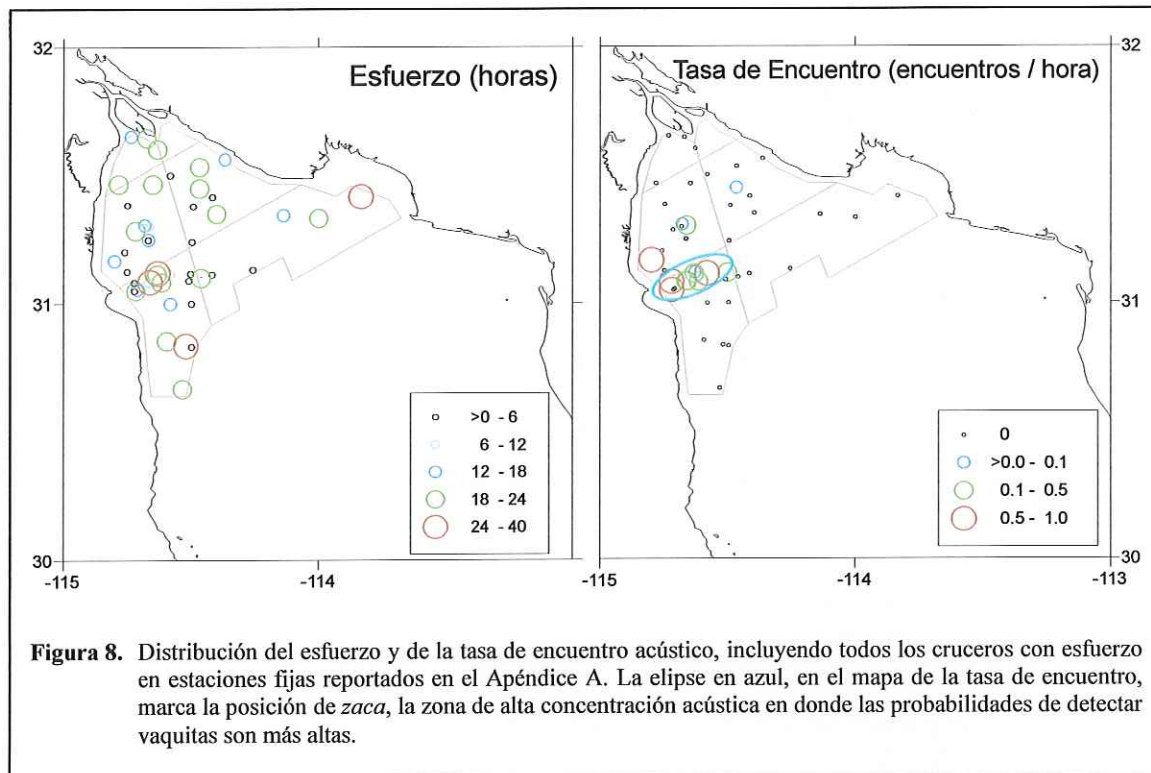
Diez cruceros fueron completados bajo el esquema de estaciones fijas, incluido el 2001-06 cuando se probó esta estrategia de muestreo (Apéndice A; cruceros 2001-06, 2001-09, 2001-12, 2002-02 y 2002-05 abordo del barco *Pasaporte*; crucero 2003-03 abordo de un bote de pesca deportiva de 25m de eslora llamado *José Andrés*; crucero 2004-04 abordo de una embarcación pesquera de arrastre de 20m de eslora llamada *Oviedo III*; y cruceros 2005-07, 2006-05, 2007-02 y 2007-04 abordo de una embarcación llamada *Koipai Yú-Xá*¹). Sesenta y ocho estaciones fueron realizadas, totalizando 828.16 horas de esfuerzo efectivo (Apéndice A y Figura 8). No se pudo realizar muestreo en el estrato 2. El esfuerzo aplicado durante todos los cruceros se presenta en el Apéndice A, incluyendo el crucero 2001-06 durante el cual el muestreo por estación fue restringido a cinco horas.

Se supone que cuando el esfuerzo de muestreo es aplicado de forma proporcional al tamaño de estrato, si las vaquitas se distribuyen homogéneamente, se esperan probabilidades similares de detectar vaquitas entre estratos. Es necesario también

¹ Se trata de un barco de acero de 11.5 m de eslora, equipado con una máquina diesel de 315hp. Esta embarcación fue especialmente diseñada y construida para realizar los muestreos acústicos de vaquita. Este barco fue construido en Puerto Peñasco, Sonora, con el apoyo de la International Fund for Animal Welfare – México, U.S. Marine Mammal Commission y el Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, México.

suponer que el comportamiento acústico de las vaquitas es similar entre estratos. El muestreo pudo alejarse de la proporcionalidad debido a interrupciones o a la imposibilidad de llegar hasta alguna estación seleccionada al azar, debido principalmente a condiciones climatológicas adversas. La Tabla III muestra el área de cada estrato y el correspondiente esfuerzo expresado en horas y como porcentaje del esfuerzo total en toda la zona de estudio. También se muestra el área de cada estrato y su porcentaje del área total de muestreo. En la última columna se muestra al área en porcentaje restada del esfuerzo en porcentaje. Cuando esta diferencia tiende a cero el esfuerzo es proporcional al área de los estratos. La información mostrada en la Tabla III muestra que el esfuerzo no fue proporcional, con el estrato uno ligeramente con mayor esfuerzo que el proporcional, los estratos 3 y 4 cercanos a la proporcionalidad, el estrato 5 con mayor esfuerzo y el estrato 6 con menor esfuerzo al proporcional. El conocimiento previo sobre distribución (Silber, 1990; Silber y Norris, 1991; Silber *et al.*, 1994; Vidal, 1995; Gerrodette *et al.*, 1995) indica que las vaquitas están distribuidas principalmente en la porción oeste del Alto Golfo, lo cual fue corroborado con la distribución de las estaciones, con detecciones confirmadas de vaquitas, durante los primeros cruceros reportados en este trabajo (ver el siguiente apartado). En particular se halló una pequeña zona, cerca de la Bahía de San Felipe, la cual se caracterizó por una alta concentración de actividad acústica. Este sitio, llamado “zona de alta concentración acústica” (zaca por sus siglas), está localizado entre los estratos 3 y 5. En los subsecuentes cruceros *zaca* fue usado como un sitio de referencia, de manera que en cada crucero siempre se muestreó ahí al menos una estación. Dado que este sitio contó para el esfuerzo en el estrato 5, es que este estrato resultó con un mayor esfuerzo. En contraparte, en el estrato 6 (que como se mencionó contiene parte de la profunda Cuenca Wagner) se aplicó un menor esfuerzo proporcional. Sin embargo, en esta zona se sabe que la densidad de vaquita es muy baja o está ausente. Aunque no fue posible muestrear el estrato 2 su relativo pequeño tamaño, y cercanía al estrato 1, permite considerar que el muestreo en este último es representativo de toda la zona deltaica. Considerando estos argumentos, aunque el muestreo no fue proporcional al tamaño de los estratos, se le considera representativo del conocimiento previo sobre distribución de la vaquita.

En relación a la distribución de las estaciones de muestreo, en la Figura 8 se puede observar que las estaciones están distribuidas de forma aleatoria, y que tienden a esparcirse a lo largo y ancho de los estratos. Como se explicó antes, se observa una saturación de estaciones hacia *zaca*, debido a su pequeño tamaño y al nivel de esfuerzo, así como una ausencia de muestreo hacia el centro del estrato 6, lo cual en parte se explica por el menor esfuerzo aplicado y el relativo gran tamaño de este estrato. Las estaciones en las que se logró muestrear por 12 horas o más (de manera que se cubrió un ciclo completo de flujo y reflujo mareal, dadas las características semidiurnas de la marea en la región) corresponden cercanamente a la descripción de distribución del esfuerzo hecha anteriormente, pues comparativamente son más las estaciones con estas características (Figura 8), por lo tanto se evidencia que, como un todo, el muestreo es representativo de la distribución y densidad de la vaquita.



Encuentros acústicos y tasa de encuentro acústico

Todos los 76 encuentros acústicos obtenidos, excepto uno, ocurrieron en los estratos 3 y 5. El otro ocurrió en el estrato 4 (Figura 8). La tasa de encuentro acústico varió desde un mínimo de cero hasta un máximo de 0.791 encuentros / hora (Apéndice A, Figura 8). Para estaciones en las que hubo encuentros, la tasa mínima fue de 0.045 encuentros / hora. No hubo diferencias significativas ($t=1.244$, g.l.=87, $p=0.117$) para la tasa de encuentro entre horas luz (promedio 0.167) y horas de oscuridad (promedio 0.145), lo que indica una actividad acústica de la vaquita similar a lo largo del ciclo circadiano (Tabla II).

Tabla III. Esfuerzo de muestreo comparado entre estratos

Estrato	Área		Esfuerzo		Diferencia entre % de esfuerzo y % de área
	Km ²	%	Horas	%	
1	287.83	4.55	78.77	12.80	+8.25
2					No muestreado
3	1,339.98	21.16	121.90	19.80	-1.36
4	1,271.36	20.08	106.25	17.26	-2.82
5	1,052.17	16.62	214.30	34.82	+18.20
6	2,380.63	37.60	94.29	15.32	-22.28
Total	6,331.97	100.00	615.51	100.00	

Las estaciones en las que se detectaron vaquitas están más cercanas a la costa de Baja California (Figura 8). Aquellas en que la tasa de encuentro acústico es alta tienden a distribuirse hacia el límite sur de la reserva de la Biósfera y a pocas millas de la Bahía de San Felipe. Esta es la característica de la zona a la que se le ha llamado *zaca*. Hay una tendencia, también, a que en las estaciones más cercanas a la costa se hayan obtenido tasas de encuentro más altas. Es también observable que las estaciones con encuentros acústicos no están uniformemente distribuidas en los estratos 3 y 5. En vez de ello, los encuentros se concentran hacia *zaca* y hacia la costa.

La distribución de los encuentros acústicos coincide con la Provincia Sedimentaria de Baja California (Figura 4 y Figura 8; Carriquiry y Sánchez, 1999), incluida la única

detección lograda en el estrato 4. Esto podría indicar que la vaquita prefiere los fondos con sedimentos más finos, quizá debido a la presencia de fauna que forma parte de su espectro alimenticio. Aunque las detecciones en el estrato 5 se hallan fuera de la definición de la provincia sedimentaria, están tan cercanas que muy probablemente la composición de los sedimentos es similar. El análisis Carriquiry and Sánchez (1999) se restringió a las zonas en que muestras de sedimentos estuvieron disponibles.

Datos de CTD

En la Figura 9 se presenta la información oceanográfica generada, la cual es considerada confiable después de eliminar datos que fueron colectados cuando el sistema falló. Las primeras tres gráficas son series de tiempo en la capa superficial de salinidad (azul) y temperatura (rojo). Los mapas insertados presentan la ubicación de la estación en la que se obtuvo la serie. Será necesario obtener más información para delinear con precisión este aspecto del hábitat de la vaquita.

Sin embargo, se pueden hacer algunas observaciones comparativas. La región más norteña del delta y sus canales presentó más altas salinidades y temperaturas. Además, los ciclos mareales en esta zona tienen una alta influencia en el comportamiento de la salinidad y temperatura (Figura 9a). En ninguna de las otras estaciones se notó esta fuerte correlación. A patrón similar, de altas temperaturas y salinidades, se encontró para la región sureña del delta, aunque no hubo una marcada relación con la marea (Figure 9b). Las estaciones hacia el sur presentaron valores y tendencias similares (Figure 9b). Para mayo de 2002, más bajas salinidades y temperaturas fueron medidas en la porción este de la zona de estudio (Figure 9c), en comparación con el período de febrero a marzo del mismo año (Figure 9b) en que la temperatura fue más alta y la salinidad más baja.

Las medidas de penetración de luz fueron las esperadas (Figure 9d). La luz tiene menor penetración hacia el norte de la zona de estudio, conforme la profundidad disminuye y la turbidez aumenta. Lecturas más elevadas de luz se hallaron en el estrato 6, cerca de la Bahía Adair, en comparación con las estaciones localizadas cerca de Baja California.

Pocas millas hacia el norte, sin embargo, hubo menos luz que en las estacione cercanas a Baja California.

Tendencia de la serie de tiempo de la tasa de encuentro acústico

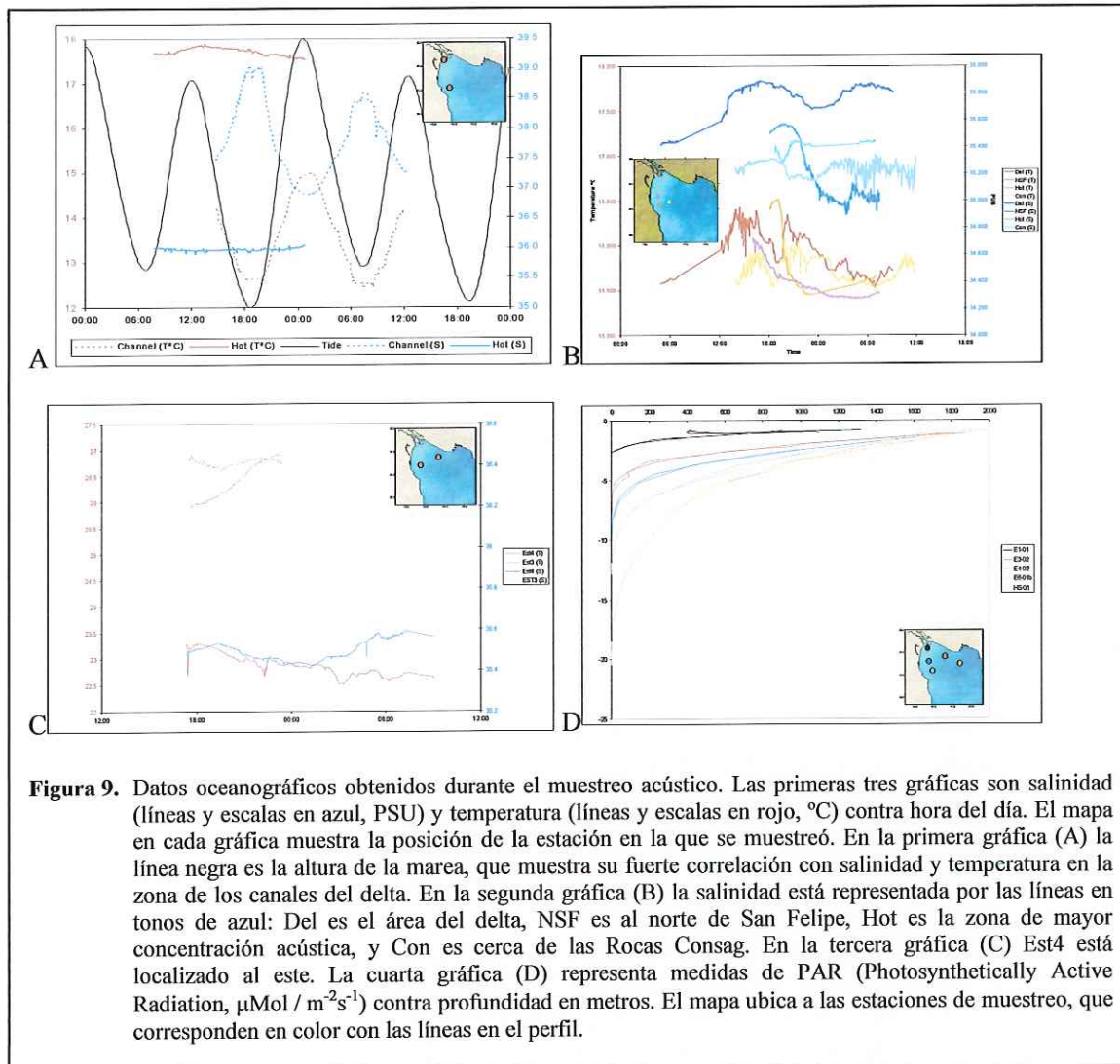
En la Figura 10 se muestran las curvas ajustadas con cada uno de los cuatro modelos de error ajustados. Se nota que la pendiente de las curvas es muy similar y marca la misma tendencia decreciente. Dado que el interés central del problema es justamente describir esta tendencia, se decidió utilizar el ajuste con el modelo binomial negativo sin el inflado por ceros.

Sólo se presenta, entonces, el ajuste bayesiano para este modelo. En la Figura 11 se muestra la gráfica de convergencia (ver el Capítulo III) para un millón de simulaciones generadas. No se aprecian indicios de falta de convergencia, dado que la media y desviación estándar de los parámetros estimados se estabilizaron. La distribución posterior (Figura 12) para la pendiente muestra contornos suaves y una moda bien definida, lo que muestra más aún que la distribución posterior debe haber convergido.

La pendiente es en promedio de -8.72 (mediana -8.6, C.V. 1.13) y la probabilidad de que la pendiente sea negativa es de aproximadamente 85% (Figura 12). Con este parámetro se pudo calcular que el nivel de decremento de la tasa de encuentro acústico es de -0.581. Con el mismo coeficiente de variación que la pendiente la desviación estándar es de 0.657.

En la Figura 12bis se presenta información sobre el ruido de fondo que impero durante el muestreo acústico. Se puede observar que en las tres bandas de frecuencia registradas (banda de marsopas y las dos bandas de referencia a 50 y 71KHz) el ruido se mantuvo en los mismos niveles durante los cruceros llevados al cabo. Los períodos de más alto ruido durante los cruceros 2001-12, 2002-03 y 2002-05 se explican porque en esas ocasiones se muestreo muy cerca de la Isla Montague, donde las aguas son muy someras, las corrientes muy fuertes y los sedimentos impactan al hidrófono en cantidades masivas.

Fuera de esta zona los niveles de ruido se mantuvieron siempre en niveles similares. Esto quiere decir que el ruido no fue una variable que se diferenciara o mostrara una tendencia con el tiempo y, por tanto, no debe haber sido un factor determinante en la tendencia encontrada en la tasa de detección acústica.



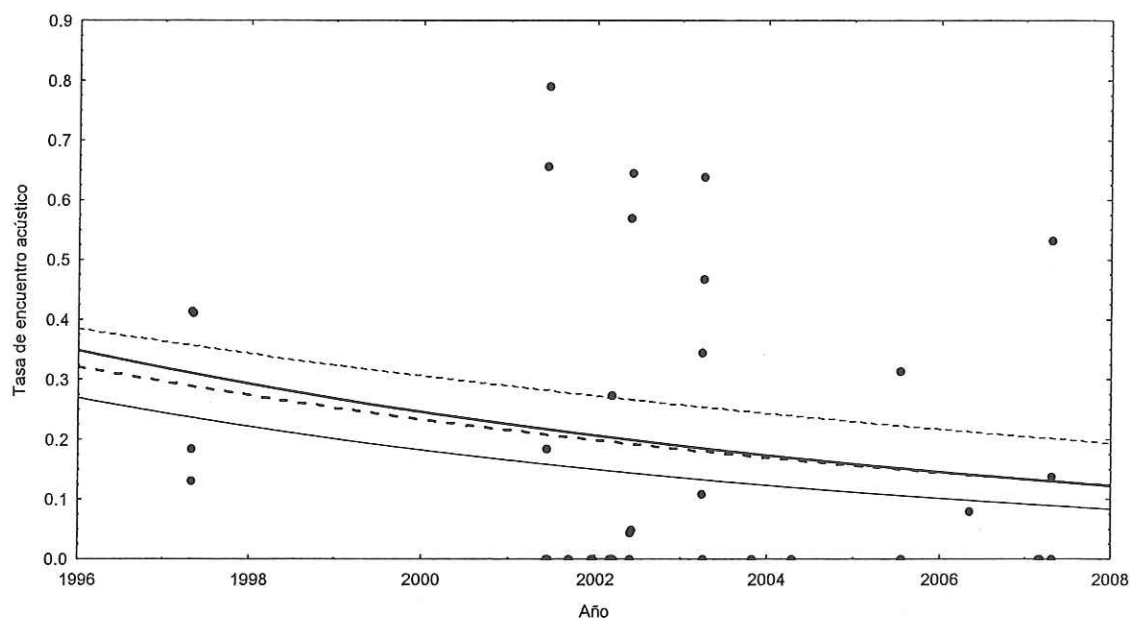


Figura 10. Dispersión de los datos sobre tasa de encuentro acústico (puntos negros). Las líneas representan el ajuste del modelo de regresión exponencial. Las líneas gruesas son para el modelo de error binomial negativo. Las delgadas para el de Poisson. Las líneas punteadas corresponden a los modelos inflados por ceros.

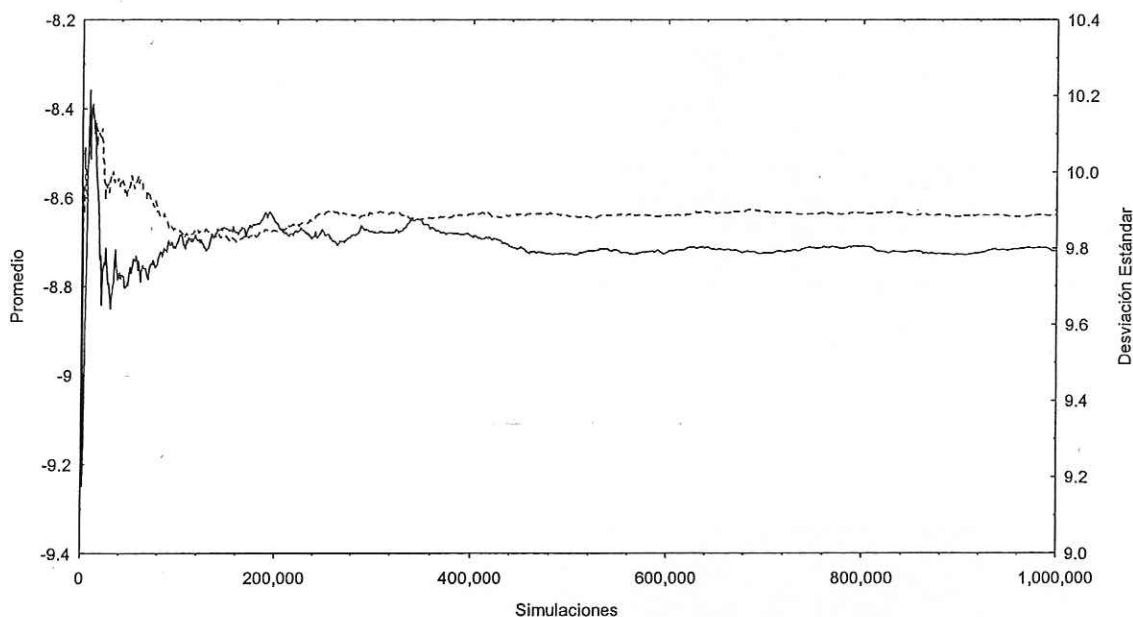


Figura 11. Gráfica de convergencia para el millón de simulaciones generadas para la estimación de la pendiente del modelo de regresión ajustado a los datos sobre tasa de detección acústica. La línea continua es el promedio móvil conforme se va agregando simulaciones a la cadena y la línea quebrada es lo mismo para la desviación estándar. Se observa que a partir de aproximadamente 450,000 simulaciones ambas medidas se estabilizan.

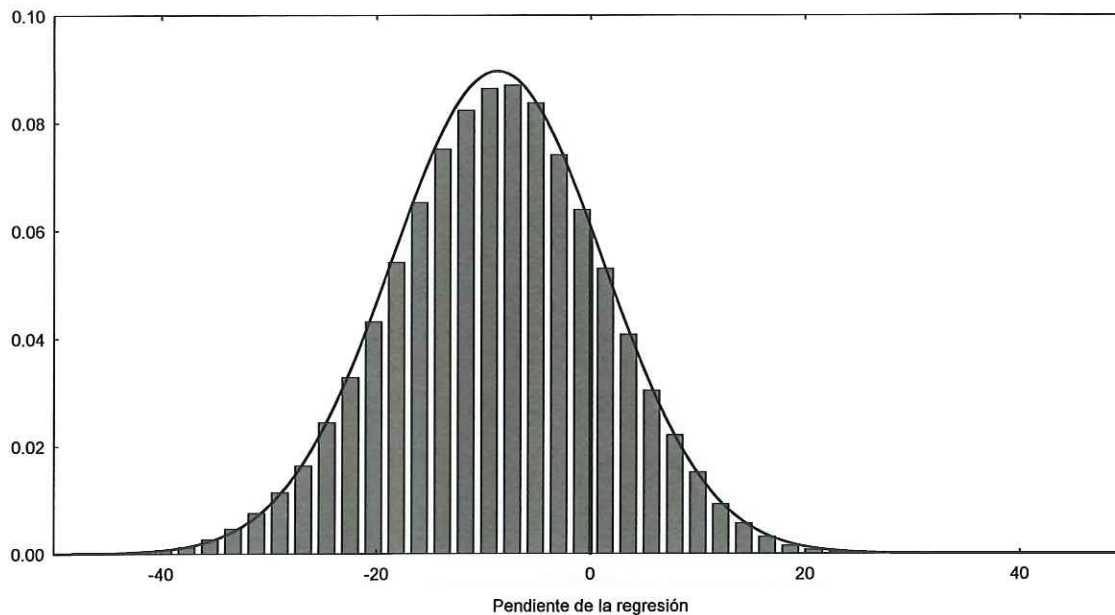


Figura 12. Distribución del millón de simulaciones generadas para estimar la pendiente del modelo de regresión ajustado a los datos sobre tasa de detección acústica. Se observa como la distribución se aproxima muy cercanamente a la distribución normal construida de la media y desviación estándar estimadas. La línea vertical divide a la distribución en valores positivos y negativos para la pendiente. El área bajo la curva a la izquierda de la línea es la probabilidad de que la pendiente sea negativa. A simple vista se aprecia que esta probabilidad es la mayor, aproximadamente de 85%.

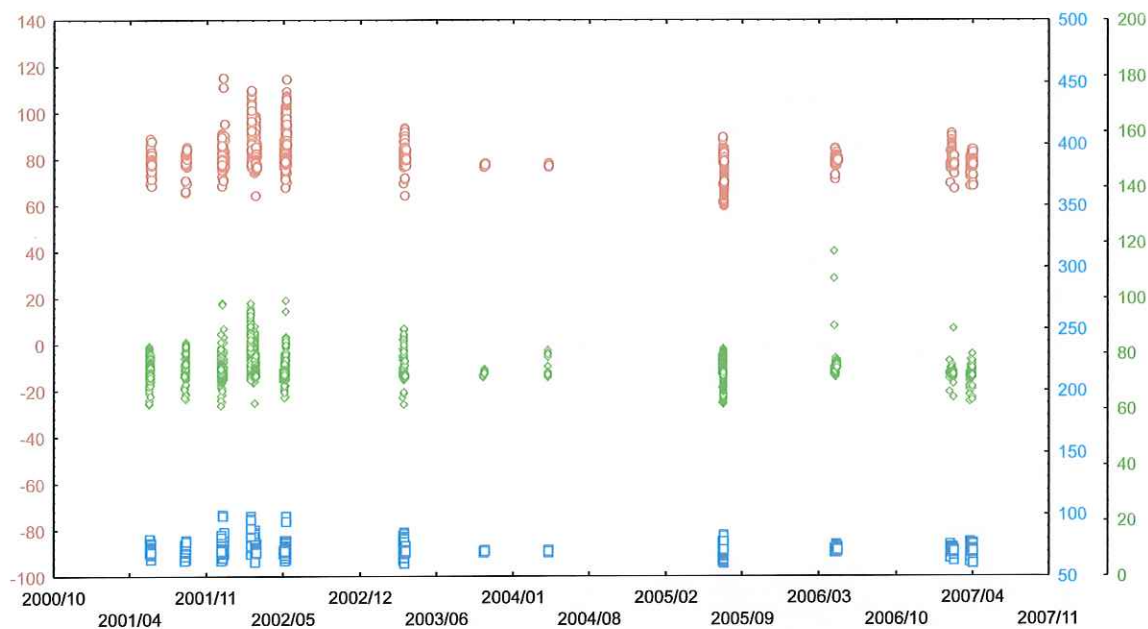


Figura 12bis. Ruido de fondo medido durante el muestreo acústico. Los puntos representan el promedio de ruido en cada minuto de muestreo medido en dB_{RMS}. El color de las escalas en los ejes verticales representa la intensidad del ruido para los puntos del mismo color. En rojo se representa el ruido en la banda de frecuencias de marsopas, en azul la banda de los 75KHz y en verde la de los 51KHz. El eje horizontal es tiempo en año / mes.

DISCUSIÓN

Proceso de muestreo

El análisis de la información claramente indica que la distribución de los grupos de vaquita, detectados acústicamente, está restringida a una pequeña porción de la zona de estudio. Una pregunta surge de este hallazgo. ¿Este patrón de distribución es un indicador confiable de la distribución de la población de vaquita?

La respuesta puede ser aproximada desde el punto de vista de dos criterios. Uno es entender si el uso de la ecolocación que la vaquita hace es diferencial entre regiones de su área de distribución. El otro es identificar potenciales sesgos, en el proceso de detección acústica, dirigidos por factores asociados a diferencias entre los estratos o regiones de muestreo en la zona de estudio.

La detección acústica de una vaquita depende principalmente de tres factores: a) que la vaquita al pasar por la zona de detección del equipo emita chasquidos; b) que el nivel de la señal emitida sea más alto que el ruido presente en los alrededores al momento de llegar al hidrófono; y c) que la vaquita emita las señales en dirección al hidrófono. ¿Hubo diferencias en la operación de estos tres factores, entre los estratos o regiones de estudio, que causaron el patrón de distribución hallado?

a) Emitir chasquidos en la zona de detección

El inciso "a" es de difícil tratamiento. Futuros cruceros podrían incluir el uso de aparatos ópticos de alta potencia, acoplados al muestreo acústico, para estimar la proporción de tiempo que las vaquitas usan la ecolocación, en los alrededores del sitio de muestreo, al menos durante horas luz.

La ecolocación es usada por los odontocetos para detectar, localizar, discriminar y reconocer objetos, así como para orientarse y navegar. Debido a que la energía acústica se propaga en agua más eficientemente que cualquier otro tipo de energía, la ecolocación es la forma más efectiva de que dispone un odontoceto para inspeccionar su ambiente, incluyendo importantes actividades biológicas como la localización de

presas y potenciales depredadores (Au, 1993). Por lo tanto, la supervivencia de estas especies depende casi enteramente de sus capacidades de ecolocación.

Considerando la alta turbidez que caracteriza al Alto Golfo de California, en comparación con otras áreas del resto del Golfo (Alvarez y Jones, 2004), el uso de la ecolocación debe ser vital para la vaquita. La turbidez, sin embargo, no es homogénea a lo largo y ancho de la cuenca. Las aguas más turbias se hallan hacia la zona noroeste. Desde esa zona la turbidez disminuye hacia el sur y este de la región (Carriquiry y Sánchez, 1999; Alvarez y Jones, 2004). Por lo tanto, las aguas cercanas a la costa de Baja California son más turbias que las aguas hacia las costas de Sonora, lo cual podría ser un factor que determine menores tasas de ecolocación hacia esta última región. Sin embargo una disminución en el uso de la ecolocación, si existe, debe ser despreciable ya que las aguas en la región sonorense aún son turbias y la vaquita debe depender de su capacidad de ecolocación.

Otra causa potencial, que podría determinar tasas diferenciales de uso de ecolocación entre áreas, es la disponibilidad o distribución de presas del espectro alimenticio de la vaquita. Las características de los sedimentos de las aguas cercanas a Sonora son distintas a las halladas para sedimentos en las aguas aledañas a Baja California (Carriquiry y Sánchez, 1999). Las características del sedimento puede ser importantes en la distribución de especies demersales, las cuales forman el componente principal de la dieta de la vaquita (Pérez-Cortés-Moreno, 1996). Si estas especies se hallan diferencialmente distribuidas en el Alto Golfo, las vaquitas podrían preferir habitar áreas donde las presas estén disponibles y sean de fácil ubicación con ecolocación. Un uso reducido de ecolocación podría darse en respuesta a una reducida disponibilidad de presas, lo cual podría ser parte del conocimiento de las vaquitas de su entorno. Si esto es así, resultaría en tasas de detección acústica menores en zonas con tales características.

No se cuenta con la información suficiente para responder a estas incógnitas, sin embargo se ha hecho esfuerzo de avistamiento en toda la zona de estudio y, hasta

ahora, no se han avistado vaquitas en la zona cercana a Sonora a diferencia de las aguas cercanas a Baja California, en la que se han realizado avistamientos, incluso concomitantes a la detección acústica. Lo mismo es cierto para un par de cruceros, llevados al cabo en 1993 y 1997, con el fin de estimar abundancia de la vaquita (Barlow *et al.*, 1997; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). No se avistaron vaquitas en la porción oriental del Alto Golfo, lo que apoya la noción de la baja o nula densidad de vaquitas en esta región, más que se haya ocasionado un sesgo en el muestreo acústico.

Por otro lado, el Alto Golfo de California es una región relativamente plana, sin importantes accidentes geográficos excepto las Rocas Consag, el delta y sus canales, y algunos bajos y trincheras formadas por el fondo arenoso o limoso y la acción de las mareas. Bajo estas circunstancias, y tomando en cuenta el reducido rango de distribución que la vaquita usa, es posible que los individuos de la especie “conozcan bien” su entorno y que usen características costeras para su ubicación, reduciendo el uso de la ecolocación para navegar, lo cual puede ser una buena estrategia para evitar depredadores. Una característica de la distribución de los encuentros acústicos, que puede ser evidencia de esto, es la ausencia de detecciones al sur del área de distribución conocida de la vaquita. En esta zona, sin embargo, ha habido repetidos avistamientos (Gerrodette *et al.*, 1995; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Las aguas de esta zona se caracterizan por tener una turbidez más baja respecto al resto del Alto Golfo, lo que podría tornar a las vaquitas más visibles. Una reducción en el uso de ecolocación podría representar una estrategia para evitar depredadores en esta zona.

El hecho de contar con avistamientos confirmados en esta zona al sur, donde no hubo encuentros acústicos, evidencia que en la porción oriental la densidad de vaquitas es muy baja o prácticamente nula, ya que además de no haber encuentros acústicos (excepto el único que se obtuvo en el estrato 4 pero muy cerca del estrato 3) el número de avistamientos confirmados es muy bajo. El muestreo acústico, entonces, parece ser una buena representación del patrón de distribución de la vaquita, aunque

aún es necesario aplicar mayor esfuerzo de muestreo, acústico y visual, para confirmar la baja densidad de la porción oriental de la zona de estudio así como la baja actividad acústica en la región sur.

b) Nivel de señal emitida más alto que el ruido de fondo

El equipo de detección acústica puede manejar este factor al menos en parte. El usuario puede seleccionar el valor de los parámetros que regulan la identificación de chasquidos, tanto el nivel de potencia requerido en la banda de marsopas como la diferencia en potencia requerida entre esta banda y las dos de referencia (centradas en 50 y 71KHz). Los datos generados en los primeros cruceros permitieron definir que, para identificar adecuadamente chasquidos tipo vaquita, es necesario que su nivel en la banda de marsopas sea mínimo de 90 dB_{RMS} re. 1μPa al llegar al hidrófono. Además, se definió que un chasquido tipo vaquita debe ser en la banda de marsopas, al menos, 15 dB_{RMS} re. 1μPa más alto que las bandas de referencia para ser positivamente identificado.

El detector acústico está preparado para obtener datos sobre ruido de fondo. Cada segundo el equipo almacenó niveles de ruido en cada una de las tres bandas, con lo que se obtuvo una gran cantidad de información. Una inspección de esta información (Tabla IV) muestra que, en promedio, el nivel de ruido es menor a 75 dB_{RMS} re. 1μPa en cada uno de los estratos de muestreo. Los pequeños coeficientes de varianza indican que sólo durante cortos lapsos el ruido es superior al promedio. Estos períodos pueden incluir zonas en donde hubo presencia de invertebrados o peces productores de ruido, lapsos en los que hubo embarcaciones en movimiento en los alrededores, períodos bajo condiciones de fuerte oleaje o de fuertes corrientes acompañadas e sedimentos, y períodos en los que se utilizó la ecosonda de abordó o algún otro equipo electrónico como radios de telecomunicación. Del total del tiempo de muestreo, 7.52% ocurrió con niveles de ruido superior a 75 dB_{RMS} re. 1μPa en la banda de los 71KHz y 18.11% en la banda de los 50KHz. En la banda de marsopas solamente 3.93% del tiempo el nivel de ruido fue superior a 90 dB_{RMS} re. 1μPa. Esta

tendencia es muy similar cuando se calcula para cada estrato. La distribución del ruido de fondo, entonces, es cercanamente homogénea, aunque existe un aparente gradiente latitudinal. Esto es lo esperado, dado que los niveles de ruido deben ser mayores en las someras aguas del delta. De tal forma, similares condiciones de ruido prevalecen en la mayor parte de la zona de estudio, lo que indica que no puede haber un sesgo debido a la dispersión de este. Es decir, no hay evidencias que indiquen que el ruido pudo ocultar señales de vaquita diferencialmente entre estratos.

Otros componentes que juegan un papel en el nivel de la potencia recibida de chasquidos es la distancia del animal al hidrófono, así como la potencia a la cual emitió los chasquidos. Como se analizó antes no hay diferencias en el nivel de ruido entre estratos, por lo tanto no hay elementos que permitan suponer que la vaquita requiere emitir señales a más alta potencia, en algunas zonas, para evitar que sus chasquidos sean enmascarados.

Tabla IV. Datos sobre ruido de fondo durante el muestreo. El número de datos es el número de veces que el aparato almacena niveles de ruido para intervalos de un segundo. Prom es el promedio de los niveles de ruido en cada una de las tres bandas de frecuencia en dB_{RMS} re. $1\mu\text{Pa}$. C.V. es el coeficiente de variación porcentual.

Estrato	# de datos	Banda de		71 KHz		50 KHz	
		marsopas		Prom.	CV	Prom.	C.V.
		Prom.	C.V.				
1	263,574	83.8	9.3	72.2	2.9	74.3	4.1
3	386,430	81.7	4.0	72.6	3.7	74.4	4.8
4	345,964	81.0	3.4	72.0	2.1	74.1	3.1
5	655,507	80.3	3.3	71.8	2.0	73.6	2.5
6	314,647	80.1	2.9	71.9	2.6	74.2	3.8

Por otro lado, el uso de diferentes embarcaciones a través del período de estudio podría haber interferido en tendencia de las vaquitas para acercarse a la embarcación. En el caso de los cruceros 2003-03 y 2004-04, la planta generadora estuvo en operación durante todo el tiempo, a diferencia de los otros cruceros en los que se mantuvo apagada por lapsos grandes. Sin embargo, se logró tener avistamientos

desde todas las embarcaciones utilizadas excepto el barco arrastrero usado en el crucero 2004-04. En este último crucero tampoco se logró obtener encuentros acústicos. Para las tres embarcaciones en las que se tuvo avistamientos, estas ocurrieron incluso a cortas distancias del barco de hasta 30 ó 40 metros. De tal forma se infiere que las distancias de las vaquitas al hidrófono no fueron afectadas por el tipo de embarcación utilizada, con lo cual no se espera que esto haya introducido un sesgo.

c) Emitir señales en dirección al hidrófono

Una aproximación para discutir sobre este criterio puede ser a través del entendimiento de los patrones de movimiento de la vaquita. Durante un crucero efectuado en 1997 para estimar la abundancia de la vaquita, utilizando procedimientos de medición de distancias (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999), se tuvo la oportunidad de determinar la posición de 50 grupos avistados de vaquitas en repetidas ocasiones. Con esta información se estimó la dirección de nado de estos grupos. En el caso de los grupos para los cuales sólo se tuvo un segundo avistamiento la dirección se calculó con la simple unión de puntos. Cuando se obtuvo más avistamientos se ajustó una línea con mínimos cuadrados.

Las direcciones en bruto muestran que la dirección de nado se da en todos sentidos (Figura 13). Sin embargo, para realizar un análisis más detallado, se usó el programa MAR 6.0 (Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada – Océanografía Física - <http://oceanografia.cicese.mx/predmar/marques.html>) para calcular el componente vertical de la velocidad de marea al momento que ocurrieron los avistamientos, como una medida proporcional del componente horizontal instantáneo de la corriente mareal (Marinone y Lavín, 1997), el cual es el que los animales realmente experimentan. Debido a la configuración del Golfo de California, la dirección de la corriente instantánea es aproximadamente noroeste-sureste (Marinone y Lavín, 1997), siendo el flujo hacia el noroeste. El programa MAR es capaz de brindar altura de la marea a intervalos tan pequeños como un minuto para una posición geográfica cercana a la zona de distribución de la vaquita (San Felipe,

B.C.). La velocidad vertical fue calculada como la diferencia entre dos lecturas consecutivas, en milímetros por minuto. El valor para la velocidad durante un avistamiento resultó del promedio de diez diferencias tomadas de la lectura de la altura de la marea 10 minutos antes del primer avistamiento.

Los datos analizados indican que las vaquitas nadan, en promedio (calculado con estadística circular; Zar, 1984), en una dirección aproximada a la dirección de la corriente de marea bajo condiciones de altas velocidades verticales (lo que es proporcional a altas velocidades horizontales). Por otro lado, las vaquitas tienden a nadar en direcciones indeterminadas a bajas velocidades verticales (Tabla V y Figura 13). Una excepción fue la dirección de nado a alta velocidad durante el reflujo mareal, sin embargo pocos datos fueron obtenidos bajo estas condiciones. Si las vaquitas tienden a nadar en dirección de la corriente la probabilidad de detectarlas podría ser más baja, ya que habría menos ocasiones en las que pasaran por el rango efectivo de detección del equipo de detección. Por lo tanto, el que la embarcación esté en el sitio por donde pasará vaquitas es un evento estocástico. Ubicar la posición de las estaciones al azar en todos los estratos, entonces, fue una forma de evitar la introducción de potenciales sesgos. Además, las corrientes de marea instantáneas operan en direcciones similares en todo el Alto Golfo (Marinone y Lavín, 1997), por lo que tampoco se introduce un sesgo por diferencias entre las características de los estratos.

Otra pieza de análisis viene del momento del ciclo mareal en el que se realizaron los avistamientos. Durante el mismo crucero de 1997 fue más frecuente encontrar vaquitas durante el período de mareas vivas que durante las mareas muertas (Figura 14). La magnitud de la marea para realizar un análisis fue calculada como la diferencia entre la marea más alta y la más baja del día en que se consiguió el avistamiento. Aunque las vaquitas fueron detectadas con más frecuencia durante mareas vivas, los avistamientos se dieron a lo largo del ciclo mareal (Figura 14). Un patrón similar, pero no muy marcado, ocurrió con los encuentros acústicos. Hay una ligera tendencia a detectar más vaquitas durante el ciclo de mareas vivas (Figura 14).

Es posible que durante mareas vivas, con más fuertes corrientes, las vaquitas sean más activas, lo cual podría hacer más probable su detección visual y acústica. Para comparar el proceso de muestreo entre estaciones en las cuales se logró obtener encuentros acústicos, con aquellas en las que no se obtuvieron, se usaron dos criterios: i) cobertura del ciclo circadiano, y ii) cobertura del ciclo mareal.

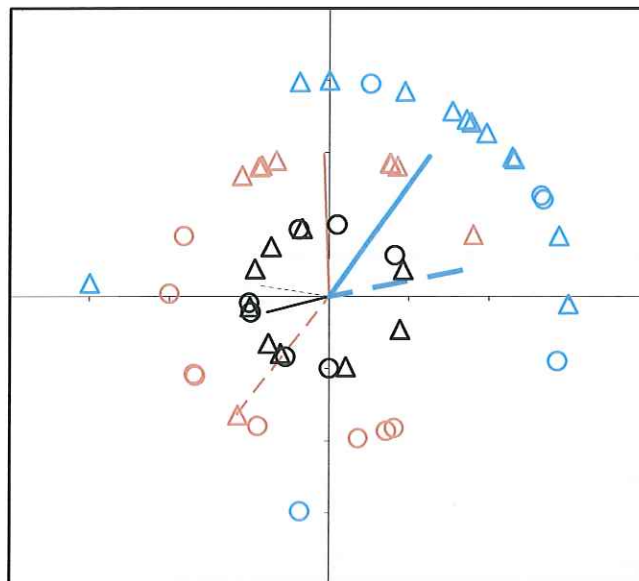


Figura 13. Dirección de nado de vaquitas a tres niveles de velocidad de la marea (componente vertical). El nivel bajo se presenta círculos y triángulos negros; el medio con círculos y triángulos rojos; el alto con círculos y triángulos azul marino. Los triángulos representan dirección de nado durante el flujo de marea (cercanamente al norte del Alto Golfo) y los círculos la dirección de nado al reflujo (en la dirección contraria). La parte alta de la gráfica representa el norte y la izquierda el oeste. La posición de los círculos y triángulos representan la dirección de nado como en una brújula. La dirección promedio de nado fue calculada para cada nivel de velocidad y dirección de marea, y se representa con una línea del mismo color de los puntos que representa. Las líneas continuas son para el flujo y las quebradas para el reflujo. La magnitud de las líneas es inversamente proporcional a la varianza.

Tabla V. Descripción de las direcciones de nado de vaquitas en relación con la marea. El componente vertical medido en milímetros por minuto. La dirección se mide en grados. Dispersión es la variabilidad de la muestra en términos de estadística circular.

Componente vertical de la velocidad de marea	Flujo			Reflujo		
	N	Dirección	Dispersión	N	Dirección	Dispersión
Alto (>20)	12	32.97	0.23	5	77.79	0.43
Medio (>=10 y <20)	9	358.08	0.34	8	215.14	0.33
Bajo (<10)	9	254.22	0.73	7	279.79	0.71

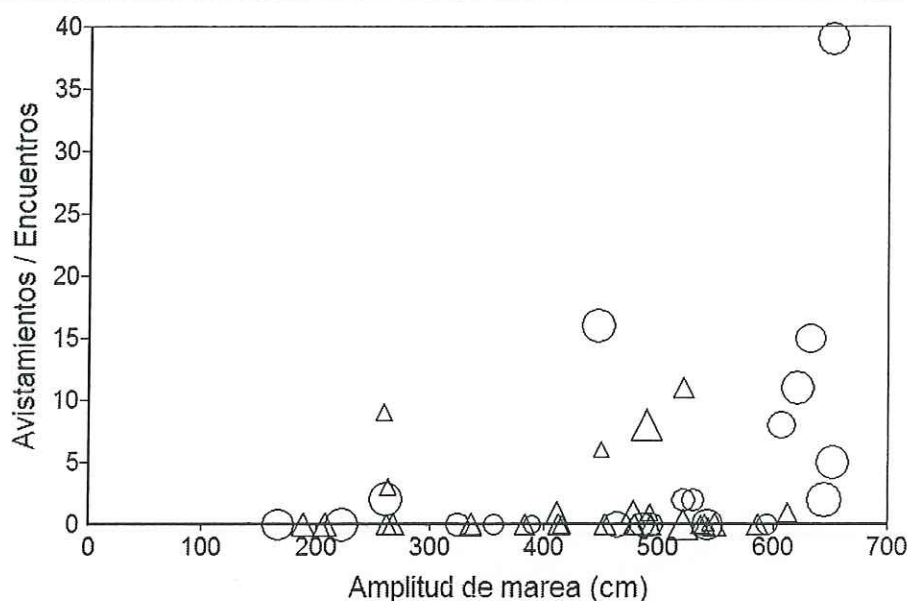


Figura 14. Número de avistamientos (círculos) y encuentros acústicos (triángulos) contra amplitud de la marea del día en que fueron obtenidos. La amplitud fue calculada como la diferencia entre la marea más alta y más baja del día. Los días que ocurrieron durante la fase de mareas muertas están hacia la izquierda de la gráfica y lo opuesto para los días en mareas vivas. Cada punto en la gráfica representa una unidad de muestreo. En el caso de avistamientos un día de esfuerzo durante horas luz, y una estación de muestreo en el caso de los encuentros acústicos. El tamaño de los círculos y triángulos representa la magnitud del esfuerzo aplicado (distancia recorrida para avistamientos y horas para encuentros). Los puntos en cero son unidades en las que no se detectaron vaquitas. Se nota una tendencia a tener mayor número de avistamientos y encuentros acústicos durante mareas vivas, aunque más marcado para avistamientos. La magnitud del esfuerzo no parece tener una correlación clara.

El esfuerzo en cada estación durante los cruceros 2001-09 al 2007-04 (cruceros en los que se trató de muestrear por un día completo en cada estación) fue dividido en períodos de una hora, con el fin de analizar cómo se cubrió el ciclo circadiano entre estratos. Se construyó una matriz con 24 columnas, una para cada hora de un día completo. En renglones se colocó a las estaciones. Un valor de uno fue asignado en cada celda cuando en la estación correspondiente se había hecho esfuerzo a esa hora del día, cero de lo contrario. Luego se calculó el número de veces que se había muestreado a una hora particular del día sumando las columnas. Esto se hizo por separado para las estaciones en que hubo encuentros acústicos con vaquitas y para aquellas en que no ocurrieron. Esta información se comparó con un análisis de Chi Cuadrada, el cual no brinda evidencias de que el proceso de muestreo, bajo este criterio, se haya diferenciado entre ambos tipos de estaciones ($\chi^2=6.33$, g.l.=23,

$p > 0.9$). Eso es, no se evidencia que las horas de muestreo, aleatorias dado que dependieron de tiempos de navegación y condiciones climatológicas, hayan resultado en sesgos que hubieran ocasionado diferencias en las tasas de encuentro acústico.

Por otro lado, se comparó el ciclo mareal entre estaciones con y sin encuentros acústicos. El promedio del recorrido de la marea (diferencia entre la marea más alta y más baja de un día) para estaciones en las que no hubo encuentros acústicos fue de 418.0cm, mientras que para las estaciones con encuentros acústicos este fue de 442.5cm. La diferencia de 24.5cm luce pequeña comparada con el valor absoluto del recorrido mareal. Los coeficientes de variación fueron, respectivamente, de 30.2 y 26.31%. Una prueba t no evidenció diferencias entre ambos tipos de estaciones ($t = -0.5$, g.l.=17, $p=0.62$). Esto implica que el proceso de muestreo no estuvo sesgado por este factor, el cual mostró tener alguna influencia en el proceso de detección. Es decir, dado que en ambos tipos de estaciones se muestreo bajo un régimen mareal similar, se espera que la probabilidad de detección de vaquitas sería la misma si esta se distribuyera de forma homogénea.

Con todos los potenciales factores de sesgo analizados, se infiere que no se introdujeron sesgos importantes con el proceso de muestreo, lo que indica que el patrón de distribución de encuentros acústicos hallado es un indicador de su distribución real. Es decir, la ausencia de encuentros con vaquitas en la porción oriental del Alto Golfo hacia aguas de Sonora es el resultado de un fenómeno natural y no de un sesgo en el análisis. Sin embargo, la ausencia de registros acústicos hacia el sur de la porción occidental cerca de las costas de Baja California podría ser un sesgo, dado que se han avistado vaquitas en esa zona en otros trabajos. Este sesgo, sin embargo, no parece haber sido introducido por el proceso de muestreo, sino por el uso de la ecolocación que la vaquita realiza en estas aguas menos turbias que el resto de la zona en que se distribuyó. Los individuos que nadan en esta zona podrían reducir el uso de la ecolocación quizá como una estrategia para evitar depredadores. Es recomendable, para futuros trabajos, continuar con la realización de esfuerzo de muestreo en las zonas en las que la vaquita no fue encontrada. Este muestreo podría ser asistido con instrumental óptico potente con

el fin de maximizar las probabilidades de avistar individuos. Esto despejaría dudas sobre la distribución poblacional y permitiría aprender sobre hábitos relacionados con la ecolocación.

Distribución

Si el proceso de muestreo no sesgó los resultados, la restringida distribución hallada para los encuentros acústicos debe ser el resultado de una restringida distribución poblacional y una población muy reducida. En la zona en la que se distribuyó la vaquita, de acuerdo a este estudio, hubo también estaciones de muestreo en las que no se detectaron vaquitas. Un caso interesante es el que se dio durante el crucero 2003-03. Un objetivo central de este esfuerzo fue el de obtener material gráfico de la vaquita que probara su existencia ante una campaña que apuntaba en sentido contrario. Para maximizar la probabilidad de detectar vaquitas el esfuerzo se centró en *zaca*. Durante la primera estación efectuada la tasa de encuentro acústico fue de 0.338 detecciones por hora. La segunda estación fue ubicada a tan sólo 13 millas náuticas al norte de la primera y la tasa de detección fue de 0.110. La tercera estación se ubicó a escasas tres millas al oeste de la primera estación y no se detectaron vaquitas en 16 horas de esfuerzo. Unas horas después de retirarse de esta estación, por contingencia climatológica, se regresó al mismo punto por otras 4 horas de esfuerzo y se detectaron dos grupos de vaquitas, lo que resultó en la tasa de encuentro más alta para el crucero (0.562). La cuarta estación fue ubicada en el mismo punto de la primera estación y la tasa de encuentro resultante fue de 0.423, 1.25 veces la obtenida en la primera ocasión.

Esto indica la alta variabilidad de la tasa de encuentro, lo que debe estar ligado a la distribución y movimientos de la población. Las diferencias halladas entre estaciones tan cercanas en tiempo y espacio indican que la población podría distribuirse de forma agregada. Se sabe que la vaquita forma grupos muy pequeños, en promedio de dos individuos (varios de ellos pares de madre y cría; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999), de manera que si esta agrupación existe no sería muy conspicua. La forma en que esta agrupación podría formarse es a través del movimiento sincronizado de los grupos, de

manera que se desplazaran juntos aproximadamente por las mismas zonas formando un tipo de distribución parchada. Evidencia adicional que apoya esta observación viene de la información generada en 1997 para estimar la abundancia (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Los avistamientos no se dieron homogéneamente a través del periodo de muestreo que duró cerca de treinta días. Más bien se dieron grupos de avistamientos en pocos días del muestreo, lo que refleja nuevamente la tendencia a la agrupación. Las razones y causas de este agrupamiento necesitan ser explicadas. Podrían deberse a comportamientos naturales de la especie, aunque en el mismo trabajo sobre estimación de abundancia se explica la reacción de alejamiento de la vaquita a las embarcaciones en movimiento. La presencia de la flota pesquera, tanto de arrastre como artesanal, podría tener una influencia en este patrón de distribución y movimientos.

La información oceanográfica obtenida es débil para explicar, de forma concluyente, la distribución y movimientos de la vaquita. Es claro que las condiciones de la zona del delta son distintas al resto de la región. Así mismo, hay diferencias entre las regiones oriental y occidental en características de sedimentos (Carriquiry y Sánchez, 1999) y turbidez (Alvarez y Jones, 2004). Las aguas más turbias se encuentran en los estratos tres y cinco definidos en este trabajo, que coinciden con la zona de distribución de la vaquita. Esto apoya la hipótesis de que la distribución de la vaquita se restringe a aguas turbias quizá para evitar depredadores. La ausencia de vaquitas en la región del delta podría ser un indicativo de su inhabilidad para nadar bajo condiciones de fuertes corrientes, lo cual puede ser apoyado por la presencia de tursiones (*Tursiops truncatus*) en esta región. El mayor tamaño corporal de esta especie quizá le brinde esta capacidad en comparación con la vaquita. Otra probable explicación es que, precisamente, la presencia de tursiones limita la distribución de vaquitas. Existe evidencia documentada de competencia y agresión por parte de tursiones a marsopas comunes (Ross y Wilson, 1996), lo que apoya esta observación.

Se debe tomar en cuenta que los encuentros acústicos con vaquitas se distribuyen en áreas de fondos con sedimentos finos. Esta característica, junto a otras características oceanográficas, puede determinar la composición faunística de la zona, que podría ser la

más adecuada para la supervivencia de la vaquita. La misma idea fue propuesta por Pérez-Cortés-Moreno (1996), después de realizar un análisis de la dieta de la vaquita de la revisión de contenidos estomacales de individuos capturados en redes.

Implicaciones del patrón de distribución

D'Agrosa *et al.* (2000) reportó que la captura incidental de vaquitas por la flota ribereña de El Golfo de Santa Clara (Figure 1), durante 1993, ocurrió en lugares cercanos a la costa de Sonora y en la porción central del Alto Golfo (lugares que se corresponden con los estratos orientales definidos en este trabajo; *cf.* Figura 1 en D'Agrosa *et al.*, 2000). Otra pieza de información se obtiene de la conjunción de avistamientos confirmados de vaquita (Figura 15). Se observa que estos avistamientos históricos indican la presencia de vaquitas en la porción oriental del Alto Golfo, hacia las costas de Sonora. La densidad de vaquitas en esta zona debe ser baja, tal como se ha estimado en otros trabajos (Barlow *et al.*, 1997; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999), sin embargo se podría inferir un cambio en el patrón de distribución, restringiendo a la población hacia la porción occidental, tal como se evidencia a partir de la información acústica generada.

Una posible explicación para este cambio puede residir en una reducción drástica de la población, de manera que la población remanente se distribuye en el hábitat más óptimo para su supervivencia, el cual se haya en los alrededores de la *zona acústica de mayor concentración*. La especie aún podría usar áreas fuera de esta zona, pero por breves lapsos, por pocos individuos o sólo por ciertas temporadas, lo que sería una razón para esperar bajas o nulas tasas de detección acústica.

Es importante notar que el ámbito hogareño de la vaquita, tal como se evidencia por la información acústica, es extremadamente restringido en comparación con la de otros cetáceos en el Golfo de California y en el mundo (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002). Esta limitada distribución subraya la fragilidad de la especie. Si la tendencia en la tasa de captura incidental en redes continua la población podría alcanzar niveles extremadamente críticos en muy poco tiempo (ver el Capítulo III de este trabajo). Ante este escenario la distribución de la vaquita podría calificarse de catastrófica, pues se

sobrepone con una de las áreas de más intensa pesca en la región (Figura 16). Por lo tanto, es materia de urgencia tomar acciones para evitar más mortandad de vaquitas en redes agalleras.

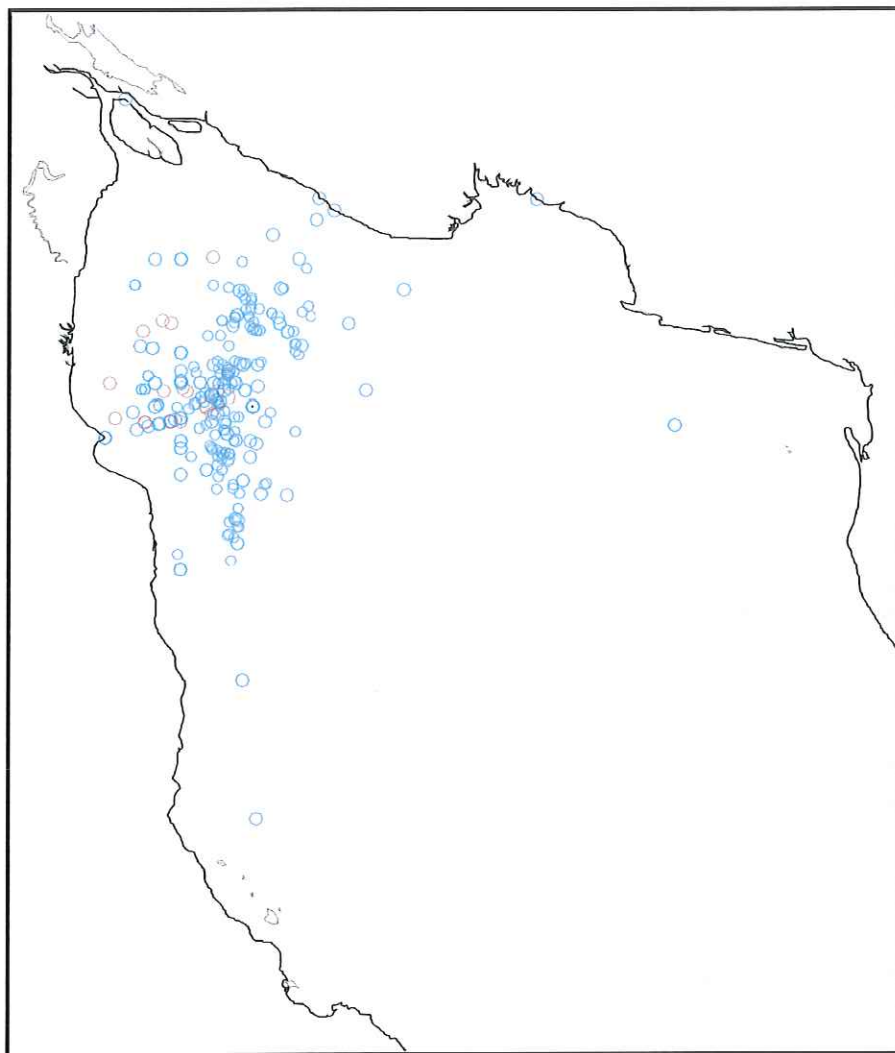


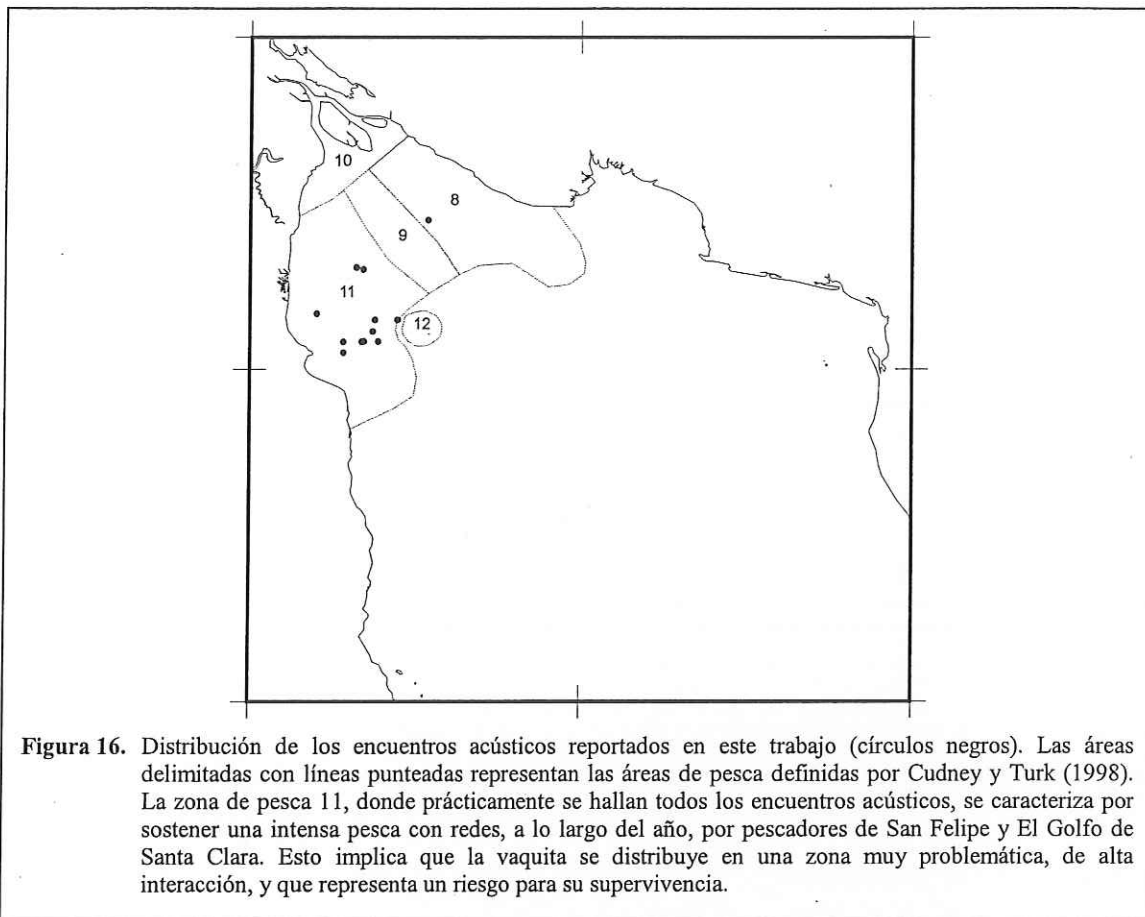
Figura 15. Avistamientos de vaquitas (círculos azules) y ubicación de encuentros acústicos (círculos rojos). Los avistamientos fueron tomados de: Wells *et al.*, 1981; Brownell, 1982; Vidal *et al.*, 1987; Silber, 1987, 1988, 1990; Gerrodette *et al.*, 1993; Manzanilla-Naim y Lanham, 1995; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1997.

Tendencias poblacionales recientes evidenciadas por la tasa de detección acústica

La tendencia de la tasa de detección acústica proviene de la colección de diez años de datos (Tabla II). En la primera fase de estudio se utilizó la primera generación del equipo de detección acústica (Chapell *et al.*, 1996). Durante el resto del estudio se utilizó la segunda generación (Gillespie y Chappell, 2002), aunque durante los últimos cruceros se utilizó la versión estéreo de esta segunda generación. Sin embargo esta versión no es más que la conjunción de dos equipos iguales con una versión estéreo de hidrófono, con dos elementos sensibles de las mismas características que la versión mono. Uno de los equipos es usado para medir los ángulos de incidencia de las señales recibidas, mientras que el otro es usado normalmente para adquirir los datos. Siempre se cuidó que el aparato responsable de almacenar la información fuera el mismo que se había venido utilizando antes de empezar el uso de la versión estéreo. De tal forma, a lo largo del estudio se utilizaron dos tipos diferentes de detector, el de primera generación sólo durante el crucero de 1997, y tres diferentes hidrófonos, aunque el correspondiente a la versión estéreo, en su configuración mono y estéreo son de las mismas características. Además, estos hidrófonos se nos proporcionaron calibrados con los mismos estándares (Gillespie y Chappell, 2002).

Se tuvo la oportunidad en 1997 de avistar vaquitas al mismo tiempo en que se obtuvo su detección acústica. De acuerdo a los presentes en la embarcación la distancia al bote en el momento de su avistamiento fue de entre 500 a 800 metros. En 2005 también se tuvo la oportunidad de observar un grupo de vaquitas mientras se detectaba acústicamente. La gente abordo estimó una distancia similar a la de 1997. Este es un indicio de que ambos equipos tuvieron capacidades similares. Sin embargo, no se tuvo la oportunidad de hacer una calibración y comparación conjunta, dado que cuando se contó con la segunda generación del equipo el primero se había descompuesto y no fue posible su reparación. De tal forma, no se puede asegurar con certeza que las detecciones medidas con ambos equipos y las tres versiones de hidrófono sean comparables, aunque por la distancia de detección se aprecia que ambos equipos detectaron vaquitas muy cerca del límite

máximo de detección, a juzgar por la dispersión teórica de una señal acústica de alta frecuencia en el mar.



Otro elemento que pudo incluir un sesgo en el estudio fue el patrón de uso de la planta generadora de las embarcaciones abordo de las cuales se realizaron los cruceros. Para el crucero de 2003 y 2004 se utilizaron embarcaciones de mediano calado, las cuales tuvieron encendida la planta generadora durante todo el tiempo. En 2003 hubo un buen número de detecciones acústicas mientras que para 2004 no las hubo. Abordo de la embarcación llamada Pasaporte y la llamada Koipai se intentó mantener la planta apagada y sólo encenderla para cargar baterías o realizar otras labores de mantenimiento. Sin embargo, no se llevó una bitácora formal al respecto. Abordo de estas embarcaciones se tuvieron estaciones con y sin detecciones acústicas, así como avistamientos. La panga que se utilizó en 1997 no contaba con planta generadora y

durante todo el muestreo se estuvo en silencio. Se detectó una vaquita en cada uno de los cinco días que se realizó el muestreo. No se contó tampoco con perfiles acústicos de las plantas generadoras utilizadas, así que no se puede hacer una comparación al respecto. A simple oído, las plantas más ruidosas fueron las que operaron desde las embarcaciones mayores utilizadas. Durante el crucero de 2003, cuando la planta estuvo prendida todo el tiempo, se tuvo la oportunidad de avistar un par de vaquitas (madre con cría) muy cerca del barco, por lo que parece que el sonido de la planta no les afectó. Sin embargo, el perfil acústico podría ser importante, además de la intensidad, en determinar el ahuyentamiento de animales. Será necesario, en futuros cruceros, llevar un control preciso de este factor. Aún con esto, hay elementos que permiten inferir que la estimación de la tendencia de la tasa de encuentro acústico ha efectivamente disminuido, más que ser el resultado de un sesgo.

Como se mostró en la Figura 12bis, no se encontró una tendencia en los niveles de ruido ambiental en los sitios de muestreo. Altos niveles de ruido podrían potencialmente enmascarar sonidos producidos por vaquitas, evitando su detección, o incluso podría ahuyentarlas de la zona. Fue claro que el ruido generado en las partes más someras al norte de la zona de estudio, hacia la zona del delta, es notablemente más alto que en el resto de la cuenca. Sin embargo, en la zona en la que se detectaron vaquitas acústicamente, y en el resto de la cuenca, los niveles de ruido no mostraron tendencia alguna. De tal forma, este no parece ser un factor que tomara parte en la determinación de la tasa de encuentro acústico entre temporadas, por lo que no se infiere que haya habido un sesgo debido a esta variable.

La tasa de encuentro acústico debe ser proporcional a la densidad poblacional, ya que mientras mayor número de animales haya en la población mayor será la probabilidad de obtener detecciones acústicas. Para una especie como la vaquita, que forma pequeños grupos (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999), la tasa de detección acústica debe ser muy sensible a cambios en densidad poblacional. Por lo tanto, la tendencia decreciente en la tasa de encuentro acústico estimada en este trabajo, es evidencia de una tendencia a la reducción poblacional tal como se espera ante la continuada mortandad de vaquitas en

redes (Rojas-Bracho *et al.*, 2006). Se estima que la tasa de encuentro acústico ha decrecido, en diez años, aproximadamente 65%. La reducción en la densidad poblacional podría ser mayor, dado que lo que se detecta acústicamente son grupos de vaquitas, no individuos.

CONCLUSIÓN

La vaquita usa una pequeña área de distribución caracterizada por aguas turbias y someras, así como por soportar una intensa actividad pesquera. En esta zona es donde la vaquita usa más intensivamente la ecolocación, lo que permite suponer que es muy importante para su supervivencia. Si esta área es importante por sostener la trama trófica de la cual subsiste la vaquita, o por alguna otra razón, es importante materia de investigación en el futuro inmediato, con el fin de tomar las medidas adecuadas para su conservación y manejo. Las áreas identificadas hacia el sur de la zona de estudio, donde no hubo encuentros acústicos, no deben ser descartadas en este esfuerzo ya que muy probablemente la vaquita sigue usando esta zona. Aún se deben aplicar esfuerzos para determinar el real valor de esta zona para la especie, lo que permitirá una mejor implementación del plan de recuperación. Hay una lata probabilidad de que la población haya experimentado una reducción drástica en los últimos años (ver Capítulo III), lo cual mantiene a la población bajo un estatus muy crítico. Es materia de urgencia poner en operación las mejores medidas de recuperación para salvar a esta especie única en el mundo.

III. ESTATUS ACTUAL DE LA POBLACIÓN DE LA VAQUITA: UNA APROXIMACIÓN BAYESIANA UTILIZANDO DATOS BIOLÓGICOS Y PESQUEROS DISPONIBLES

INTRODUCCIÓN

La vaquita ha sido una de las últimas especies de cetáceos en ser descubiertas en el mundo. Su descripción fue publicada en 1958 (Norris y McFarland, 1958) y se basó en restos óseos encontrados cerca del puerto de San Felipe en el Alto Golfo de California. Este es uno de los poblados pesqueros de la región, único lugar de distribución de la vaquita en el mundo (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002).

Desde su descripción el trabajo científico al rededor de la vaquita fue escaso. Entre trabajos publicados y no publicados, se conoció de más reportes de restos óseos (*e.g.* Norris y Prescott, 1961; Orr, 1969) así como de descripciones de su esqueleto (Noble y Fraser, 1971). También se analizaron contenidos estomacales (Fitch y Brownell, 1968), parásitos (Dailey y Brownell, 1972) y contenido de contaminantes (O'Shea *et al.*, 1980).

En 1976 se publicó por primera vez un reporte sobre estatus de la vaquita (Villa, 1976; Villa-Ramirez, 1978) y, en 1981, fue llevado a cabo un primer intento de prospección en el Alto Golfo de California para el estudio de mamíferos marinos, con particular énfasis en la vaquitas (Wells *et al.*, 1981). Finalmente, en 1983, se publicó el primer recuento sobre investigación de la vaquita (Brownell Jr., 1983), y no fue sino hasta 1986 cuando se describió la apariencia externa de la vaquita a partir de especímenes frescos, recién recuperados de redes agalleras (Brownell Jr. *et al.*, 1987).

Durante la segunda mitad de los años 1980 se inició el primer esfuerzo sistemático para estudiar a la vaquita. La distribución de la vaquita se restringió a aguas del Alto Golfo de California (Brownell Jr., 1986) y algunos grupos de investigación iniciaron prospecciones en la zona (*e.g.* Aguayo 1986; Robles, 1986; Silber, 1987). Posteriormente se publicó el primer trabajo resultado de trabajo sistemático en campo para la búsqueda y avistamiento de vaquitas (Silber, 1988; Silber, 1990; Silber, 1990).

Durante la primera parte de los años 1990 se ejecutaron otras investigaciones sistemáticas, con más énfasis en interacción con pesquerías y otros aspectos de la biología e historia natural de la especie (Vidal, 1995). Mucho de este trabajo fue realizado en el seno de las comunidades pesqueras de la región del Alto Golfo, incluyendo la única estimación robusta existente sobre captura incidental en redes agalleras, que fue llevada al cabo principalmente en El Golfo de Santa Clara (D'Agrosa *et al.*, 1995; D'Agrosa *et al.*, 2000).

Por aquellas fechas ya existía preocupación sobre el estatus de la vaquita y ya se recomendaba establecer medidas urgentes para su conservación, debido a la rareza de la especie, su muerte incidental en redes y el desconocimiento preciso de sus parámetros y tendencias poblacionales (Vidal, 1995; Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002). Esto conformó parte de las razones para el decreto de la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y delta del Río Colorado, la cual también se enfocó a la protección de la totoaba (*Totoaba macdonaldi*) y otras especies clave para la conservación de la Reserva (DOF (Diario Oficial de la Federación), 1993).

En 1997 se publicó la primera estimación de abundancia de la población de la vaquita (Barlow *et al.*, 1997), la cual fue realizada con datos tomados desde embarcaciones pequeñas, avionetas y un buque oceanográfico entre 1987 y 1993. La abundancia fue estimada para cuatro períodos con intervalos aproximados de dos años. La información reflejó una tendencia decreciente pero poco precisa y, por tanto, no concluyente. En 1997 se llevó a cabo un crucero, a diferencia de los anteriores, diseñado específicamente para la estimación de abundancia de la especie. Se usaron tres embarcaciones para cubrir toda el área potencial de distribución de la vaquita (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Durante este crucero se obtuvo la información necesaria para estimar todos los parámetros necesarios de la técnica de muestreo de distancias para estimar abundancia (Buckland *et al.*, 1993), lo que incluyó todas las posibles fuentes de error para la cuantificación de la varianza. El tamaño poblacional estimado resultó ser poco más del doble del estimado previamente (Barlow *et al.*, 1997), lo cual, a priori, podría indicar que la tendencia al decremento poblacional prevista anteriormente podría ser errónea.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que en la reciente estimación (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999) incluyó mayor esfuerzo y cobertura, así como un diseño de muestreo más robusto. Esto hizo de esta estimación la más confiable con que se cuenta y, por tanto, incompatible o no comparable con las anteriores. Además, se debe considerar que la naturaleza de la dinámica poblacional de cetáceos (crecimiento lento), junto a la gran varianza generalmente asociada a la estimación de abundancia de estas especies, hace estadísticamente improbable detectar diferencias entre estimaciones de abundancia que estén cercanas en tiempo (Taylor y Gerrodette, 1993). Por lo tanto, se considera a la estimación de 1997 la más robusta con que se cuenta y el punto de referencia para establecer su estatus, y hasta el momento no hay elementos que precisen las tendencias poblacionales recientes, excepto por la aplicación de modelos y parámetros poblacionales, junto con información sobre esfuerzo pesquero, para inferirlas (Jaramillo Legorreta *et al.*, 2007). Según este trabajo es muy probable que la población de la vaquita haya experimentado un decremento en años recientes.

En 1993 se estimó que 39 vaquitas (I.C. 95% 14-93) fueron incidentalmente capturadas por la flota ribereña de El Golfo de Santa Clara (D'Agrosa *et al.*, 2000). San Felipe, uno e los otros poblados pesqueros, se considera puede haber causado un nivel de mortalidad similar (Rojas-Bracho *et al.*, 2006), por lo tanto el nivel de mortalidad en ese año pudo haber llegado a 78 vaquitas, un 13% aproximadamente de la población estimada para 1997. Esto se puede considerar un máximo, pues la población de vaquita debe haber sido más grande en 1993.

Con la información generada hasta hoy día, sobre abundancia, no es posible estimar de forma directa la tendencia poblacional. Sin embargo, algunos aspectos del ciclo de vida han sido estudiados (Hohn *et al.*, 1996). Los individuos maduran entre los 3 y 6 años de edad y al parecer las hembras ovulan cada dos años, lo que implica que una hembra puede producir un máximo de una cría cada dos años durante su época de reproducción activa. Para la marsopa común (*Phocoena phocoena*), una especie cercana a la vaquita, se estimó que una tasa de crecimiento poblacional máxima de 4% es posible para una población del Atlántico canadiense (Woodley y Read, 1991). Utilizando información de

esta población y algunos modelos publicados sobre tablas de vida de mamíferos, se estima que en el caso más optimista la población podría crecer a un ritmo de 9.4% (Barlow y Boveng, 1991). Modelando con base en tasas de supervivencia de crías e individuos mayores de un año se llegó a una conclusión similar, para poblaciones de delfines, cuando se supone un intervalo de producción de crías de dos años (Reilly y Barlow, 1986). Para el delfín de Hector (*Cephalorhynchus hectori*), una especie con un ciclo de vida similar al de marsopas, se estimó tasas de crecimiento máximas de 1.8 a 4.9% con un intervalo de producción de crías también de dos años (Slooten y Lad, 1991). La tasa de crecimiento máxima para la vaquita debe estar en los rangos señalados para estas especies, por lo que la vaquita debe haber experimentado un decremento importante en los últimos años, dada la mortalidad esperada por su captura en artes de pesca.

Usando una aproximación a través del esquema de *Remoción Biológica Potencial* (Wade, 1998), y con la información sobre abundancia en 1997 (567, 95% C.I. 177-1073; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999), se estima que es necesario permitir no más de la captura por pesca de un sólo individuo por año para permitir que la población de vaquita se recupere. Dado que no hay una forma práctica de monitorizar una cuota de captura como esta, es necesario suspender la actividad pesquera con redes para asegurar que la población se recuperará. Sin embargo, no hay una meta claramente establecida para definir la recuperación de esta población, dado que se desconoce el nivel de abundancia histórico de la vaquita y sólo se puede inferir su capacidad de crecimiento poblacional a partir de elementos de su ciclo de vida e información de especies relacionadas.

En este trabajo se usa un enfoque Bayesiano (Gelman *et al.*, 1995) para estimar la abundancia histórica de la vaquita y su potencialidad de crecimiento, así como los niveles de abundancia actuales, todo ello guiado por el esfuerzo de pesca con redes que ha operado desde la pesquería de totoaba a mediados del siglo pasado, hasta las pesquerías más actuales que se dan con redes de enmalle y agalleras (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998) en las cuales se capturan vaquitas. De esta forma se podrá saber cual

es el estatus actual con base en su abundancia histórica y, además, será posible recomendar una meta de recuperación y manejo.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es modelar la tendencia de la población de vaquita, es decir, el cambio en su abundancia a través del tiempo, durante el período en que se ha utilizado redes en actividades pesqueras en el Alto Golfo de California. El modelado se enfoca a este período dado que las vaquitas han sido capturadas en estas redes (Norris y McFarland, 1958; Vidal, 1995; D'Agrosa *et al.*, 2000), lo cual ha guiado a la población a niveles de preocupación (Rojas-Bracho y Taylor, 1999; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999; Rojas-Bracho *et al.*, 2006; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2007). Actualmente la vaquita es considerada la especie de cetáceo en mayor peligro de extinción, después de declarar que el baiji (*Lipotes vexilifer*) se halla extinto funcionalmente (Turvey *et al.*, 2007). La vaquita esta listada en las categorías más críticas de varios listados de vida silvestre en riesgo (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002).

La meta de este modelado es obtener estimaciones de los parámetros poblacionales necesarios para estimar la tendencia poblacional durante el período de la pesquería con redes hasta la actualidad. Uno de estos parámetros es la *Capacidad de Carga*, la cual comparada con la abundancia actual puede indicar el nivel de depresión de la población, así como servir de referencia para la propuesta de metas y esquemas de recuperación y manejo.

MÉTODOS

Modelo Poblacional

La muestra de vaquitas capturadas en redes o recuperadas después de vararse en costas indica que los niveles de captura pueden depender de la edad de los individuos (Hohn *et al.*, 1996; D'Agrosa *et al.*, 2000). Sin embargo, no se sabe si el alto número de crías y jóvenes en la muestra es resultado de un sesgo y el tamaño de la muestra no es suficiente para realizar una evaluación al respecto. Debido a esto se seleccionó un modelo logístico, en vez de uno estructurado por edad, como una forma más parsimoniosa y prudente para ajustar los parámetros poblacionales de interés, incluyendo a la capacidad de carga.

Ortiz (2002) realizó un trabajo similar usando un modelo estructurado por edad. El régimen de supervivencia se parametrizó usando dos clases de edad: crías y mayores de un año. La edad a primera reproducción fue fijada en 5 años, aunque no se conoce con precisión y puede estar entre los 3 y 6 años (Hohn *et al.*, 1996). El parámetro de forma en el término que introduce dependencia de densidad en el modelo se fijó arbitrariamente en un valor de 2.39, para que el nivel de Productividad Neta Máxima quedara aproximadamente a 60% de la capacidad de carga. La captura incidental se modeló para dos períodos: la pesquería de totoaba y la de otras pesquerías con red. Durante este segundo período se supuso que no hubo capturas en pesquería de totoaba dada la veda indefinida, sin embargo no se considera el período en el que se sabe ocurrió pesca furtiva. Se supuso que la proporción de crías y animales jóvenes en las capturas es grande y no se consideraron posibles sesgos. La mortalidad estimada de vaquitas en redes, durante el segundo período (D'Agrosa *et al.*, 2000), fue usada para construir una función de verosimilitud. Esta también incluyó las abundancias reportadas por Barlow *et al.* (1997) y Jaramillo Legorreta *et al.* (1999), sin considerar las incompatibilidades entre ambas estimaciones debido a diferencias metodológicas importantes. De la segunda estimación sólo se utiliza la abundancia para la zona de mayor concentración de

vaquitas, sin embargo el esfuerzo pesquero incluido en el modelo no se corrigió para cubrir sólo esta área, lo cual es una inconsistencia difícil de evaluar.

El modelo presentado en este trabajo es un enfoque alternativo, el cual es más sencillo al no usar un modelo estructurado lo que puede evitar sesgos en la información, además de que permite la estimación de los parámetros en vez de fijarlos en valores arbitrarios.

El modelo usado para calcular la abundancia al tiempo t , como una función de la abundancia al tiempo $t-1$, es:

$$\text{Ecuación 1} \dots\dots\dots N_t = N_{t-1} + \left[N_{t-1} * r \max * \left(1 - \left[\frac{N_{t-1}}{K} \right]^z \right) \right]$$

Donde N_t es la abundancia esperada al tiempo t , N_{t-1} es la abundancia en un período anterior (para este estudio un año, ya que el período de reproducción de la vaquita es anual), r_{max} es la tasa intrínseca de crecimiento máxima (la tasa de crecimiento a bajos niveles de abundancia), K es la capacidad de carga (o la abundancia en equilibrio, donde la mortalidad iguala a la natalidad) y z es el parámetro de forma, el cual determina la abundancia al Nivel de Máxima Productividad Neta (MNPL por sus siglas en inglés) de la población, es decir la simetría de la curva de producción de la población.

Modelado de la captura incidental

Pesquería de Totoaba

Se supone que la pesquería de la totoaba inició en los primeros años del siglo XX en el puerto de Guaymas (Chute, 1928). Cuando la población de esta especie fue mermada, un grupo de hombres alemanes se aventuró hacia las aguas al norte del Golfo de California para buscar otros sitios de distribución de totoaba, dado que su pesca representaba un buen negocio (Craig, 1926; Chute, 1928). Ellos encontraron grandes agregaciones de la especie en costas cercanas a lo que hoy es el poblado de San Felipe.

Durante los siguientes años varios pescadores provenientes de Guaymas explotaron este recurso y, de hecho, fundaron el poblado que hoy existe. La vejiga gaseosa de la totoaba permaneció como un producto de exportación para Asia y la comunidad china de San Francisco, mientras que un mercado para la carne fue iniciado hacia otras poblaciones de California y Arizona (Craig, 1926; Chute, 1928). El primer paso registrado de totoaba a los Estados Unidos fue registrado por la aduana de ese país en 1923 (Chute, 1928), y el Gobierno Mexicano inició a tomar estadísticas pesqueras tentativas en 1926, debido al franco arranque de la pesquería en la región. Sin embargo, estadísticas confiables no fueron generadas sino hasta 1934 (Rosales-Juárez y Ramírez-González, 1987). Con la expansión de la pesquería otros poblados fueron fundados, incluyendo Puerto Peñasco y El Golfo de Santa Clara, hoy día importantes poblados pesqueros (Berdegué, 1955).

Durante los primeros años de la pesca en el Alto Golfo de California las embarcaciones utilizadas fueron impulsadas por velas y remos, y los implementos de pesca utilizados eran rudimentarios, incluyendo anzuelos, explosivos y redes (Rosales-Juárez y Ramírez-González, 1987; Berdegué, 1955). Esta forma de pesca debe haber tenido efectos despreciables sobre la vaquita, dado que se dio en zonas costeras y en el Delta del Río Colorado, donde se sabe que la densidad de vaquita es muy baja o nula (Silber, 1990; Gerrodette *et al.*, 1995; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999).

Algunos autores coinciden en mencionar que, en algún momento, los procedimientos de pesca evolucionaron por la introducción de artes de pesca mejorados y el uso de embarcaciones motorizadas (Berdegué, 1955; Flanagan y Hendrickson, 1976; Rosales-Juárez y Ramírez-González, 1987), sin embargo no se aportan fechas precisas. Ortiz (2002) hizo una investigación en las Capitanías de Puerto de San Felipe, Puerto Peñasco y El Golfo de Santa Clara, para obtener el listado de embarcaciones pesqueras registradas. Ella distinguió entre barcos y pangas, los primeros dedicados a la pesca de totoaba, camarón y probablemente tiburones y las últimas dedicadas a la pesca con redes de varias especies. Los barcos registrados estaban equipados con motores internos o fuera de borda, lo cual debe haber brindado a los pescadores la capacidad de explotar sitios de pesca más alejados de sus poblados, lo que debió haber coincidido con la zona

de distribución de la vaquita. A mediados del siglo pasado los artes de pesca deben haber incluido aún anzuelos y explosivos (Berdegúe, 1955), debido a altas densidades poblacionales. Hacia los años finales de la pesquería, antes de que fuera vedada, la pesca debe haber dependido enteramente del uso de redes, debido a que se debe haber dificultado localizar cardúmenes cuando la población fue muy mermada.

Aunque los registros confiables de capturas existen desde 1934, en este trabajo se utilizarán los datos a partir de 1941, año en que por primera vez aparece un barco registrado en una Capitanía de Puerto (Ortiz, 2002). Esto es porque se asume que fue justo en este momento cuando las operaciones de pesca efectivamente empezaron a tener efectos sobre la vaquita.

En 1975 la pesquería de la totoaba fue vedada indefinidamente, dado el bajo nivel que alcanzaron (Cisneros-Mata *et al.*, 1995). Sin embargo, la pesca furtiva se dio durante los años siguientes, al menos hasta el inicio de los años 1990, cuando 40 totoabas fueron confiscadas. Se estimó que durante mediados de los años 1980 aproximadamente 162 toneladas pudieron haber sido capturadas furtivamente por año (Cisneros-Mata *et al.*, 1995). En 1999 un residente de San Felipe informó, al autor de este trabajo, haber presenciado el transporte de totoabas cargadas en camionetas, por lo que la pesca furtiva pudo haber estado ocurriendo hasta el inicio del presente siglo. La pesca furtiva estimada para los años 1980 se incluyó en el modelo para estimar la captura de vaquitas en el período entre 1976 (primer año de la veda) hasta 1999 (último reporte de pesca furtiva). Para el modelado el nivel de capturas en este período fue fijado en 100 toneladas, un valor que se estima un promedio adecuado.

Una pesca experimental de totoaba fue llevada al cabo durante un período de diez años (Fleischer *et al.*, 1996). Un total de 682 lances fueron hechos y analizados, registrando el número de individuos capturados y su peso bruto. En cuatro de los lances una vaquita fue capturada, lo cual indica que en el momento del experimento la tasa de captura de vaquitas fue de 0.0058 vaquitas por lance. El peso promedio de la captura de totoabas por lance fue de 89.54 Kg. Se debe tomar en cuenta que el experimento fue efectuado en

un período en que la población de totoaba estaba ya muy mermada, por lo que la captura de totoaba por lance estimada debe haber estado hacia valores muy bajos, en comparación con las capturas que se deben haber obtenido cuando la pesquería estaba en auge.

El número de vaquitas capturadas al tiempo t se estima a partir de las capturas de totoaba como:

$$\text{Ecuación 2} \dots\dots\dots VcT_t = CT_t \cdot N_{t-1} \cdot qT$$

Donde VcT_t es el número de vaquitas capturadas en la pesca de totoaba en el año t , CT_t es la captura de totoaba reportada en las estadísticas de pesca (en toneladas) para el año t , N_{t-1} es la abundancia de vaquita en el período anterior (año anterior) y qT es el parámetro de captura que estima el número de vaquitas capturadas en función de la captura de totoaba (que es un estimador indirecto del esfuerzo pesquero) y de la densidad de vaquitas. De tal forma se permite que el nivel de captura incidental dependa del número de vaquitas disponibles para ser capturadas. Este parámetro no varía entre años, más bien se asume es un valor promedio para el tiempo que duró la pesquería.

Pesquería de camarón

La pesquería de camarón del Pacífico es de las más importantes para México, dado que representa una porción muy importante de las divisas que entran al país año con año (Magallón-Barajas, 1987). En el Golfo de California la pesquería opera con barcos de arrastre y con pangas, abordo de las cuales se utilizan una variedad de redes, incluyendo atarrayas y suriperas (Magallón-Barajas, 1987). Debido a la contracción de la pesquería de la totoaba en el Alto Golfo de California, el camarón se convirtió en el recurso más importante de la región. Desde mediados de los años 1980 los pescadores ribereños en esta zona iniciaron el uso del chinchorro camaronero para la captura de camarón, que es una red de monofilamento de nylon con luz de malla entre 2.5 a 2.75 pulgadas (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998; INP, 2000a).

El chinchorro camaronero es reconocido como un arte que captura vaquitas y, la pesquería de este recurso en el Alto Golfo, es una de las responsables de empujar a la vaquita a los críticos niveles en que hoy se encuentra (Rojas-Bracho y Taylor, 1999; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999; D'Agrosa *et al.*, 2000; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2007), dado lo intenso de la pesquería debido a su importancia económica (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998; INP, 2000a).

La pesca comercial de camarón requiere de un permiso. Así mismo, la panga requiere de un registro en el Capitanía de Puerto correspondiente. Se sabe que parte del esfuerzo pesquero es ilegal, ya que algunas pangas no cuentan con el permiso correspondiente. Por tal la información la información presentada por Ortiz (2002) puede ser un listado incompleto de embarcaciones que realizan la actividad, ya que las embarcaciones ilegales podrían no estar registradas en la capitanía. No hay una certeza sobre el nivel de la actividad ilegal, sin embargo información con que cuenta la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado indica el total de pangas, tanto legales como ilegales, que podrían estar operando durante los últimos años (com. pers. José Campoy, Director de la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado). Según la Reserva en los años 1980 se hallaban operando 400 pangas. En 1993 esta cifra aumentó a 500 para San Felipe y El Golfo de Santa Clara, además de 100 en Puerto Peñasco. En el año 2000 se estimó que aproximadamente 1000 pangas operaban en la región. Se piensa que este número se ha mantenido en los últimos años, debido en parte a la escasez de recursos pesqueros y a la presión que ha impuesto el grave estatus de la vaquita.

El chinchorro camaronero en el Alto Golfo trabaja con la ayuda de las corrientes mareales (INP, 2000b), cuya magnitud es uno de los rasgos más característicos del Alto Golfo de California. El régimen mareal se caracteriza por marcados períodos de mareas vivas y muertas (Lavín *et al.*, 1997). Durante el período de mareas muertas la pesquería interrumpe sus operaciones, debido a que el chinchorro no trabaja bien (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998). El número de días efectivos de pesca durante el año depende de la interrupción de la veda (el camarón es el único recurso que cuenta con un período de

veda oficial, Magallón-Barajas, 1987; INP, 2000a), del régimen mareal y de períodos de mal tiempo en que es inseguro salir a navegar. Además, el número de pangas que efectivamente pescan por día no es el 100% de la flota operable, información que se obtuvo durante vuelos para la determinación de la distribución del esfuerzo pesquero en la región (com. pers. Juan Manuel García Caudillo, Director de Terra Peninsular, A.C., Ensenada, B.C., México). Esto se puede deber, entre varios factores, a que un número de pangas podría sufrir averías, a que buena pesca en días anteriores permite el descanso de algunos pescadores, o a la falta de recursos para comprar combustible u otros implementos para la pesca.

La captura incidental de vaquitas en esta pesquería fue estimada para el año 1993 en El Golfo de Santa Clara. Esta captura se estimó como el número promedio de vaquitas capturadas por viaje por panga (D'Agrosa *et al.*, 2000). Un viaje es considerado como el esfuerzo realizado en un día de trabajo, ya que en la gran mayoría de las ocasiones un a panga va de pesca y regresa en una sola ocasión durante el día. Se estimó que en promedio se capturaron 0.0099 vaquitas por viaje por panga (C.V. = 0.3) durante 1993 por la flota de El Golfo de Santa Clara (D'Agrosa *et al.*, 2000). Debido a la similitud entre las operaciones pesqueras de El Golfo de Santa Clara y San Felipe, se puede suponer que la flota de este último poblado capturó vaquitas al mismo ritmo. También se supuso que la flota de Puerto Peñasco capturó cantidades despreciables de vaquitas, si es que en realidad capturaron algunas, dado que los pescadores de esta comunidad, por su lejanía, no pescan en la zona de distribución de la vaquita.

Otras pesquerías con redes agalleras

La vaquita es capturada en otras tres pesquerías con red agallera operadas abordo de pangas en el Alto Golfo de California (D'Agrosa *et al.*, 2000): Chano (un pez de la misma familia que la totoaba); tiburones y rayas; y sierra y macarela. Las tasas de captura en estas pesquerías fueron estimadas el mismo año en que se estimó la captura en la pesquería de camarón (D'Agrosa *et al.*, 2000). Las tasas de captura estimada

fueron: chano 0.0112 vaquitas / viaje / panga; tiburones y rayas 0.0154; y sierra y macarela 0.0039.

En total se estimó que el conjunto de pesquerías en ese año capturaron vaquitas a un ritmo de 0.0099 vaquitas / viaje / panga. Con una estimación del total de viajes que se efectuaron en el año que duró el estudio se calculó que aproximadamente 39 vaquitas fueron capturadas por la flota de El Golfo de Santa Clara en 1993 (C.V. 0.3). Al igual que con la pesca de camarón, se asume que la flota de San Felipe capturó vaquitas al mismo ritmo en todas las pesquerías involucradas. Dado que ambos poblados contaban con un número igual de pangas, el total de vaquitas capturadas en ese año ascendió aproximadamente a 78 vaquitas.

El número de vaquitas capturadas por año en estas pesquerías se estimó en el modelo como:

$$\text{Ecuación 3} \dots\dots\dots VcR_t = P_t \cdot N_{t-1} \cdot qR$$

Donde VcR_t es el número de vaquitas capturadas con redes en el año t , P_t es el número de pangas en operación (tanto legales como ilegales) en el año t , N_{t-1} es la abundancia de vaquita en el período anterior (año anterior) y qR es el parámetro de captura que estima el número de vaquitas capturadas en función del número de pangas en operación y de la densidad de vaquitas. De tal forma se permite que el nivel de captura incidental dependa del número de vaquitas disponibles para ser capturadas. Este parámetro no varía entre años, más bien se asume es un valor promedio para el tiempo que a durado la pesquería.

Flota artesanal operacional (P)

Cudney y Turk (1998) describen el desarrollo histórico de las pesquerías en el Alto Golfo de California. El inicio formal y efectivo del uso de pangas para pescar con redes agalleras camarón, sierra y tiburones se ubica en la década de los 1980. Para la década de los 1990 se inicia la pesca de chano y mantarayas.

Para el modelado se inicia la captura con redes en 1980, asignando un total de 400 pangas operativas en ese año tal como lo estima la Reserva de la Biósfera. El número puede parecer abrupto, sin embargo no quiere decir que en ese año llegaron a la zona ese número de pangas, sino que se utilizaban en otras actividades o pesquerías y no fue sino hasta inicio de los 1980 que iniciaron el uso formal; de redes. Para 1993 se asignaron 500 pangas, tal como lo reportó D'Agrosa *et al.* (1995, 2000) y lo confirmó la Reserva. El número de pangas entre 1981 y 1992 fue asignado con una relación lineal basada en el número de pangas en 1980 y 1993. El mismo procedimiento fue aplicado para asignar el número de pangas entre 1994 a 1999, atendiendo al dato que brinda la Reserva de 1000 pangas en el año 2000. Entre 2001 y 2007 se supuso que el número de pangas ya no se incrementó, de tal forma que 1000 pangas han estado operando por año desde esa fecha.

Captura incidental anual total

La captura incidental total por año resultó de sumar el número de vaquitas capturadas en la pesquería de totoaba y las vaquitas capturadas en las otras pesquerías:

$$\text{Ecuación 4} \dots\dots\dots V_{C_t} = V_{C_t}T_t + V_{C_t}R_t$$

Modelo completo

El modelo poblacional (Ecuación 1) y el de captura incidental total (Ecuación 4) se combinan para estimar el número de vaquitas por año en la serie de tiempo entre 1940 a 2007 como:

$$\text{Ecuación 5} \dots\dots\dots N_t = N_{t-1} + \left[N_{t-1} * r \max * \left(1 - \frac{N_{t-1}}{K} \right)^z \right] - V_{C_t}$$

Ensamblado del modelo

Se supone que la población de vaquita estaba en equilibrio antes de que se iniciara su captura incidental en redes totoaberas. Esto significa que la abundancia estaba cerca de

la capacidad de carga (K) en esos años. El ensamblado del modelo procede de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Se asigna un valor de abundancia para el año 1940, el cual determina el valor de K . También se asignan valores al resto de los parámetros: r_{max} , z , qT y qR .
2. Se prepara un vector de abundancias del año 1920 al 2007. El valor de K es asignado al año 1920. Aunque se asume que el primer año en que se capturaron vaquitas es 1941, se permitió que el modelo corriera desde 1921 para revisar su consistencia. Durante el período 1920 a 1940 el modelo debe calcular la misma abundancia K , dado que no en los datos que se alimentan al modelo hay cero capturas de totoaba y cero pangas operativas (Apéndice B).
3. Dos vectores de datos son preparados para los años 1920 a 2007. Uno contiene los datos sobre capturas de totoaba entre 1941 a 1999, dejando ceros fuera de este rango. Este intervalo incluye el período de veda en que se dio captura furtiva. El otro vector contiene la información sobre el número de pangas operativas por año, iniciando en 1980. Antes de este año se asignan valores de cero.
4. En cada año se aplican las ecuaciones 2 y 3 para calcular el número de vaquitas capturadas. Posteriormente se aplican las ecuaciones 4 y 5 para calcular la abundancia en el mismo año. Esto se repite en cada año de la serie entre 1920 a 2007. La serie procede leyendo para cada año los datos sobre capturas de totoaba (CT_t) y el número de pangas operativas (P_t).

Estimación de parámetros

Componentes del modelo

El modelo está compuesto de parámetros (Tabla VI), parámetros derivados de interés (abundancia en 2007 [N_{2007}] y proporción de K que representa esta abundancia como N_{2007}/K) y el juego de datos disponibles (Apéndice B). Los parámetros controlan el

comportamiento del modelo y son los componentes que requieren ser estimados. Los parámetros derivados son el resultado de los cálculos que forman parte del modelo, por lo que no requieren ser estimados. El juego de datos es la información disponible con que se alimenta al modelo para realizar la estimación de los parámetros.

Marco de estimación

Se seleccionó una aproximación bayesiana para estimar los parámetros del modelo. El análisis bayesiano (Gelman *et al.*, 1995) incorpora información previa al modelo en forma de distribuciones de probabilidad. Este método usa funciones explícitas de probabilidad para cuantificar la incertidumbre en la estimación de parámetros. Fundamentalmente, el análisis bayesiano se enfoca en la estimación de la probabilidad de un evento (valores de un parámetro) dada la información disponible (datos que se confronten al modelo). La estimación de parámetros desde el punto de vista *frecuentista*, al contrario, se enfoca en cuantificar la probabilidad de que una hipótesis (o un modelo) sea cierta (o falsa) dados los valores de sus parámetros (Ellison, 1996; Douglas, 1999). Bajo esta aproximación se supone que las hipótesis siendo examinadas serán rechazadas (o aceptadas), en experimentos repetidos, en una proporción igual al nivel de significancia seleccionado (de aquí el término *frecuentista*). Esto implica que el valor de los parámetros está condicionado por las hipótesis seleccionadas.

En la aproximación bayesiana varias hipótesis (o modelos) pueden ser examinados por el uso explícito de probabilidad para comparar entre ellas. Los datos disponibles para confrontar a los modelos subyacen al proceso de estimación, así como la información previa disponible (Gelman *et al.*, 1995). La información previa se representa en la forma de distribuciones de probabilidad (*distribuciones previas*) sobre los parámetros a estimar. Las distribuciones de probabilidad para los parámetros obtenidas después del análisis (*distribuciones posteriores*), se convierten en información previa que puede ser usada en futuros trabajos en la forma de *distribuciones previas*. De esta forma el análisis bayesiano es un proceso de retroalimentación y aprendizaje.

El análisis bayesiano involucra tres pasos (Gelman *et al.*, 1995):

- a) Ensamblar un modelo probabilístico completo conformado por la distribución conjunta de todos los componentes del mismo.
- b) Condicionar el proceso a la información disponible, por medio del cálculo de la distribución posterior conjunta:

Ecuación 6.....
$$p(\Theta | y) = \frac{p(\Theta) \cdot p(y | \Theta)}{\int p(\Theta) \cdot p(y | \Theta)}$$

Donde $p(\Theta | y)$ es la distribución posterior de los parámetros Θ dados los datos y ; $p(\Theta)$ es la distribución previa de los parámetros (que conjunta la información previa disponible sobre ellos); y $p(y | \Theta)$ es la verosimilitud, que enlaza la probabilidad de los datos observados y a la especificación de valores particulares para los parámetros Θ . La integral en el denominador representa la probabilidad de los datos [$p(y)$]. Es decir, el denominador es la representación probabilística completa del conjunto de información previa de los parámetros y de la confrontación del modelo con la información disponible. La representación de esta integral es, finalmente, lo que el investigador busca para representar las posibles respuestas a su problema.

- c) Evaluar el ajuste del modelo y las implicaciones de la distribución posterior resultante. Si es necesario, a juicio del investigador, el modelo puede ser modificado y el análisis repetido.

Verosimilitud

Las salidas del modelo son abundancias (ecuaciones 1 y 5) y capturas incidentales (ecuaciones 2 a 4), por lo que es necesario confrontar al modelo con información sobre estas cantidades. Barlow *et al.* (1997) publicaron las primeras estimaciones de abundancia de la vaquita. Este trabajo incluyó esfuerzo de avistamiento realizado desde embarcaciones pequeñas, avioneta y un buque oceanográfico (intermitentemente entre 1986 y 1993), aplicando la técnica de medición de distancias (Buckland *et al.*, 1993). No todos los parámetros requeridos por esta técnica fueron calculados con datos generados

durante las prospecciones, en vez de ello algunos parámetros fueron obtenidos de trabajos similares hechos con una especie emparentada (*Phocoena phocoena*). En 1997 se llevó al cabo un crucero específicamente diseñado para estimar la abundancia de la vaquita (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Todos los parámetros requeridos fueron estimados con datos generados *in situ*, y se tomaron en cuenta todos los factores de variación para ser incluidos en la varianza, por lo que se considera que esta es la estimación más robusta con que se cuenta (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002). Debido a lo anterior se considera que las primeras estimaciones no son compatibles con la de 1997 dada su falta de robustez, por lo que esta serie de datos no se puede considerar una serie de tiempo confiable. De tal forma, en el término de verosimilitud solamente se incluyó a la estimación de 1997 (567 individuos, C.V. 0.5072, I.C. 95% 177-1073). Se asumió una distribución log-normal, por lo que el término de verosimilitud es:

$$\text{Ecuación 7} \dots\dots\dots L(N_{1997} \mid \mu_{1997}, \sigma_{1997}) = \frac{1}{N_{1997} \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{1997}} \cdot e^{\left(\frac{-(\ln(N_{1997}) - \mu_{1997})^2}{2 \cdot \sigma_{1997}^2} \right)}$$

Donde L en el lado izquierdo de la ecuación significa verosimilitud (por el término en inglés *likelihood*) del primer término dentro del paréntesis, dada la distribución de probabilidad definida por los parámetros que le siguen después de la barra, N_{1997} es la salida del modelo en abundancia para el año 1997, y μ_{1997} y σ_{1997} son el promedio y la desviación estándar de la distribución log-normal de la estimación de abundancia de 1997, y se calculan a partir de la estimación puntual y desviación estándar de la estimación como:

$$\text{Ecuación 8} \dots\dots\dots \mu_{1997} = \ln(NT_{1997}) - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{Var_{1997}}{(NT_{1997})^2} \right)$$

$$\text{Ecuación 9} \dots\dots\dots \sigma_{1997}^2 = \ln \left(1 + \frac{Var_{1997}}{(NT_{1997})^2} \right)$$

Donde $\ln$ es el logaritmo natural de la cantidad entre paréntesis, NT_{1997} es la estimación puntual de abundancia de 1997 y Var_{1997} es la varianza de dicha estimación (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999).

Sólo una estimación formal de captura incidental de vaquitas se ha publicado (D'Agrosa *et al.*, 2000). Esta incluyó información para el año 1993 y sólo para la flota ribereña del poblado de El Golfo de Santa Clara. Dado que se supone que la flota de San Felipe pesca de forma similar, y que en ese año había el mismo número de pangas en ambos poblados, la captura total estimada (78 vaquitas, C.V. = 0.3) es el doble de la publicada para Santa Clara. Suponiendo una distribución log-normal, como en el caso anterior, la función de verosimilitud es:

$$\text{Ecuación 10.. } L(VcR_{1993} | VR_{1993}, \sigma_{1993}) = \frac{1}{VcR_{1993} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{1993}} \cdot e^{\left(\frac{-(\ln(VcR_{1993}) - VR_{1993})^2}{2 \cdot \sigma_{1993}^2} \right)}$$

Donde VcR_{1993} es la salida del modelo en número de vaquitas capturadas en redes (sin incluir las capturadas en la pesca furtiva de totoaba) para 1993, y VR_{1993} y σ_{1993} son el promedio y la desviación estándar de la distribución log-normal de la estimación de captura incidental publicada. Estos parámetros son calculados, como en el caso anterior, a partir de la estimación puntual y su desviación estándar publicadas.

Durante la pesquería experimental de totoaba, que se operó durante la década de los 1980 (Fleischer *et al.*, 1996), se estimó que la tasa de captura de vaquitas fue de 0.0058 vaquitas por lance (C.V. 0.3). También se estimó que en promedio cada lance rindió 89.54 Kg de totoaba (C.V. 0.3). Por otro lado, durante esta década la totoaba ya estaba bajo una veda indefinida, sin embargo se sabe que se capturaron totoabas de forma furtiva (Cisneros-Mata *et al.*, 1995). Se estima que para mediados de los 1980 se capturó aproximadamente 162 toneladas de totoaba por año. El producto de la tasa de captura de vaquitas (0.0058), la captura de totoaba por lance (89.54) y la captura furtiva (162,000 Kg) es un estimador de la captura de vaquitas para esa época debida a la pesca furtiva de totoaba (10.49 vaquitas por año). Este valor fue utilizado para construir una función de

verosimilitud, aplicando este estimador para el año 1985 con un coeficiente de variación de 0.3. Se asumió una distribución log-normal:

$$\text{Ecuación 11.. } L(VcT_{1985} | VT_{1985}, \sigma_{1985}) = \frac{1}{VcT_{1985} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{1985}} \cdot e^{\left(\frac{-(\ln(VcT_{1985}) - VT_{1985})^2}{2 \cdot \sigma_{1985}^2} \right)}$$

Donde VcT_{1985} es la salida del modelo en número de vaquitas capturadas en la pesquería de totoaba para 1985, y VT_{1985} y σ_{1985} son el promedio y la desviación estándar de la distribución log-normal de la estimación de captura incidental explicada antes. Estos parámetros son calculados, como ya se ha explicado, a partir del cálculo de 10.49 vaquitas y su coeficiente de variación.

En el Capítulo II de este trabajo se mostró que, a través del análisis de datos sobre detección acústica de vaquita, se infiere que la población ha sufrido un decremento en la última década dado que la tasa de detección acústica mostró una tendencia negativa. Se estimó que la tasa de detección acústica decreció en una proporción de -0.58, con una desviación estándar de 0.66. Con estos valores se construyó una función de verosimilitud, en la cual la salida del modelo se calculó como:

$$\text{Ecuación 12..... } Inc = \frac{N_{2007} - N_{1997}}{N_{1997}}$$

Y la función de verosimilitud, suponiendo distribución normal es:

$$\text{Ecuación 13..... } L(Inc | IA, \sigma_{IA}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{IA}} \cdot e^{\left(\frac{-(Inc - IA)^2}{2 \cdot \sigma_{IA}^2} \right)}$$

La verosimilitud total (L_{TOT}) es el producto de todas las funciones de verosimilitud descritas:

$$\text{Ecuación 14..... } L_{TOT} = L(N_{1997}) \cdot L(VcR_{1993}) \cdot L(VcT_{1985}) \cdot L(Inc)$$

Se prefiere usar el logaritmo (natural, ℓ) de la función de verosimilitud, ya que de esa manera la verosimilitud total resulta de sumar el logaritmo de los componentes individuales de verosimilitud:

$$\text{Ecuación 15} \dots\dots\dots \ell L_{TOT} = \ell L(N_{1997}) + \ell L(VcR_{1993}) + \ell L(VcT_{1985}) + \ell L(Inc)$$

Distribuciones previas

La Tabla VI muestra los parámetros que es necesario estimar, así como el conocimiento previo acerca de ellos. Cuando no se contó con información sobre la distribución de probabilidad previa del parámetro se usó una distribución uniforme semi-informativa, es decir, se usó un límite inferior y superior para definir un intervalo dentro del cual cualquier valor tuvo la misma probabilidad de ocurrir. Estos límites se seleccionaron con información disponible en la literatura, por experiencia o con cálculos simples de rangos probables y ensayos de acierto y error.

Cálculo de la distribución posterior

Un método de simulación fue usado para aproximarse a la distribución posterior. Se utilizó el método de Cadena de Markov de Monte Carlo (MCMC por sus siglas en inglés) con el algoritmo de Hastings-Metropolis (Gelman *et al.*, 1995). Este método de simulación forma un recorrido aleatorio markoviano el cual básicamente toma muestras de la distribución posterior. El recorrido se forma por pasos o simulaciones durante las cuales se toman valores para los parámetros del modelo, el cual es corrido como se describió en la sección sobre *ensamblado del modelo*. Los valores para los parámetros se toman de forma aleatoria desde una distribución posterior aproximada.

El algoritmo procede aceptando el valor para los parámetros si el valor para la ecuación formada por la conjunción de las distribuciones previas y las funciones de verosimilitud (*distribución conjunta*) es mayor que en el paso anterior. De otra forma los valores seleccionados son aceptados con una probabilidad proporcional a la razón entre la distribución conjunta en el paso actual y en el paso anterior. Si se rechazan se conservan

los valores del paso anterior. Si se deja correr el algoritmo por un adecuado número de pasos o simulaciones se obtienen suficientes muestras para describir adecuadamente la distribución posterior al realizar cálculos de frecuencias. La meta del análisis es obtener una descripción de las distribuciones marginales, es decir, la distribución posterior de cada parámetro.

La cadena se implemento con la ayuda del paquete AD Model Builder (ADMB, copyright Otter Research Ltd., otter@otter-rsch.com), dentro del cual se ensambla el modelo en una plantilla la cual es convertida a un programa ejecutable a través de un compilador C++. Dentro de la implementación se manejó los valores para los parámetros en una escala logarítmica. Esto es necesario para un buen desempeño de la cadena, dado que reescala los parámetros de manera que no haya entre ellos diferencias en órdenes de magnitud muy grandes, además de que para parámetros estrictamente positivos esta es una mejor solución que forzar el algoritmo a valores mayores a cero.

También se puede construir distribuciones posteriores para parámetros derivados, tal como la abundancia en 2007 (N_{2007}), como un estimador de la abundancia actual. Junto con K (la abundancia histórica), estos parámetros son la meta última de este trabajo, ya que con ellos se obtendrá un indicativo del estatus actual de depresión de la población como:

$$\text{Ecuación 16} \dots\dots\dots \text{nivel de depresión} = \frac{N_{2007}}{K}$$

El resultado se puede expresar como la probabilidad de que el *nivel de depresión* sea menor que una proporción especificada de la capacidad de carga o abundancia histórica.

Convergencia de la distribución posterior

Dos problemas necesitan ser resueltos con el uso de un método de simulación tal como MCMC (Gelman *et al.*, 1995). Uno es obtener un número suficiente de simulaciones para describir con precisión la distribución posterior. El otro es manejar la correlación que existe entre simulaciones sucesivas.

Pocas simulaciones pueden llevar a un resumen no representativo de la distribución posterior real, y no existe una regla o receta para resolver esto de forma sencilla. Lo más que se puede hacer es obtener evidencias de la falta de convergencia. Gelman *et al.* (1995) propone comparar varias secuencias de simulaciones del mismo tamaño, iniciadas en diversos puntos sobre-dispersos del espacio de la distribución posterior. La idea es revisar las secuencias hasta evidenciar que la variación dentro de las secuencias se aproxima a la variación entre las secuencias. Esto es revisado para cada parámetro y las secuencias se finalizan hasta que el criterio es cumplido para todos los parámetros. Esta revisión se efectuó con un programa especialmente escrito para este fin y que formó parte del presente trabajo de tesis.

En ADMB la simulación procede en dos fases. En la primera se utiliza máxima verosimilitud y matrices hessianas para encontrar valores para los parámetros que se hallen alrededor de la moda de la distribución posterior. Esta fase se inicia desde los valores iniciales para los parámetros que se hallan definido o que la rutina haya seleccionado en caso de no haberlos indicado. Después, con los valores hallados, inicia la segunda fase en la que propiamente inicia la cadena markoviana. Si se eligen valores iniciales durante la primera fase, que se hallen dentro del espacio de la distribución posterior, la solución será la misma y la cadena markoviana siempre iniciará desde los mismos valores.

Del método propuesto por Gelman *et al.* (1995) se puede notar que, si el modelo está bien implementado, en algún momento cualquier cadena convergerá no importa en donde inició. El punto clave es correr la cadena por un número suficiente de simulaciones.

En este trabajo la convergencia fue analizada a través del comportamiento de la media y varianza de las cadenas de simulación para cada parámetro, conforme se iban agregando las simulaciones a la cadena durante el procedimiento MCMC. La idea que subyace a este análisis es que cuando la media y varianza dejan de cambiar drásticamente, conforme se agregan más simulaciones, se supone que se ha llegado a describir con

precisión la distribución posterior. Por supuesto esta no es una prueba concluyente, ya que no es posible asegurar que si la cadena sigue corriendo por más tiempo el algoritmo encuentre otros sitios de más alta probabilidad. Sin embargo, se puede agregar otro criterio de convergencia que puede ser un buen complemento. Se trata de revisar si los valores para los parámetros, almacenados en la cadena, ya recorrieron todo el rango posible de valores definido en su distribución previa. Si esto ya ocurrió, que es lo que se espera si la cadena corrió por un número suficiente de simulaciones, entonces se espera que la distribución obtenida refleje de manera adecuada a la distribución posterior.

La cadena fue corrida hasta que estos criterios se cumplieron para todos los parámetros. Numéricamente el criterio fue determinar que al menos, durante la segunda mitad de la cadena, la media y desviación estándar dejaron de variar más allá de 2%. Para implementar este análisis la cadena obtenida fue dividida en 1,000 segmentos, cada uno con el mismo número de simulaciones. Posteriormente se calculó la media y varianza 1,000 veces conforme se iba agregando uno a uno cada segmento. Esta información se graficó para tener una visión clara del momento en que se estabilizaba la cadena (dejó de variar más allá del 2%). En caso de que no se cumpliera este criterio la cadena se dejó correr por más simulaciones y después se repitió el análisis.

Una vez que el criterio se cumplió para todos los parámetros, se procedió a preparar gráficos del recorrido de las cadenas para todos los parámetros. Si se notó que algún parámetro aún no recorría todo el espacio de su distribución previa, se incrementó más aún la cadena, revisando nuevamente los dos criterios.

Una vez que se obtuvo la cadena y se supuso convergió, se decidió sobre la necesidad de eliminar una porción inicial de la cadena (procedimiento que se tiende a llamar *burn-in*). Esto es necesario cuando se piensa que se debe eliminar los impactos, de los valores iniciales de los parámetros al empezar el MCMC, sobre la distribución posterior (Gelman *et al.*, 1995).

Una inspección del recorrido de la cadena, ya sea para los valores de cada parámetro o del producto de las funciones de verosimilitud y distribuciones previas, es útil para

decidir al respecto. Siempre que se vea un comportamiento anómalo de la cadena, en sus inicios, será adecuado recortar una porción de la serie. Por otro lado, si se aprecia que la cadena no ha transitado por todo el espacio definido por las distribuciones previas, será necesario que la cadena corra por más tiempo.

Otra forma de decidir sobre un recorte a la cadena es comparando promedio, desviación estándar y forma de la distribución para toda la cadena y para una porción de ella una vez recortada por un proceso de *burn-in*. Si los valores son parecidos no parecería necesario recortar la cadena.

RESULTADOS

Distribuciones previas y valores iniciales de los parámetros

En la Tabla VI se muestra una descripción de los parámetros del modelo junto con la definición de su distribución previa. Ortiz (2002) realizó un ejercicio bayesiano similar al reportado aquí y obtuvo una posterior para K con una mediana cercana a 5000 individuos. No reporta claramente alguna medida de variabilidad, así que en este trabajo se utilizó la moda reportada y se usó un coeficiente de variación de 0.6, con el fin de evitar una influencia fuerte de la distribución previa en la posterior de este parámetro.

Tabla VI. Parámetros del modelo

Clave	Descripción	Notas	Distribución previa
K	Capacidad de carga, abundancia en equilibrio o abundancia histórica	Se asume que la abundancia de la población, previo a 1941, estaba en niveles de K dado que aún no iniciaba su captura en redes	Log-normal, promedio 5,000, C.V. 0.6, límite inferior 500, límite superior 15000, valor inicial 3000
r_{max}	Tasa intrínseca máxima de crecimiento poblacional	Tasa máxima a la cual puede crecer la población cuando se aproxima a bajas abundancias	Log-normal, average 0.05, C.V. 0.93, límite inferior 0.001, límite superior 0.2, valor inicial 0.04
z	Parámetro de forma	Define la simetría de la curva de producción neta (modelo Pella – Tomnilson)	Uniforme, límite inferior 0.001, límite superior 5, valor inicial 1. Después este parámetro se dejó fijo y se corrió el modelo con valores de 0.5, 1.0 y 1.5
qT	Coefficiente de captura en la pesquería de totoaba	Parámetro que determina el nivel de captura incidental en relación al volumen de captura de totoaba y a la abundancia de vaquitas	Uniforme, límite inferior 1×10^{-10} , límite superior 0.0004, valor inicial 0.000045
qR	Coefficiente de captura en las pesquerías con red agallera y de enmalle (camarón, chano, tiburones, mantas, sierra y macarela)	Parámetro que determina el nivel de captura incidental en relación al número de pangas operativas y a la abundancia de vaquitas	Uniforme, límite inferior 1×10^{-10} , límite superior 0.0008, valor inicial 0.000045

Se han hecho algunos intentos de estimar las tasas de crecimiento poblacional de pequeños cetáceos (Reilly y Barlow, 1986; Barlow y Boveng, 1991; Woodley y Read, 1991; Slooten y Lad, 1991). Se observa que este parámetro, para especie como la

vaquita, podría tener una magnitud de entre 1 a 9% anual aproximadamente. Sin embargo, algunos autores dicen que los extremos de estos rangos son poco probables, dados los regímenes de supervivencia y fecundidad que se deberían cumplir. Con base en esta información se construyó una distribución previa para r_{max} , la cual se supuso log-normal con una media de 0.05. El coeficiente de variación se eligió de manera que el intervalo completo de 1 a 9% quedara incluido bajo el 90% del área de la distribución. Un coeficiente de variación de 0.93 cumple con esto.

Para los parámetros qT y qR no se contó con información previa directa. En vez de ello, se trataron con la información conocida sobre captura incidental de vaquita, tanto en la pesquería de totoaba (Fleischer *et al.*, 1996) como en el resto de las pesquerías que utilizan redes (D'Agrosa *et al.*, 2000). Se ensayó con esta información potenciales valores para los parámetros y se construyeron distribuciones previas uniformes semi-informativas, acotadas con los límites ensayados. Estos rangos de valores fueron probados con el modelo implementado en ADMB y fueron modificados hasta lograr que el modelo corriera sin problemas.

En la Figura 17 se muestra el resultado del proceso de optimización en ADMB después de alimentar al modelo con seis puntos distintos de inicio para los parámetros. Estos puntos fueron seleccionados de los extremos inferior y superior de la distribución previa, así como de su parte central. Tres grupos de inicio fueron, para todos los parámetros, el extremo superior, el extremo inferior y la parte central. Los otros tres grupos resultaron de combinar para algunos parámetros el extremo superior, para otros el inferior y el resto el final dentro del mismo grupo. El máximo número de iteraciones necesarias para la solución optimizada fue de 76 y para algunos valores sólo se requirió de 32 iteraciones. Se observa cómo todos los seis puntos de inicio terminaron en el mismo valor optimizado para los cuatro parámetros mostrados. Este valor optimizado, que se estima está cercano a la moda de la distribución posterior, es el que se usó para inicializar el proceso MCMC.

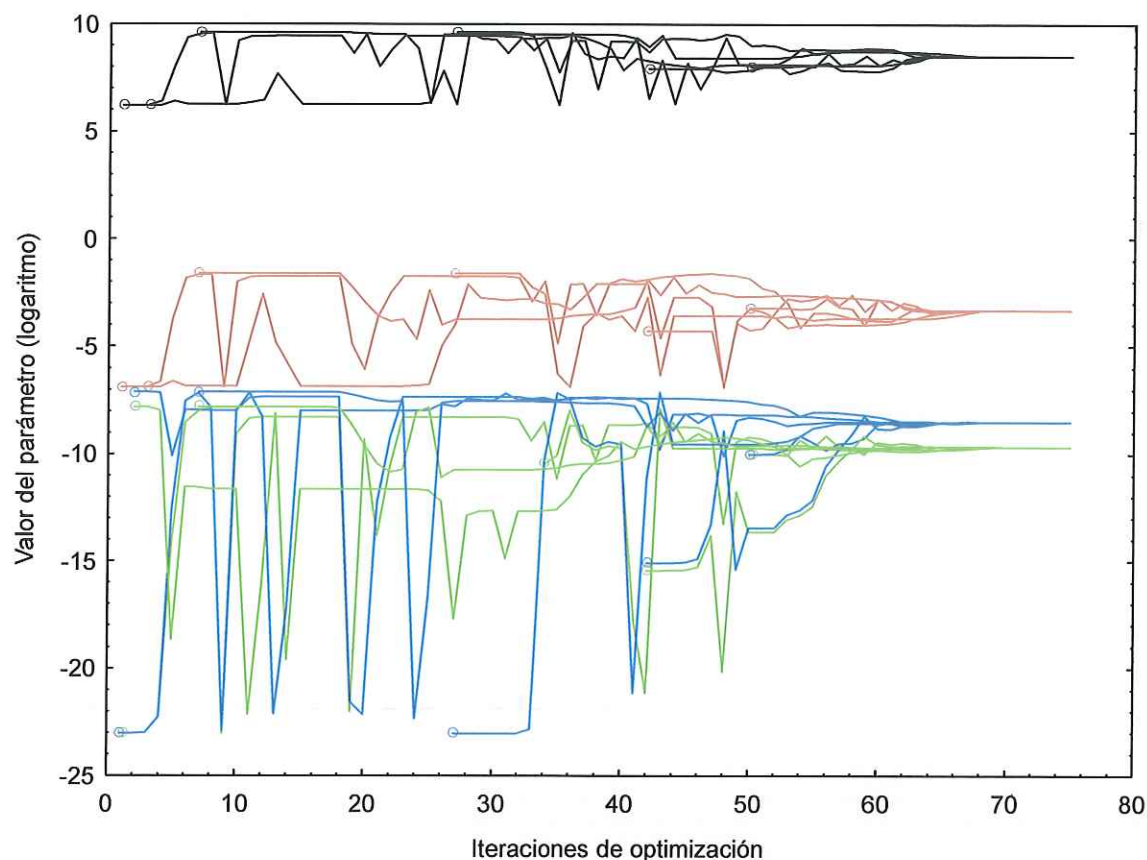


Figura 17. Resultado del proceso de optimización en ADMB para seis puntos de inicio (eje vertical) de los parámetros del modelo. Los valores se muestran en escala logarítmica. En negro K , en rojo r_{max} , en verde qT y en azul qR . Para cada parámetro se muestran seis puntos de inicio (círculos con su color respectivo). Se observa que independientemente del punto de inicio el valor final (a la derecha) es siempre el mismo para todos los parámetros. En el eje horizontal se muestra el número de iteraciones que se requirieron para encontrar el valor optimizado. El punto de inicio se colocó en el eje horizontal de manera que todas las optimizaciones en la gráfica finalizaran en la misma iteración.

Primeros pasos para correr el modelo

En el Apéndice C se muestra el código escrito para ser ensamblado en ADMB. Primero se presenta el template y luego el archivo datos. ADMB compila un programa ejecutable con base en el template. Posteriormente se ejecuta el programa ensamblado, el cual accede a la información en el archivo de datos para correr la cadena MCMC.

En un primer paso del proceso de ajuste del modelo el programa ejecutable fue arrancado sin opciones. Ejecutado en esta forma el programa estima el valor de los parámetros usando máxima verosimilitud y varianzas asintóticas, aplicando

diferenciación automática y algoritmos quasi-Newton. Este procedimiento de optimización finaliza evaluando la matriz hessiana para comprobar que los valores estimados están alrededor de la moda de la distribución posterior. Esta matriz, cuando es singular (por alta correlación entre parámetros), o no es negativa definida (no encuentra un máximo) no se puede invertir y por tanto no se puede hallar una solución.

Generalmente este problema se resuelve modificando los límites asignados a los parámetros en los cuales pueden tomar valores. Otra forma más severa de hacerlo es rearmar la especificación del modelo a través de sus parámetros. En este caso se modificaron los límites de los parámetros hasta que el proceso de optimización pudo ser concluido (Tabla VI). Se revisó entonces la matriz de correlación entre parámetros (Tabla VII), la cual mostró una correlación de -0.6 entre K y $rmax$, y 0.75 entre $rmax$ y qT . Para las otras combinaciones no hubo correlaciones importantes. Este grado de correlación no se consideró problemático, ya que es de esperarse una correlación así dado que $rmax$ controla la tasa de crecimiento. Por otro lado, la poca correlación entre los dos parámetros de captura incidental (-0.01), brindó la confianza de que la especificación del modelo es adecuada.

Tabla VII. Matriz de correlación de los parámetros del modelo después de la fase de optimización en ADMB.

	Parámetro	1	2	3	4	5
1	K	1.0000				
2	$rmax$	-0.6241	1.0000			
3	z	-0.0004	-0.0003	1.0000		
4	qT	-0.0860	0.7482	-0.0001	1.0000	
5	qR	-0.0327	0.2848	0.0001	-0.0100	1.0000

Ejecución del proceso MCMC y revisión de convergencia

A continuación se procedió a correr el proceso MCMC con el modelo. Para ello se corrió el ejecutable con las opciones `-mcmc 5000000 -mcsave 5`. De esta forma se le pidió al programa que ejecutara una cadena con un cinco millones de simulaciones, de las cuales se almacenaría una simulación de cada cinco, de manera que en total se

obtuviera un millón de simulaciones. En todo este trabajo se usó la opción *-mcsave 5* para evitar los efectos de autocorrelación inherentes a las cadenas markovianas.

Después de analizar la cadena resultante se notó que había evidencias de falta de convergencia, de manera que se siguió corriendo la cadena en más ocasiones hasta llegar a obtener una cadena con veinte millones de simulaciones, la cual fue obtenida de una cadena total con 100 millones. La cadena aún mostró evidencias de no converger (Figura 18) y, al analizar los histogramas de frecuencias, se notó un comportamiento extremadamente anómalo para el parámetro z (Figura 19). Este comportamiento se siguió dando a pesar de hacer modificaciones repetidas a los límites para este parámetro. De tal forma, se optó por tratarlo como una constante y correr el modelo para tres valores de este parámetro: 0.5, 1.0 y 1.5. De esta forma, comparando los resultados de los modelos corridos, se decidió cual es el que brindó el mejor ajuste respecto al que siguió mejor a las verosimilitudes especificadas.

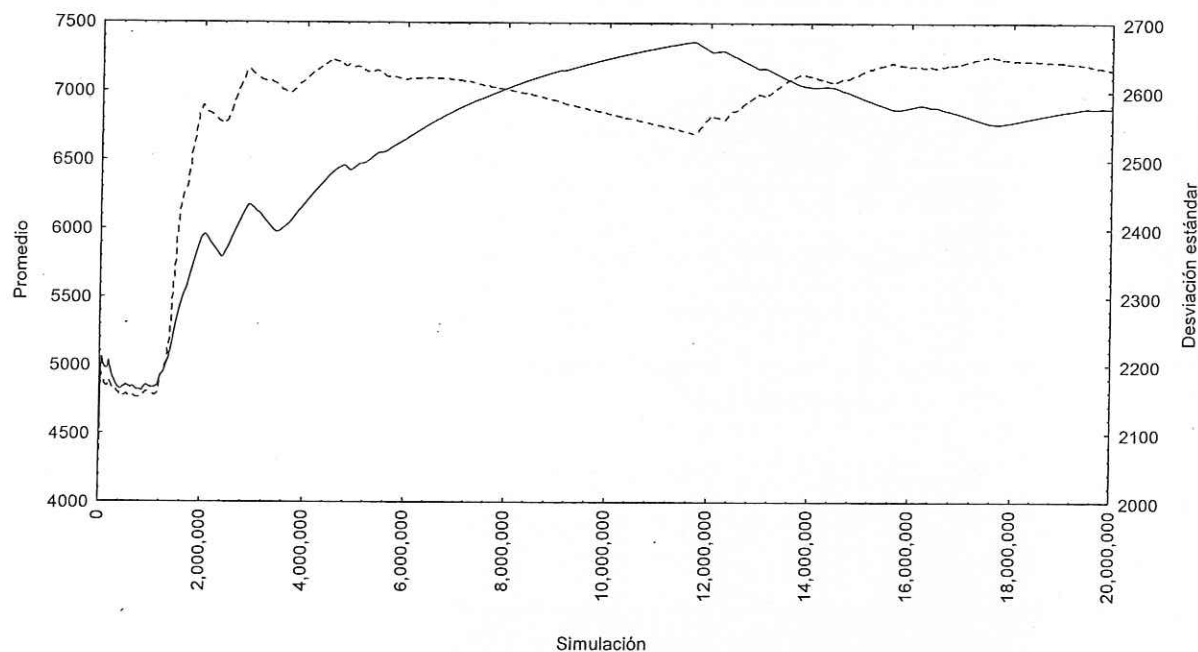


Figura 18. Gráfica de convergencia para el parámetro K en la primera especificación del modelo. La línea continua es para la media y la quebrada para desviación estándar. Se obtuvieron 20 millones de simulaciones. No se percibe que la cadena haya convergido.

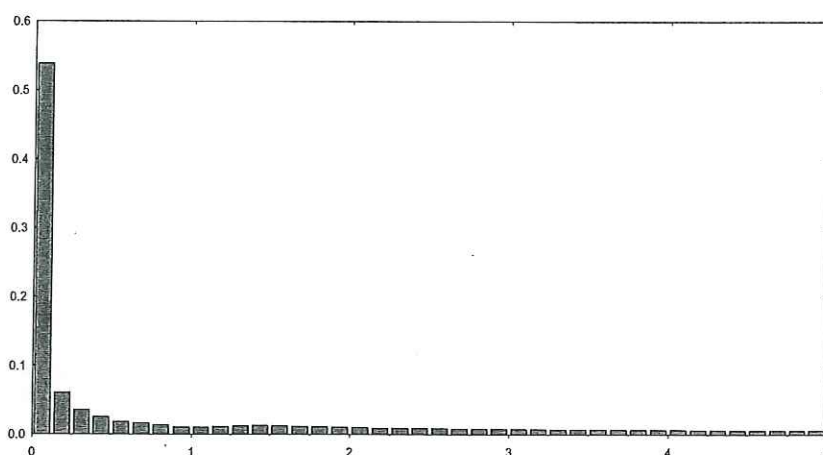


Figura 19. Distribución posterior obtenida para el parámetro z después de la primera corrida del modelo

El modelo se corrió para cada uno de los tres valores para el parámetro z para obtener un total de diez millones de simulaciones (opciones `-mcmc 50000000 -mcsave 5`). Se supuso que con este número de simulaciones sería suficiente para llegar a la distribución estacionaria de la cadena, es decir, a una buena descripción de la distribución posterior.

En la Figura 20 se presentan gráficamente las distribuciones de las funciones de verosimilitud definidas para ajustar el modelo, así como la distribución posterior obtenida para cada uno de los parámetros incluidos en la verosimilitud. Se puede apreciar que las distribuciones definidas y las posteriores son similares en cuanto a su forma, sin embargo no coinciden en sus modas. La excepción fue el parámetro *Inc* (decremento de la población entre 1997 y 2007), en el que la distribución posterior es asimétrica y con menos variabilidad que la verosimilitud definida. De los tres grupos de distribuciones posteriores el que luce mejor aproximado a la verosimilitud es el que se obtuvo con z igual a uno. De tal forma se decidió continuar el análisis con la cadena generada para este valor de z .

Como se mostró en la Figura 17, durante la fase de optimización en ADMB se elige el punto de inicio para el proceso MCMC el cual se estima es cercano a la moda de la distribución posterior. El modelo se inicializó con los valores mostrados en la Tabla VI y el valor del parámetro z se fijó en uno.

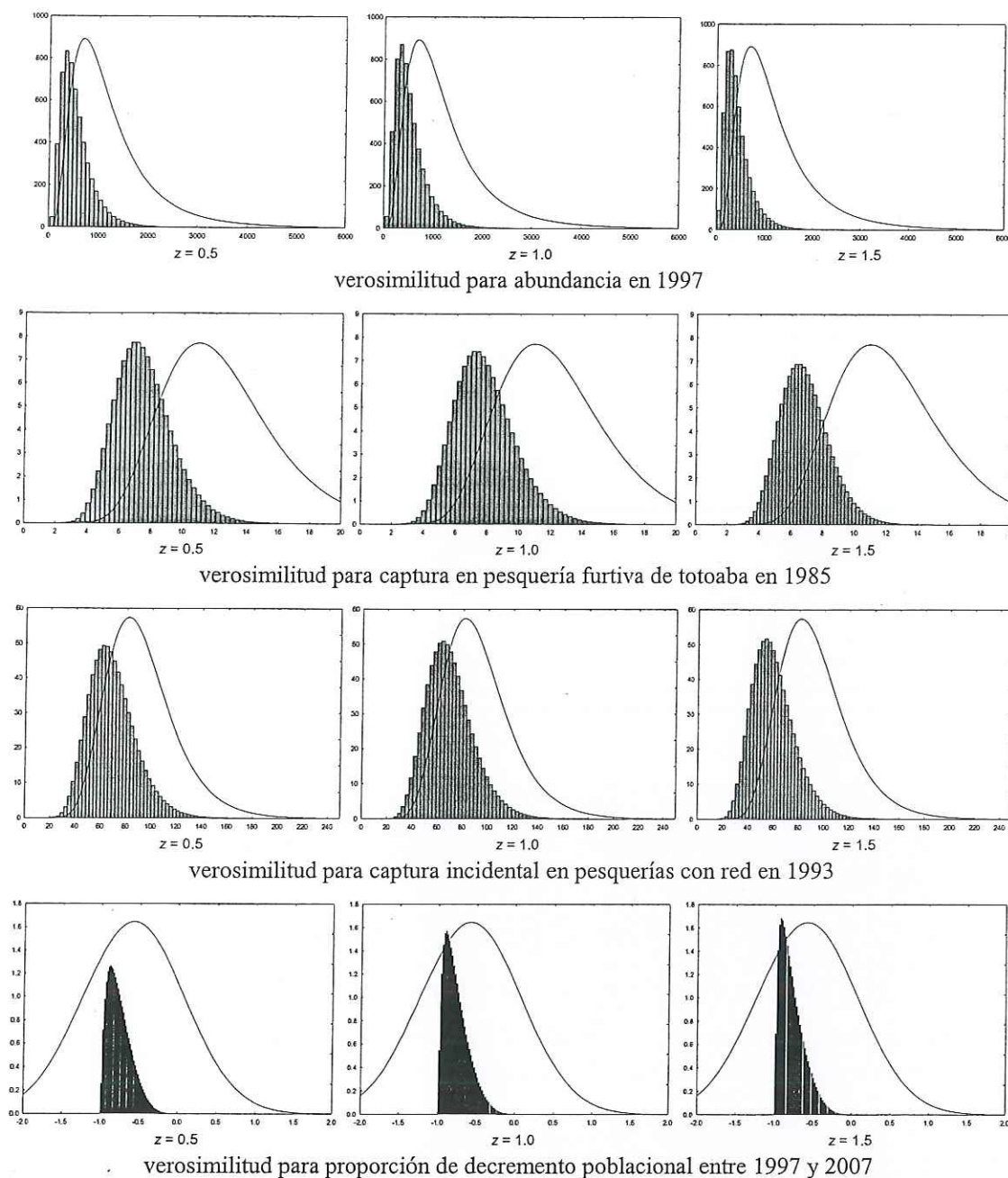


Figura 20. Verosimilitudes comparadas con sus distribuciones posteriores para tres valores del parámetro z (0.5, 1.0 y 1.5). Los histogramas representan la distribución posterior de cada parámetro y la línea la forma de las funciones de verosimilitud correspondientes.

En la Figura 21 se muestra el desarrollo de la cadena para el valor de la Ecuación 15. Esto es, el valor obtenido para el logaritmo del producto de la verosimilitud y la distribución previa, que es el valor que se necesita integrar para obtener el área de la distribución posterior conjunta. En esta figura se aprecia cómo el valor de la función

recorrió todo el espacio disponible, no se restringió a una cierta zona, aunque si se aprecia que estuvo rondando los valores más bajos. ADMB es una rutina de minimización, por lo que dentro del templete escrito para ser ensamblado se tuvo que cambiar el signo a la Ecuación 15, de forma que se buscara un mínimo en vez de un máximo. Es por ello que es normal que los valores en la gráfica se vea recorren con frecuencia la zona inferior de la gráfica. Por otro lado, no se aprecia en la gráfica un comportamiento anómalo al inicio de ella por efecto de los valores con que inició la cadena. Por último, una vista cuidadosa indica que la cadena se desplazó a lo largo del espacio disponible de forma aleatoria, con saltos cortos o largos sin ningún patrón apreciable. De la misma forma, no se distingue una tendencia a lo largo de la cadena. De esta forma se puede decir que el efecto de autocorrelación fue solucionado satisfactoriamente al tomar una de cada cinco simulaciones para conformar la cadena.

En la Figura 22 se muestran las gráficas de convergencia para los parámetros del modelo (Tabla VI). En todos los casos se muestra la cadena de diez millones de simulaciones para el caso del parámetro z igual a 1. Se aprecia como en todos los casos la media y desviación estándar se estabilizaron y cada parámetro recorrió todo su espacio de distribución de forma repetida y aleatoria, sin mostrar alguna tendencia, aún aunque sólo se muestran las primeras 1000 simulaciones. Por tanto no hay evidencia de falta de convergencia.

Distribuciones posteriores

En el Apéndice D y Figura 23 se muestran los descriptores de las distribuciones de los parámetros del modelo así como los parámetros derivados de interés. Las medidas de tendencia central incluidas son promedio, mediana y primer momento calculado de los ochenta intervalos usados para construir los histogramas. Como medidas de dispersión y variabilidad se incluyen desviación estándar, segundo momento, valores inferior y superior y límites de los intervalos de credibilidad al 95, 90 y 80%. Estos fueron contruidos de percentiles de los diez millones de simulaciones obtenidas con la rutina MCMC. Las distribuciones posteriores de los parámetros del modelo se observan

asimétricas con una forma funcional tipo log-normal. Las posteriores para los parámetros K y r_{max} muestran una dispersión similar a su distribución previa, con un desplazamiento e el promedio. Es claro que estuvieron dominadas por sus distribuciones previas. La distribución para los parámetros derivados resultó monótonica negativa. Esto indica que, para ambos parámetros, el modelo predice bajos valores con altas probabilidades.

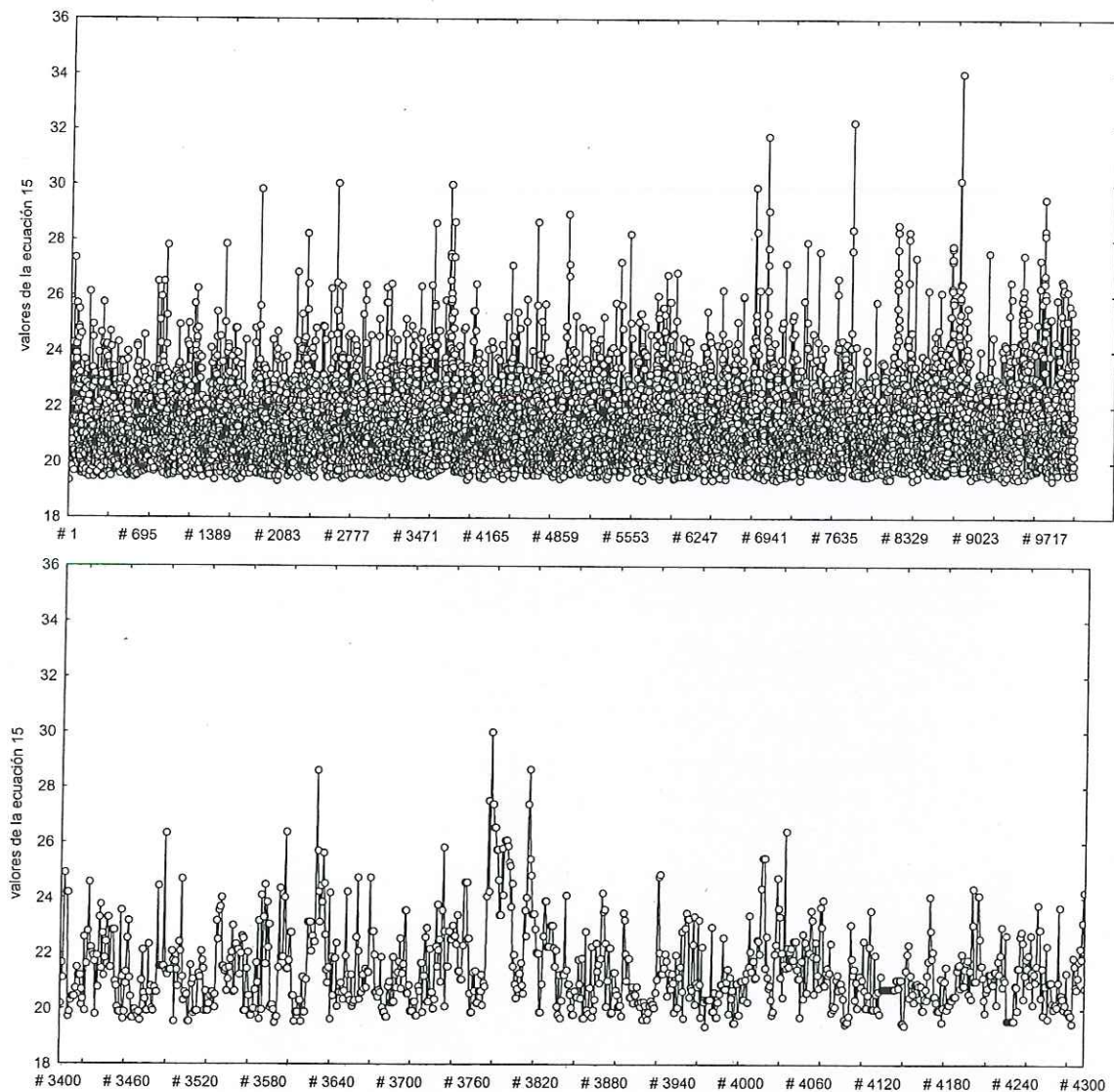


Figura 21. Recorrido de la cadena para el valor de la Ecuación 15 para las primeras 10400 simulaciones (arriba) y para las simulaciones 3400 a 4300.

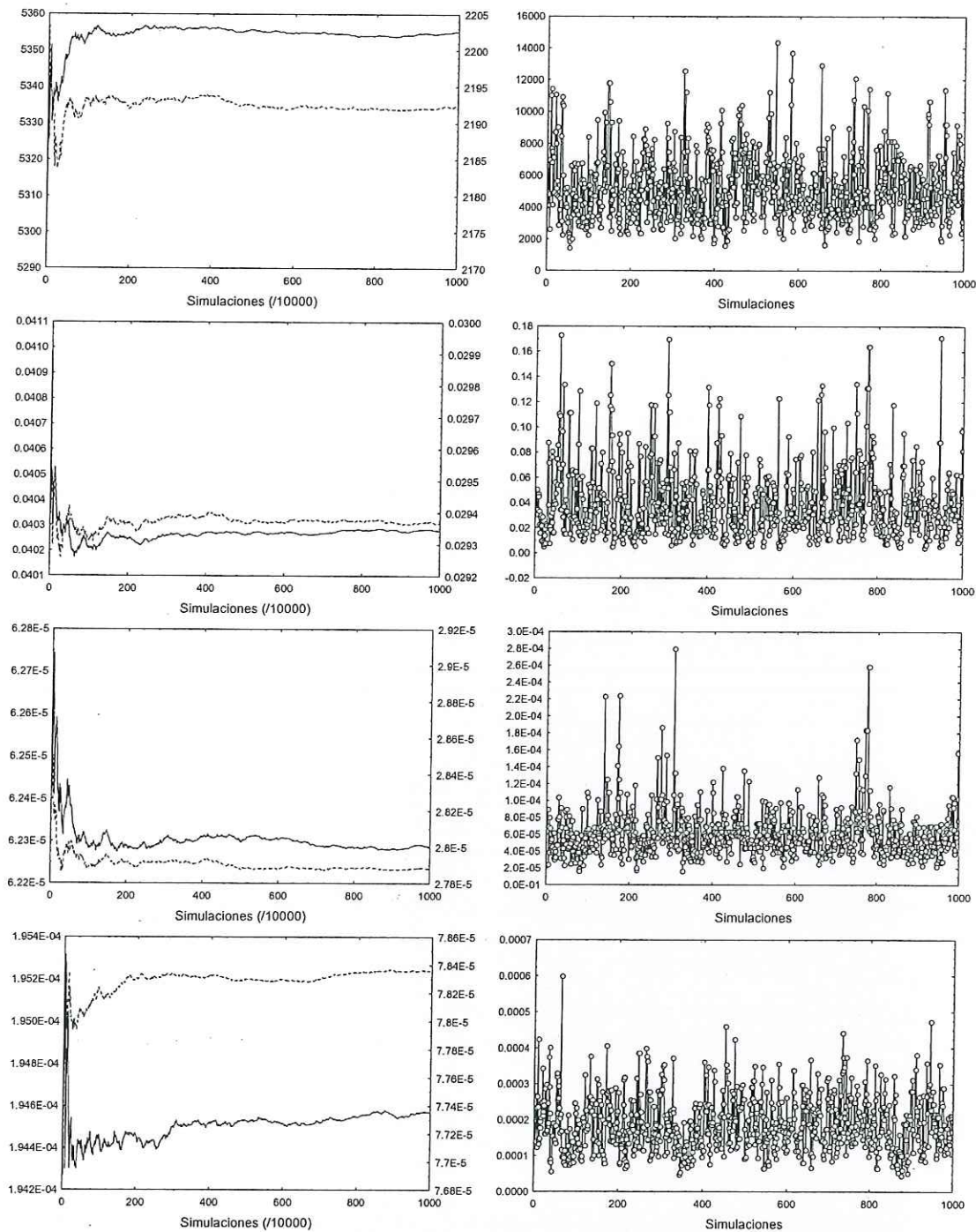


Figura 22. Gráficas de convergencia para los parámetros del modelo. En orden de arriba hacia abajo K , r_{max} , qT y qR . A la izquierda se muestra la evolución del promedio (línea continua) y la desviación estándar (línea quebrada) a través de los diez millones de simulaciones. A la derecha se muestra la forma en que saltaron los valores para los parámetros durante las primeras 1000 simulaciones.

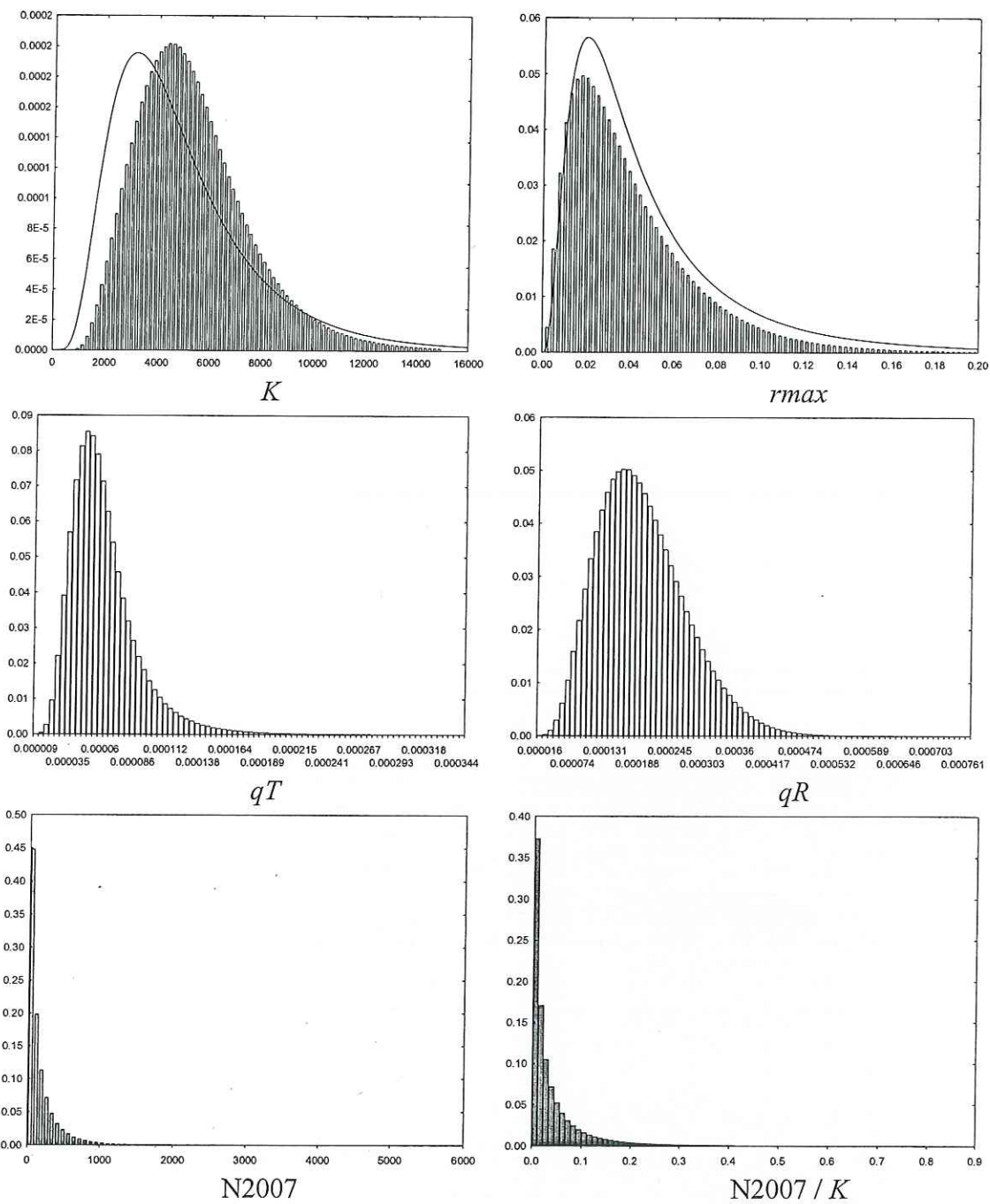


Figura 23. Distribuciones posteriores de los parámetros del modelo y parámetros de interés (histogramas). Para K y $rmax$ se presenta la forma de la distribución previa (línea). Para los otros parámetros no se muestra una distribución previa, ya que esta fue uniforme.

En la Figura 24 y Apéndice D se muestran datos comparativos para el parámetro K incluyendo todas las diez millones de simulaciones y para el mismo parámetro incluyendo sólo las últimas cinco millones de simulaciones. Es decir, se aplicó un *burn-in* del 50% de las primeras simulaciones. Es claro, de la inspección del recorrido del parámetro K (Figura 22) y de la comparación de las distribuciones posteriores y estadísticos de K con y sin *burn-in*, que el eliminar simulaciones no es necesario, ya que el inicio de la cadena no se comportó anómalamente ni modificó en forma alguna a la distribución posterior resultante. Por tal motivo, los resultados que se reportan en este trabajo provienen del análisis de la cadena MCMC completa con las diez millones de simulaciones generadas.

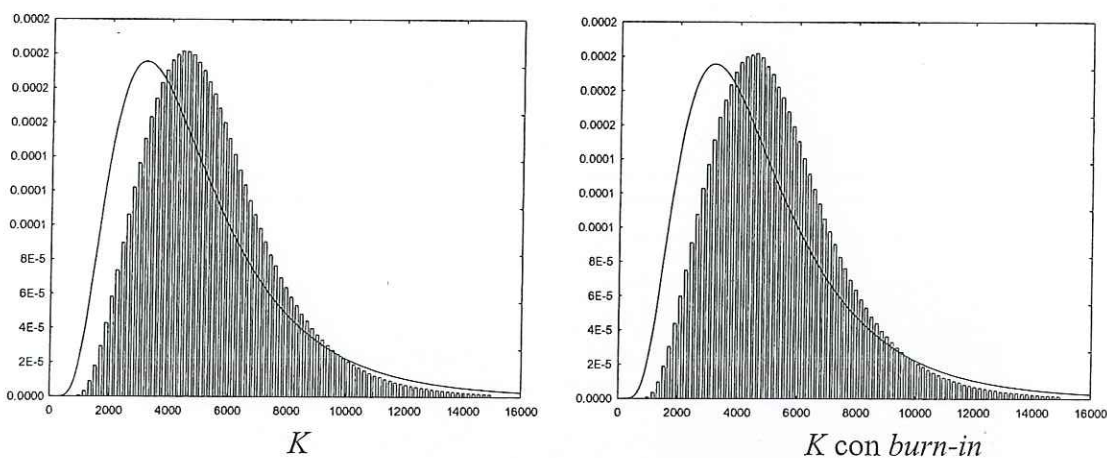


Figura 24. Distribuciones posteriores comparadas para el parámetro K con y sin *burn-in* aplicado (histogramas). Las líneas representan la forma de la distribución previa.

Evolución 1920-2007 de la población de vaquita según el modelo

Las distribuciones posteriores que se obtuvieron para los parámetros del modelo resultaron con una forma funcional tipo log-normal. Entonces la mediana fue usada como la mejor medida de tendencia central. Usando esta medida como una estimación puntual para los parámetros del modelo (con $z = 1$), en la Figura 25 se muestra la evolución poblacional de 1920 a 2007. Se observa una pronunciada mortalidad durante la época en que duró la pesquería legal de totoaba. Durante la década de los 1970 se aprecia que el modelo estima una recuperación de la población, dadas las bajas tasas de

captura de totoaba y que aún no se iniciaba el período de las pesquerías con red agallera y de enmalle. Debe haber habido un incremento gradual de esta última pesquería durante la década de los 1970, ya que en la literatura disponible (Cudney y Turk, 1998) se indica que el inicio formal se dio hacia la década de los 1980. Por otro lado, el modelo estima que en estos años se capturan unas cuantas vaquitas al año, dado que la población se halla muy reducida. Sin embargo, esta cantidad comparada con la estimación de la abundancia actual es significativa y aún muy dañina.

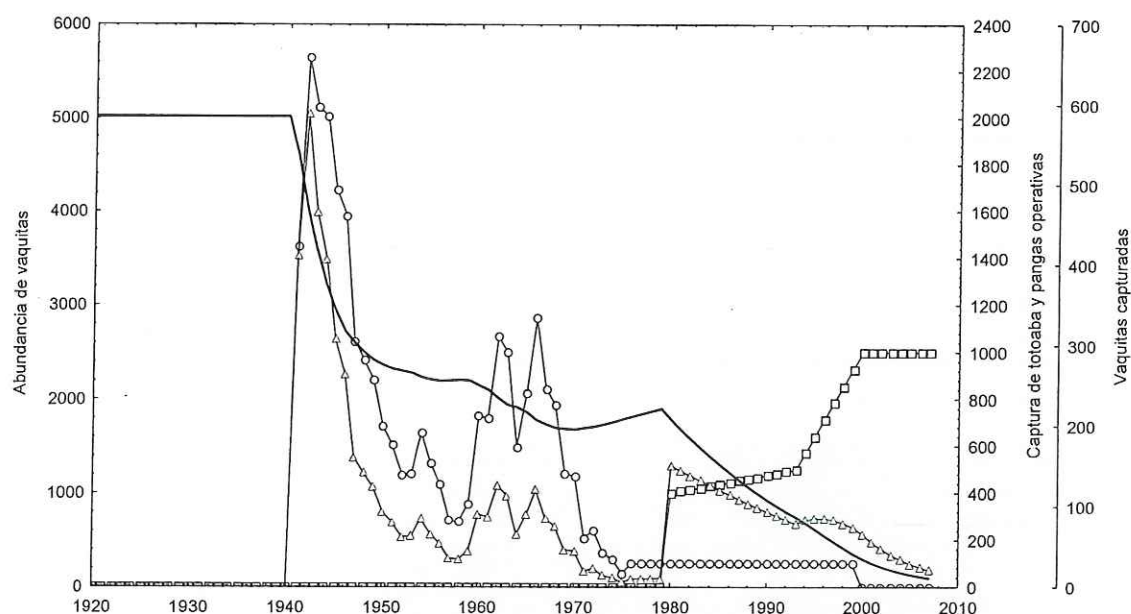


Figura 25. Evolución estimada de la población de vaquita entre 1920 y 2007, de acuerdo a los estimadores puntuales de los parámetros del modelo. La línea sin marcadores es la abundancia, la línea con círculos marca la captura histórica de totoaba, la línea con cuadros es el número de pangas en operación para la pesca con redes agalleras, la línea con triángulos representa la estimación de vaquitas capturadas por año.

Estimación del estatus de la población para 2007

Como se explicó en el apartado sobre métodos, se asume que previo a 1940 la población de la vaquita no sufrió interacciones con actividades humanas, o estas no fueron significativas. Por tanto en esos años la población fue guiada sólo por factores ambientales y características propias de su biología y dinámica poblacional. Entonces, se infiere que la población se hallaba alrededor de su abundancia en equilibrio, es decir, cerca de la capacidad de carga K , la cual marca la referencia para establecer el estatus

actual de la población. La mediana de K es 5,015. Con 90% de probabilidades K es menor de 8,200 individuos. Para 2007 el modelo estima una abundancia de 93 individuos (mediana), con 90% de probabilidades de un valor menor a 400 individuos.

De tal forma se estima que en 2007 la población se halla entre 0.097 a 16.467% de K según el intervalo de credibilidad al 90% para este parámetro derivado (Apendice D). Tomando en cuenta el intervalo al 80% la población podría estar entre 0.199 a 10.947% de K . Dicho de otra forma, hay 89% de probabilidades de que el estatus de la población sea menor a 10% de K , y 95% de probabilidades de que sea menor a 16%.

DISCUSIÓN

Distribuciones posteriores marginales

Las distribuciones posteriores marginales de los parámetros del modelo, obtenidas con la simulación efectuada, presentan una distribución asimétrica que semeja una distribución log-normal. Dado que estos parámetros pertenecen al dominio de los reales positivos, este tipo de distribución observada luce como una buena representación de su variabilidad.

La posterior para K resultó con una distribución muy parecida a la previa para este parámetro, pero la media se desplazó hacia la derecha, es decir, el modelo estima que la abundancia histórica es más alta que lo previamente estimado, y parece que su distribución posterior estuvo dominada tanto por su distribución previa como por la verosimilitud.

La distribución posterior para r_{max} estuvo dominada por la distribución previa. Esto era de esperarse, ya que la distribución previa fue construida de manera que contuviera dentro del 90% de su espacio los valores más extremos reportados en la literatura. Es decir, es una distribución muy dispersa. La distribución muestra el mismo comportamiento en su dispersión, sin embargo tendió a valores promedio ligeramente más bajos. Es decir, el modelo predice una más lenta capacidad de crecimiento para la población de vaquita.

Las distribuciones posteriores para los dos parámetros relacionados con la captura incidental (qT y qR) reflejan características log-normales. Ambas muestran ligera asimetría hacia la izquierda. Dado que la distribución previa para estos parámetros fue una uniforme semi-informativa (con límites mínimos y máximos especificados) su distribución posterior estuvo dominada por la verosimilitud especificada en el modelo.

En todos los casos las distribuciones resultantes lucen suavizadas en sus contornos, lo que indica que el número de simulaciones requerido para su descripción fue suficiente.

Bondad de ajuste del modelo

Los datos disponibles para confrontar al modelo fueron la estimación de abundancia de 1997 (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999), la estimación de mortalidad en redes en 1993 (D'Agrosa *et al.*, 2000), la estimación de mortalidad en captura furtiva de totoaba hecha con información publicada acerca de tasas de captura en redes e intensidad de la pesca ilegal (Cisneros-Mata *et al.*, 1995; Fleischer *et al.*, 1996) y la estimación de la tasa de decremento poblacional estimada a través de tasas de encuentro acústico (Capítulo II de este trabajo).

En la Figura 20 se presentan gráficas comparativas de la distribución estimada de las funciones de verosimilitud contra la distribución esperada de los parámetros que describen. En todos los casos la distribución posterior tiene promedios más bajos, sin embargo la dispersión se comporta de forma similar entre las distribuciones previas y las posteriores.

La excepción se da respecto a la tasa de decremento poblacional entre 1997 y 2007. La distribución posterior resultó en una distribución asimétrica y con menor dispersión y promedio que la distribución normal que contiene la información previa. El menor promedio es lo esperado, ya que la información previa resultó de censos acústicos (Capítulo II de esta tesis), en los que se detectan pulsos acústicos que provienen de animales solitarios o de grupos de animales. De tal forma, estos censos detectaron un decremento en la tasa de encuentro de grupos, mientras que el modelo midió el decremento en el número de animales. Por tal era de esperarse un aumento en la tasa de decremento estimada por el modelo. La menor dispersión respecto a la información previa, así como la asimetría, resulta del hecho de que el modelo especificó una tasa de disminución durante los últimos diez años, hecho que se justifica dado que en los últimos meses se han detectado y avistado vaquitas. Es decir, la población no se ha extinto. Es por ello que hacia la izquierda de la distribución posterior se nota un recorte, el proceso MCMC tomó valores para los parámetros que resultaron en tasas de decremento no tan elevadas que significaran la extinción de la población. Así mismo,

esta tasa no cambió a valores positivos, ya que el nivel de esfuerzo pesquero no permite que esto ocurra dentro del modelo, lo cual es también lo esperado para el fenómeno real. La población de la vaquita ha venido disminuyendo en los últimos años.

Por lo anterior, se aprecia que el modelo siguió cercanamente a la verosimilitud especificada y en el caso de la tasa de decremento su alejamiento de la información previa tiene una explicación clara. De tal forma se concluye que el modelo es un adecuado indicador de la tendencia real de la población de la vaquita.

Estatus actual de la población

El estado actual de depresión de la población de vaquita es de aproximadamente 1.88% de K (mediana, promedio 4.22%, Apéndice D), siendo la población actual de aproximadamente 93 individuos (mediana, promedio 175). Desde el punto de vista de su distribución posterior, hay 89% de probabilidades de que el estatus de la población sea menor a 10% de K y 95% de probabilidades de que sea menor a 16%. La población actual, con 77% de probabilidades, es menor de 200 individuos.

De acuerdo a la Lista Roja de Especies Amenazadas de la IUCN (2007) la vaquita está clasificada como *Críticamente Amenazada*. Los criterios usados en esta lista involucran reducción en tamaño poblacional, reducciones o fragmentaciones de áreas de distribución, tamaños poblacionales y probabilidades de extinción. Los tamaños poblacionales se refieren a individuos maduros, los cuales son sólo los capaces de reproducirse.

La vaquita está clasificada como críticamente amenazada obedeciendo a dos juegos de criterios (IUCN, 2007). El primer juego es el *A4d*, el cual significa que el tamaño de la población fue reducido en 80% o más en un período de tiempo igual a diez años o tres generaciones, el que sea más largo, en el pasado o futuro y que las causas de la reducción no hayan cesado, o no sean entendidas o no sean reversibles. En el caso de la vaquita tres generaciones son aproximadamente 30 años, dado el promedio de edad de las hembras activas es de aproximadamente 10 años, a juzgar de la estructura de edad

descrita a partir de animales recuperados para estudio (Hohn *et al.*, 1996). También, las causas de la reducción están bien asociadas a la mortalidad incidental actual en redes (Rojas-Bracho *et al.*, 2006). El segundo juego de criterios es el *C2a(ii)*, el cual indica que el tamaño poblacional actual es menor de 250 individuos maduros, que la población ha estado experimentando un declive continuo y que al menos 90% de los individuos maduros están en una sola subpoblación. Es reconocido que la vaquita forma una única población en el mundo (rojas reeves jaramillo). La información presentada en este trabajo apoya la clasificación de la especie.

Tiempo esperado para recuperar a la población suponiendo la interrupción total de la pesca incidental

Si se tomaran medidas para la eliminación completa de la pesca incidental a partir del año 2008, la población mostraría una recuperación en la forma de incremento poblacional, dado que se sabe que la población se está reproduciendo por el avistamiento de crías en tiempos recientes. El Gobierno de México, y otras agencias interesadas en la recuperación de la vaquita, han establecido medidas recientes para la recuperación de la especie, lo que incluye la eliminación de su mortalidad en redes. Sin embargo, no se han establecido metas que indiquen el momento en el que el plan de recuperación haya cumplido con su cometido. Este es precisamente el interés central de este trabajo, brindar elementos que permitan el establecimiento de una meta para el programa de recuperación.

Dado que se cuenta ahora con una estimación del tamaño histórico de la población (K) y como se estima que el parámetro z del modelo poblacional es igual a uno, el nivel de máxima productividad neta (NMPN) de la población se debe hallar aproximadamente a 50% de K . La meta de manejo, entonces, puede ser el que la población alcance este tamaño y, posteriormente, un esquema de manejo debe cuidar que el tamaño poblacional se mantenga en estos niveles o que la población crezca más aún.

Permitiendo que el modelo poblacional estime la abundancia a partir de 2008, sin incluir mortalidad debida a capturas incidentales, aproximadamente en 75 años se alcanzaría el

máximo nivel de productividad neta, cuando la población contara con aproximadamente 2000 individuos.

Formas de mejorar el modelo

En el capítulo dos de este trabajo se presentaron los resultados de un estudio poblacional de la vaquita basado en la aplicación de técnicas acústicas pasivas para detectar individuos. Este trabajo permitió estimar la tasa de decremento poblacional en los últimos años de forma indirecta, a través de tasas de encuentro acústico. Esta medida es un indicador de densidad, el cual podría ser convertido a estimaciones de densidad poblacional, las cuales junto a un estudio de distribución y uso de hábitat podrían estimar abundancia absoluta (cita de mi trabajo). Estimaciones de este tipo podrían ser incluidas en el término de verosimilitud del modelo poblacional presentado, lo cual podría mejorar el ajuste de los parámetros de interés.

En el modelo presentado se utilizó un parámetro global para estimar la mortalidad incidental anual. Sin embargo, se tienen estimadores de tasas de mortalidad para cuatro pesquerías que ocupan la temporada pesquera anual en el Alto Golfo de California (D'Agrosa *et al.*, 2000). Se podría incluir en el modelo ecuaciones que estimen la mortalidad para cada pesquería en cada año, utilizando los estimadores de mortalidad publicados y otros parámetros que regulen el esfuerzo pesquero de acuerdo a los elementos brindados por D'Agrosa (2000), tal como el número de viajes de pesca realizados por temporada. De esta forma estimación podría ser afinada dada la información previa disponible. Por otro lado, esta estrategia de estimación permitirá, en un futuro, modelar a la población de mejor forma, dado que los esquemas para el retiro de esfuerzo como parte del plan de recuperación se darán seguramente de forma escalonada. Esto es, el retiro se dará en porciones de pesquerías y por tiempos, dado que posiblemente los recursos económicos disponibles no sean suficientes y tengan que ser conseguidos por fases. Además se debe tomar en cuenta que se debe tomar un tiempo para llegar a consensos con la comunidad pesquera, la cual puede reaccionar de distinta forma dependiendo de la pesquería o poblado de que se trate.

Por último, el uso de un modelo estructurado por edad podría mejorar la estimación, pero se debe asegurar que los parámetros de supervivencia, fertilidad, estructura de edad y edad de primera madurez pueden ser manejados de forma adecuada para evitar la inclusión de sesgos. La estimación realizada por Ortiz (2002) reporta una K de aproximadamente 5,000 individuos, un valor muy similar al reportado en este trabajo, por lo que quizá no sería necesario utilizar un modelo más complicado que el aquí presentado, sino aplicar el principio de parsimonia.

CONCLUSIÓN

Tal como se delineó en este trabajo, se confirma que el estatus actual de la vaquita es demasiado crítico, tal como se había reportado con insistencia (Rojas-Bracho y Taylor, 1999; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999; Rojas-Bracho *et al.*, 2006; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2007). Este trabajo aporta elementos cuantitativos que permiten apoyar más aún este punto de vista, el cual se ve reflejado en el listado de la vaquita en las categorías más críticas sobre fauna silvestre amenazada alrededor del mundo.

Esta es otra llamada de urgencia para poner en acción medidas urgentes para evitar mayor mortandad en redes pesqueras. Tal como lo indica el modelo, el tiempo necesario para recuperara a la población a niveles saludables es largo, por lo que es necesario empezar a aplicar las medidas de inmediato, de lo contrario la población podría alcanzar niveles a los cuales su extinción podría ser lo más probable.

De acuerdo a la complejidad e intensidad de la pesca con redes en el Alto Golfo de California, la única forma segura de evitar más capturas incidentales es la eliminación de este arte de pesca en la zona. Las alternativas son buscar otras actividades económicas para la comunidad pesquera o la aplicación de otros artes pesqueros no dañinos para la vaquita.

IV. LITERATURA CITADA

- Aguayo-L., A., A. Perdomo-V., M. Salinas-Z. y L. Bourillon-M. 1986. Avistamientos del cochito *Phocoena sinus* Norris y McFarland, 1958 en las aguas del Golfo de California, México, desde 1981 a 1984. Memorias III Simposio Ciencias en Sistemas Biológicos. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Pp 30-40.
- Alvarez, L.G. y S.E. Jones. 2004. Short-term observations of suspended particulate matter in a macro-tidal inverse estuary: The Upper Gulf of California. *Journal of Coastal Research* 20:645-654.
- Au, W.W.L. 1993. *The Sonar of Dolphins*. Springer-Verlag, New York. 292 pp.
- Au, W.W.L., Kastelein, R.A., Rippe, T. y Schooneman, N.M. 1999. Transmission beam pattern and echolocation signals of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*). *Journal of the Acoustical Society of America* 106:3699-3705.
- Barlow, J. y Boveng, P. 1991. Modelling age-specific mortality for marine mammal populations. *Marine Mammal Science* 7:84-119.
- Barlow, J., Gerrodette, T., y Silber, G. 1997. First Estimates of Vaquita Abundance. *Marine Mammal Science* 13:44-58.
- Barlow, J. y B.L. Taylor. 2005. Estimates of Sperm Whale abundance in the Northeastern temperate Pacific from a combined acoustic and visual survey. *Marine Mammal Science* 21(3):429-445.
- Berdegúe, A.J. 1955. La pesquería de la totoaba (*Cynoscion macdonaldi*), en San Felipe, Baja California. *Revisiones de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 16(1):45-78.
- Brownell, Jr., R.L. 1982. Status of the cochito, *Phocoena sinus*, in the Gulf of California. pp. 85-90 In: *Mammals in the seas*. Vol.4. Small cetaceans, seals, sirenians and otters (FAO/UNEP). FAO Fisheries Series No. 5.
- Brownell Jr., R.L. 1983. *Phocoena sinus*. *Mammalian Species* 198:1-3.
- Brownell Jr., R.L. 1986. Distribution of the Vaquita, *Phocoena sinus*, in Mexican Waters. *Marine Mammal Science* 2:299-305.
- Brownell Jr., R.L., L.T. Findley, O. Vidal, A. Robles y S. Manzanilla-N. 1987. External Morphology and Pigmentation of the Vaquita, *Phocoena sinus* (Cetacea: Mammalia). *Marine Mammal Science* 3:22-30.
- Buckland, S.T., D.R. Anderson, K.P. Burnham y J.L. Laake. 1993. *Distance Sampling: Estimating Abundance of Biological Populations*. Chapman and Hall, New York and London. 446 pp.
- Carlström, J. 2005. Diel variation in echolocation behaviour of wild harbour porpoises. *Marine Mammal Science* 21(1):1-12.

- Carriquiry, J.D. y A. Sánchez. 1999. Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Marine Geology* 158:125-145.
- Cartensen, J., O.D. Henriksen y J. Tielmann. 2006. Impacts of offshore wind farm construction on harbour porpoises: acoustic monitoring of echo-location activity using porpoise detectors (T-PODs). *Marine Ecology Progress Series* 321:295-308.
- Chappell, O.P., R. Leaper y J. Gordon. 1996. Development and Performance of an Automated Harbour Porpoise Click Detector. *Reports of the International Whaling Commission* 46:587-594.
- Chute, R. 1928. The Totuáva Fishery of the California Gulf. *California Fish and Game* 14:275-281.
- Cisneros-Mata, M.A., G.A. Montemayor-Lopez y J.M. Roman-Rodriguez. 1995. Life history and conservation of *Totoaba macdonaldi*. *Conservation Biology* 9:806-814.
- Cox, T.M. y A.J. Read. 2004. Echolocation behaviour of harbour porpoises *Phocoena phocoena* around chemically enhanced gill nets. *Marine Ecology Progress Series* 279:275-282.
- Cox, T.M., A.J. Read, A. Solow y N.J.C. Tregenza. 2001. Will harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) habituate to pingers? *Journal of Cetacean Research and Management* 3(1):81-86.
- Craig, J.A. 1926. A new fishery in Mexico. *California Fish and Game* 12:166-169.
- Cudney Bueno, R. y P.J. Turk Boyer. 1998. *Pescando entre mareas del Alto Golfo de California. Una guía sobre la pesca artesanal, su gente y sus propuestas de manejo*. Centro Intercultural de Estudios de Desiertos y Océanos, A.C. Puerto Peñasco, Sonora, México. 166 pp.
- Culik, B.M., S. Koschinski, N. Tregenza y G.M. Ellis. 2001. Reactions of harbour porpoises *Phocoena phocoena* and herring *Clupea harengus* to acoustic alarms. *Marine Ecology Progress Series* 211:255-260.
- D'Agrosa, C., C.E. Lennert-Cody y O. Vidal. 2000. Vaquita Bycatch in Mexico's Artisanal Gillnet Fisheries: Driving a Small Population to Extinction. *Conservation Biology* 14:1110-1119.
- D'Agrosa, C., O. Vidal y W.C. Graham. 1995. Mortality of the Vaquita (*Phocoena sinus*) in Gillnet Fisheries During 1993-94. In Bjørge, A. y G.P. Donovan (Eds.) *Biology of the Phocoenids*. International Whaling Commission, Cambridge, U.K. pp. 283-291.
- Dailey, M.D. y R.L. Brownell Jr. 1972. A checklist of marine mammal parasites. Pp. 528-589 In: Ridgway, S.H. (ed.) *Mammals of the sea, biology and medicine*. Charles C. Thomas. Springfield, Illinois, USA. 812 pp.
- Ellison, A.M. 1996. An introduction to Bayesian inference for ecological research and environmental decision-making. *Ecological Applications* 6(4):1036-1046.

- El-Sayyad, G.M. 1973. Bayesian and Classical Analysis of Poisson Regression. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 35(3):445-451.
- Fitch, J.E. y R.L. Brownell Jr. 1968. Fish otoliths in cetaceans stomachs and their importance in interpreting feeding habits. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 25:2561-2574.
- Flanagan, C.A. y J.R. Hendrickson. 1976. Observations on the Commercial Fishery and Reproductive Biology of the Totoaba, *Cynoscion macdonaldi*, in the Gulf of California. *Fishery Bulletin* 74:531-544.
- Fleischer, L., R. Moncada-Cooley, H. Pérez-Cortés-Moreno y A. Polanco-Ortíz. 1996. Análisis de la mortalidad incidental de la vaquita, *Phocoena sinus*. Historia y actualidad (abril de 1994). *Ciencia Pesquera* (13):78-82.
- Gelman, A., B.P. Carlin, H.S. Stern y D.B. Rubin. 1995. *Bayesian Data Analysis*. Texts in Statistical Science Series. Chapman and Hall, London. 526 pp.
- George, J.C., J. Zeh, R. Suydam, C. Clark. 2004. Abundance and population trend (1978-2001) of Western Arctic Bowhead whales surveyed near Barrow, Alaska. *Marine Mammal Science* 20(4):755-773.
- Gerrodette, T., L.A. Fleischer, H. Pérez-Cortés and B. Villa-Ramírez. 1995. Distribution of the vaquita, *Phocoena sinus*, based on sightings from systematic surveys. Pp. 273-281 In: Bjørge, A. y G.P. Donovan (Eds.) *Biology of the Phocoenids*. Reports of the International Whaling Commission (Special Issue 16). Cambridge, U.K. 552 pp.
- Gillespie, D. y O. Chappell. 2002. An automatic system for detecting and classifying the vocalisations of harbour porpoises. *Bioacoustics* 13:37-61.
- Gordon, J.C.D. y P. Tyack. 2002. Acoustic techniques for studying cetaceans. Pp. 293-324 In: Evans, P.G.H. y J.A. Raga (Eds.) *Marine Mammals: Biology and Conservation*. Kluwer Academic, London and New York.
- Gordon, J.C.D., J.N. Matthews, S. Panigada, A. Gannier, J.F. Borsani y G. Notabartolo Di Sciara. 2000. Distribution and relative abundance of striped dolphins in the Ligurian Sea Cetacean Sanctuary: Results from an acoustic collaboration. *Journal of Cetacean Research and Management* 2:27-36.
- Hawkins, A.D., D.N. MacLennan, G.G. Urquhart y C. Robb. 1974. Tracking cod *Gadus morhua* L. in a Scottish sea loch. *Journal of Fish Biology* 6(3):225-236.
- Hohn, A.A., A.J. Read, S. Fernáandez, O. Vidal y L.T. Findley. 1996. Life history of the vaquita, *Phocoena sinus* (Phocoenidae, Cetacea). *Journal of Zoology (London)* 239:235-251.
- INP (Instituto Nacional de la Pesca). 2000a. Camarón del Océano Pacífico. pp. 1-50 In: Díaz de León-Corral A. y M.A. Cisneros-Mata (eds.) *Sustentabilidad y Pesca Responsable en México. Evaluación y Manejo 1999-2000*. Instituto Nacional de la Pesca, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1043 pp.

- INP (Instituto Nacional de la Pesca). 2000b. *Catálogo de los Sistemas de Captura de las Principales Pesquerías Comerciales*. Instituto Nacional de la Pesca. Dirección General de Investigación y Desarrollo Tecnológico Pesquero. México, D.F.
- IUCN. 1996. 1996 IUCN Red List of Threatened Animals. IUCN (The World Conservation Union). Gland, Switzerland.
- IUCN 2007. 2007 IUCN Red List of Threatened Species. <www.iucnredlist.org>. Downloaded on 14 April 2008.
- Janik, V.M. 1999. A two-dimensional acoustic localization system for marine mammals. *Marine Mammal Science* 16(2):437-447.
- Jaramillo-Legorreta, A.M., L. Rojas-Bracho, R.L. Brownell Jr, A.J. Read, R.R. Reeves, K. Ralls y B.L. Taylor. 2007. Saving the vaquita: immediate action, not more data. *Conservation Biology* 21(6):1653-1655.
- Jaramillo-Legorreta, A.M., L. Rojas-Bracho y T. Gerrodette. 1999. A New Abundance Estimate for Vaquitas: First Step for Recovery. *Marine Mammal Science* 15:957-973.
- Jaramillo Legorreta, A.M., L. Rojas Bracho, J. Gordon y D. Gillespie. 2002. Progress report of vaquita acoustic surveys. Document SC/54/SM17 presented to the 54th Meeting of the Scientific Committee of the International Whaling Commission (unpublished). 10 pp.
- Jaramillo-Legorreta, A.M., L. Rojas-Bracho, J. Gordon y D. Gillespie. 2003. Progress report of vaquita acoustic surveys. Document SC/55/SM4 presented to the 55th Meeting of the Scientific Committee of the International Whaling Commission (unpublished). 5 pp.
- Jaramillo-Legorreta, A.M., L. Rojas-Bracho y J. Urban-Ramirez. 2005. A Review of Acoustic Surveys and Conservation Actions for the Vaquita. Document SC/57/SM10 presented to the 57th Meeting of the Scientific Committee of the International Whaling Commission (unpublished). 9 pp.
- Jefferson, T.A., S.K. Hung, L. Law, M. Torey y N. Tregenza. 2002. Distribution and abundance of finless porpoises in Hong Kong and adjacent waters of China. *Raffles Bulletin of Zoology* 10:43-55.
- Johnson, D.H. 1999. The Insignificance of Statistical Significance Testing. *Journal of Wildlife Management* 63(3):763-772.
- Jones, G.J. y L.S. Sayigh. 2002. Geographic variation in rates of vocal production of free-ranging bottlenose dolphins. *Marine Mammal Science* 18(2):374-393.
- Kaiya, Z. 2002. Baiji *Lipotes vexillifer*. . pp. 58-61 In: Perrin, W.F., B.Würsig y J.G.M.Thewissen (Eds.) *Encyclopedia of Marine Mammals*. Academic Press, San Diego, California, USA. 1414 pp.
- Kamminga, C., A.C. Stuart y G.K. Silber. 1996. Investigations on cetacean sonar XI: Intrinsic comparison of the wave shapes of some members of the Phocoenidae family. *Aquatic Mammals* 22:45-55.

- Laurinolli, M.H., A.E. Hay, F. Desharnais y C.T. Taggart. 2003. Localization of North Atlantic Right Whale sounds in the Bay of Fundy using a sonobuoy array. *Marine Mammal Science* 19(4):708-723.
- Lavín, M.F., E. Beier y A. Badan. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. Pp. 141-171 *In*: Lavín, M.F. (Ed.) *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Unión Geofísica Mexicana. Monografía No. 3. Ensenada, B.C., México. 272 pp.
- Lyse, A.A., S.O. Stefansson y A. Ferno. 1998. Behaviour and diet of sea trout post-molts in a Norwegian fjord system. *Journal of Fish Biology* 52:923-936.
- Magallón-Barajas, F.J. 1987. The Pacific Shrimp Fishery of Mexico. *CalCOFI Reports* 28:43-52.
- Manzanilla-Naim, S. y S. Lanham. 1995. First record of a large congregation of vaquitas (*Phocoena sinus*) and feeding groups in the Upper Gulf of California, México. Abstracts, Twelve Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals. December, Orlando, Florida, USA. p 72.
- Marinone, S.G. y M.F. Lavín. 1997. Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California. Pp. 113-139 *In*: Lavín, M.F. (Ed.) *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Unión Geofísica Mexicana. Monografía No. 3. Ensenada, B.C., México. 272 pp.
- McDonald, M.A. y C.G. Fox. 1999. Passive acoustic methods applied to fin whale population density estimation. *The Journal of the Acoustical Society of America* 105(5):2643-2651.
- Mellinger, D.K., K.M. Stafford y C.G. Fox. 2004. Seasonal occurrence of Sperm Whale (*Physeter macrocephalus*) sounds in the Gulf of Alaska, 1999-2001. *Marine Mammal Science* 20(1):48-62.
- Mellinger, D.K., K.M. Stafford, S.E. Moore, R.P. Dziak y H. Matsumoto. 2007. Fixed Passive Acoustic Observation Methods for Cetaceans. *Oceanography* 20(4):36-45 (Special Issue on Ocean Exploration).
- Mellinger, D.K., S.L. Niekirk, H. Matsumoto, S.L. Heimlich, R.P. Dziak, J. Haxel, M. Fowler, C. Meinig y H.V. Miller. 2007. Seasonal occurrence of North Atlantic Right Whale (*Eubalaena glacialis*) vocalizations at two sites on the Scotian Shelf. *Marine Mammal Science* 23(4):856-867.
- Noble, B.A. y F.C. Fraser. 1971. Description of a skeleton and supplementary notes on the skull of a rare porpoise *Phocoena sinus* Norris and McFarland 1958. *Journal of Natural History* 5:447-464.
- Norris, K.S. y W.N. McFarland. 1958. A new harbor porpoise of the genus *Phocoena* from the Gulf of California. *Journal of Mammalogy* 39:22-39.
- Norris, K.S. y J.H. Prescott. 1961. Observation on Pacific Cetaceans of California and Mexican Waters. *University of California Publications in Zoology* 63: 291-401.

- Oleson, E.M., J. Calambokidis, J. Barlow y J.A. Hildebrand. 2007. Blue Whale visual and acoustic encounter rates in the Southern California Bight. *Marine Mammal Science* 23(3):574-597.
- Orr, R.T. 1969. An additional record of *Phocoena sinus*. *Journal of Mammalogy* 50:384.
- Ortiz, I. 2002. Impacts of fishing and habitat alteration on the population dynamics of the vaquita, (*Phocoena sinus*). A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. University of Washington. School of Aquatic and Fishery Sciences. 62 pp.
- O'Shea, T.J., R.L. Brownell Jr., D.R. Clark, W.A. Walker, M.L. Gay y T.G. Lamont. 1980. Organochlorine pollutants in small cetaceans from the Pacific and South Atlantic Oceans, November 1968 - June 1976. *Pesticides Monitoring Journal* 14:35-46.
- Oswald, J.N., J. Barlow y T.F. Norris. 2003. Acoustic identification of nine delphinid species in the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Marine Mammal Science* 19(1):20-37.
- Pérez Cortés Moreno, H. 1996. Contribución al conocimiento de la biología de la vaquita, *Phocoena sinus*. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 68 pp.
- Rankin, S., J. Barlow y K.M. Stafford. 2006. Blue whale (*Balaenoptera musculus*) sightings and recordings south of the Aleutian Islands. *Marine Mammal Science* 22(3):708-713.
- Reilly, S.B. y J. Barlow. 1986. Rates of increase in dolphin population size. *Fishery Bulletin* 84:527-533.
- Richardson, W.J., C.R. Greene Jr., C.I. Malme y D.H. Thomson. 1995. *Marine Mammals and Noise*. Academic Press, Inc., San Diego, California, USA. 576 pp.
- Ridout, M., J. Hinde y C.G.B. Demétrio. 2001. A Score Test for Testing a Zero-Inflated Poisson Regression Model against Zero-Inflated Negative Binomial Alternatives. *Biometrics* 57(1):219-223.
- Robles, A., L.T. Findley, O. Vidal, R.L. Brownell Jr. y S. Manzanilla-N. 1986. Recent records and external appearance of the Gulf of California harbor porpoise, or vaquita, *Phocoena sinus*, Norris and McFarland, 1958. Resúmenes, XI Reunión Internacional para el Estudio de los Mamíferos Marinos. Guaymas, Son., México, 2-6 de abril de 1986.
- Rojas-Bracho, L. y B.L. Taylor. 1999. Risk Factors Affecting the Vaquita (*Phocoena sinus*). *Marine Mammal Science* 15:974-989.
- Rojas-Bracho, L. y A.M. Jaramillo-Legorreta. 2002. Vaquita *Phocoena sinus*. pp. 1277-1280 In: Perrin, W.F., B. Würsig y J.G.M. Thewissen (Eds.) *Encyclopedia of Marine Mammals*. Academic Press, San Diego, California, USA. 1414 pp.
- Rojas-Bracho, L. y B.L. Taylor. 1999. Risk Factors Affecting the Vaquita (*Phocoena sinus*). *Marine Mammal Science* 15:974-989.

- Rojas-Bracho, L. y J. Urbán-Ramírez. 1993. Vaquita: Its Environment, Biology and Problematic. pp. 48-72 In: Fermán-Almada, J.L., L.Gómez-Morín y D.W. Fischer (Eds.) *Coastal Management in Mexico. The Baja California Experience*. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., U.S.A.
- Rojas-Bracho, L., R.R. Reeves y A.M. Jaramillo-Legorreta. 2006. Conservation of the vaquita *Phocoena sinus*. *Mammal Review* 36:179-216.
- Rosales-Juárez, F. y E. Ramírez González. 1987. Estado actual del conocimiento sobre la Totoaba (*Cynoscion macdonaldi*), Gilbert 1809. Secretaría de Pesca. México, D.F.
- Ross, H.M. y B. Wilson. 1996. Violent interactions between bottle-nosed dolphins and harbour porpoises. *Proceedings of The Royal Society of London B Biological Sciences* 263:283-286.
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 1993. Decreto por el que se declara área natural protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera, la región conocida como Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, ubicada en aguas del Golfo de California y los municipios de Mexicali, B.C., de Puerto Peñasco y San Luis Río Colorado, Son. Diario Oficial de la Federación (México). 10 de junio de 1993.
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-1994, que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a protección especial, y que establece especificaciones para su protección. Diario Oficial de la Federación (México). 16 de mayo de 1994.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001 Protección Ambiental - Especies Nativas de México de Flora y Fauna Silvestres - Categorías de Riesgo y Especificaciones para su Inclusión, Exclusión o Cambio - Lista de Especies en Riesgo. Diario Oficial de la Federación (México). 6 de marzo de 2002.
- Silber, G. 1987. Cruise report of the R/V Nai'a II. An assessment of the current population status of the Gulf of California harbor porpoise (*Phocoena sinus*). Final Report submitted to the Office of Science and Technology Affairs, Bureau of Oceans and International Environment and Scientific Affairs. U.S. Department of State, Washington, DC. 19 pp.
- Silber, G.K. 1988. Recent Sightings of the Gulf of California Harbor Porpoise, *Phocoena sinus*. *Journal of Mammalogy* 69:430-433.
- Silber, G.K. 1990. Occurrence and Distribution of the Vaquita *Phocoena sinus* in the Northern Gulf of California. *Fishery Bulletin, U. S.* 88:339-346.
- Silber, G.K. 1990a. Distributional relations of cetaceans in the northern Gulf of California, with special reference to the vaquita, *Phocoena sinus*. Ph.D. Dissertation, University of California, Santa Cruz, USA.
- Silber, G.K. 1991. Acoustic Signals of the Vaquita (*Phocoena sinus*). *Aquatic Mammals* 17:130-133.

- Silber, G.K. y K.S. Norris. 1991. The geographic and seasonal distribution of the vaquita, *Phocoena sinus*. *Anales del Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México* 62:263-268.
- Silber, G.K., M.W. Newcomer, P.C. Silber, M.H. Pérez-Cortés y G.M. Ellis. 1994. Cetaceans of the Northern Gulf of California: Distribution, Occurrence, and Relative Abundance. *Marine Mammal Science* 10:283-298.
- Slooten, E. and Lad, F. 1991. Population biology and conservation of Hector's dolphin. *Canadian Journal of Zoology* 69:1701-1707.
- Stafford, K.M. 2003. Two types of blue whale calls recorded in the Gulf of Alaska. *Marine Mammal Science* 19(4):682-693.
- Taylor, B.L. y T. Gerrodette. 1993. The Uses of Statistical Power in Conservation Biology: The Vaquita and Northern Spotted Owl. *Conservation Biology* 7:489-500.
- Tregenza, N.J.C. 2006. T-POD sensitivity at sea. Proceedings of the European Cetacean Society, Gdynia, Poland. Special Issue, 46: 29-32. 20th Annual Meeting, April 2006.
- Turvey, S.T., R. L. Pitman, B.L. Taylor, J. Barlow, T. Akamatsu, L. A. Barrett, X. Zhao, R.R. Reeves, B.S. Stewart, K. Wang, Z. Wei, X. Zhang, L.T. Pusser, M. Richlen, J.R. Brandon y D. Wang. 2007. First human-caused extinction of a cetacean species? *Biology Letters* 3(5):537-540. DOI - 10.1098/rsbl.2007.0292.
- Urick, R.J. 1983. *Principles of Underwater Sound*. McGraw Hill, Baskerville, New York. 423 pp.
- Van Parijs, S.M., G.D. Hastie y P.M. Thompson. 1999. A design for a two-dimensional boat-bound hydrophone array for studying harbor seals, *Phoca vitulina*. *Marine Mammal Science* 16(2):481-488.
- Van Parijs, S.M., J. Smith y P.J. Corkeron. 2002. Sound and dolphin abundance Using calls to estimate the abundance of inshore dolphins: a case study with Pacific humpback dolphins *Sousa chinensis*. *Journal of Applied Ecology* 39:853-864.
- Vidal, O., A. Aguayo, L. Findley, A. Robles, L. Bourillón, I. Vomend, P. Turk, K. Gárate, L. Maronas y J. Rosas. 1987. Avistamientos de mamíferos marinos durante el crucero "Guaymas I" en la región superior del Golfo de California, primavera de 1984. 7-35 In: Memorias de la X Reunión Internacional sobre Mamíferos Marinos. Marzo 1985. Secretaría de Pesca, México, D.F.
- Vidal, O. 1995. Population Biology and Incidental Mortality of the Vaquita, *Phocoena sinus*. pp. 247-272 In: Bjørge, A. y G.P. Donovan (Eds.) *Biology of the Phocoenids*. International Whaling Commission, Cambridge, U.K. 552 pp.
- Villa-Ramirez, B. 1976. Report on the status of *Phocoena sinus*, Norris and McFarland 1958, in the Gulf of California. *Anales de Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México (Serie Zoología)* 47(2):203-207.

- Villa-Ramirez, B. 1978. Especies mexicanas de vertebrados silvestres raras o en peligro de extinción. *Anales de Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México (Serie Zoología)* 49(1):303-319.
- Wade, P.R. 1998. Calculating Limits to the Allowable Human-Caused Mortality of Cetaceans and Pinnipeds. *Marine Mammal Science* 14:1-37.
- Wells, R.S., B.G. Würsig y K.S. Norris. 1981. A survey of the marine mammals of the upper Gulf of California, Mexico, with an assessment of the status of *Phocoena sinus*. Final Report MMC-79/07 (MM1300958-0) to U.S. Marine Mammal Commission, Washington D.C., U.S.A. U.S. National Technical Information Service, Document PB81-167892 (PB81-168791) (PB181-168792) (PB81-168792) (2881-168791). 51 pp. Washington, D.C.
- White, G.C. y R.E. Bennetts. 1996. Analysis of Frequency Count Data Using the Negative Binomial Distribution. *Ecology* 77(8):2549-2557.
- Woodley, T.H. y A.J. Read. 1991. Potential rates of increase of a harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) population subjected to incidental mortality in commercial fisheries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48:2429-2435.
- Zar, J.H. 1984. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall Inc., New Jersey. 718 pp.

Apéndice A

Datos de esfuerzo de detección acústica y tasa de encuentro acústico durante los cruceros efectuados entre 1997 a 2007 bajo el diseño de estaciones fijas. El crucero se nombra como año-mes en que se efectuó. Las características de las embarcaciones usadas se describen en el texto del Capítulo II. A las estaciones se les número en orden cronológico. La latitud y longitud se da en grados decimales. Los estratos se definen en la Figura 4. El esfuerzo se da en horas y los encuentros se refieren al número de veces que se detectaron vaquitas en cada estación de muestreo. La tasa se refiere a la tasa de detección acústica en número de encuentros por hora.

Crucero	Embarcación	Estación	Latitud	Longitud	Estrato	Fecha y hora de inicio	Esfuerzo	Encuentros	Tasa
1997-04	Panga	1	31.09283	-114.72317	5	1997/04/26 08:03:16	9.63	4	0.415
		2	31.09550	-114.72900	5	1997/04/27 08:24:41	5.39	1	0.186
		3	31.09517	-114.72967	5	1997/04/28 11:11:39	5.44	1	0.184
		4	31.09567	-114.73033	3	1997/04/29 09:54:31	7.65	1	0.131
		5	31.09567	-114.72867	5	1997/04/30 07:28:15	2.43	1	0.412
2001-06	Pasaporte	1	31.12555	-114.75110	3	2001/06/06 13:53:02	3.48		
		2	31.38487	-114.74970	3	2001/06/06 21:19:13	4.98		
		3	31.38003	-114.49240	4	2001/06/07 05:34:45	4.69		
		4	31.13300	-114.25740	6	2001/06/07 15:34:00	3.01		
		5	31.11785	-114.50280	5	2001/06/07 21:43:43	5.38	1	0.186
		6	31.11539	-114.58280	5	2001/06/08 06:02:44	6.09	4	0.657
		7	30.83152	-114.49870	5	2001/06/09 21:35:20	4.85		
		8	31.11415	-114.41870	6	2001/06/10 06:28:24	4.54		
		9	31.41703	-114.41690	4	2001/06/10 14:39:13	4.45		
		10	31.50125	-114.58260	4	2001/06/10 22:10:41	3.21		
		11	31.24165	-114.49730	4	2001/06/11 07:16:33	4.59		
		12	31.09037	-114.50980	5	2001/06/11 15:17:49	4.54		
		13	30.99908	-114.49940	5	2001/06/11 22:18:01	4.70		

2001-09	Pasaporte	14	31.24898	-114.66770	3	2001/06/12 07:09:42	3.75	3	0.791
		15	31.08248	-114.72260	5	2001/06/12 13:04:39	3.79		
		1	31.33317	-113.99970	6	2001/09/08 19:51:20	19.85		
		2	31.53352	-114.46710	4	2001/09/09 22:23:38	20.46		
		3	31.46702	-114.78430	1	2001/09/10 23:47:32	21.35		
2001-12	Pasaporte	4	31.24955	-114.66640	3	2001/09/12 00:13:00	16.06		
		1	31.41813	-113.83230	6	2001/12/10 21:14:03	31.43		
		2	31.56342	-114.36660	4	2001/12/12 11:52:32	18.51		
		3	31.65180	-114.73540	1	2001/12/13 14:45:47	14.26		
		4	31.20263	-114.76110	3	2001/12/14 18:26:08	4.44		
2002-03	Pasaporte	5	30.99848	-114.58130	5	2001/12/17 05:25:58	16.11		
		1	31.30635	-114.68150	3	2002/02/28 16:10:21	15.36		
		2	31.08417	-114.66670	5	2002/03/07 19:14:00	10.96		
		3	31.60283	-114.63100	1	2002/03/08 12:51:18	17.60		
		4	31.10067	-114.46130	6	2002/03/09 14:37:41	17.82		
2002-05	Pasaporte	5	30.66600	-114.53320	5	2002/03/10 16:30:13	19.53		
		6	31.04967	-114.71650	5	2002/03/11 17:47:40	17.01		
		1	31.35033	-114.39970	4	2002/05/23 17:24:26	19.42		
		2	31.46667	-114.64970	3	2002/05/24 15:41:45	18.53		
		3	31.08317	-114.61670	5	2002/05/25 15:55:47	19.25		
		4	31.34500	-114.13820	6	2002/05/26 22:33:18	12.62		
		5	31.45033	-114.46750	4	2002/05/27 13:47:59	22.08		
		6	31.28433	-114.71780	3	2002/05/28 15:02:53	20.84		
		7	31.64633	-114.67350	1	2002/05/29 15:21:53	19.61		
		8	31.16717	-114.80080	3	2002/05/30 16:55:01	12.40		
2003-03	José Andrés	1	31.08417	-114.66100	5	2003/03/30 09:23:24	34.67	12	0.346

2003-03		2	31.30150	-114.66330	3	2003/04/01 07:54:08	9.17	1	0.109
2003-03		3	31.05433	-114.71070	5	2003/04/02 07:07:37	16.57		
2003-03		4	31.05000	-114.72200	5	2003/04/03 16:15:20	3.12	2	0.641
2003-03		5	31.08383	-114.66620	5	2003/04/04 06:04:35	10.70	5	0.467
2003-10	Panga	1	31.10604	-114.64959	5	2003/10/30 12:54:45	1.11		
2004-04	Oviedo III	1	31.06850	-114.71230	5	2004/04/15 06:38:36	3.93		
		2	31.10767	-114.62070	5	2004/04/15 11:26:23	4.98		
2005-07	Koipai Yú-Xá	1	31.11419	-114.63336	5	2005/07/11 20:01:44	19.13	6	0.314
		2	30.83538	-114.52020	5	2005/07/15 15:11:18	10.56		
		3	31.29655	-114.68430	3	2005/07/17 13:41:08	6.17		
2006-05	Koipai Yú-Xá	1	30.85437	-114.59510	5	2006/05/01 21:57:54	12.07		
		2	31.11942	-114.63110	5	2006/05/05 12:30:41	25.26	2	0.079
2007-02	Koipai Yú-Xá	1	31.12765	-114.62830	5	2007/02/27 11:57:52	12.04		
		2	31.11930	-114.64810	5	2007/03/01 10:34:03	21.65		
		3	31.24553	-114.77040	3	2007/03/05 10:09:17	22.82		
		4	30.86761	-114.63190	5	2007/03/07 07:12:43	10.67		
		5	31.47710	-114.31450	4	2007/03/07 23:04:36	11.83		
2007-04	Koipai Yú-Xá	1	31.11207	-114.63030	5	2007/04/20 11:12:45	9.41	5	0.532
		2	31.10970	-114.65500	5	2007/04/21 08:44:40	21.54	3	0.139
		3	30.88375	-114.58280	5	2007/04/22 10:24:35	5.62		
		4	31.31143	-114.71460	3	2007/04/24 08:37:53	23.77		
		5	31.55625	-114.73430	1	2007/04/25 16:31:19	11.96		
		6	31.55103	-114.57350	4	2007/04/26 06:45:21	11.83		
		7	31.45858	-114.44640	4	2007/04/26 20:11:21	5.53		

Apéndice B
Datos sobre capturas anuales de totoaba (toneladas) y número de pangas
operativas por año, usados en el modelo poblacional del Capítulo III

Año	Totoaba	Pangas	Año	Totoaba	Pangas
1920	0	0	1965	827	0
1921	0	0	1966	1145	0
1922	0	0	1967	845	0
1923	0	0	1968	775	0
1924	0	0	1969	485	0
1925	0	0	1970	471	0
1926	0	0	1971	210	0
1927	0	0	1972	242	0
1928	0	0	1973	146	0
1929	0	0	1974	120	0
1930	0	0	1975	59	0
1931	0	0	1976	100	0
1932	0	0	1977	100	0
1933	0	0	1978	100	0
1934	0	0	1979	100	0
1935	0	0	1980	100	400
1936	0	0	1981	100	408
1937	0	0	1982	100	415
1938	0	0	1983	100	423
1939	0	0	1984	100	431
1940	0	0	1985	100	438
1941	1451	0	1986	100	446
1942	2261	0	1987	100	454
1943	2044	0	1988	100	462
1944	2007	0	1989	100	469
1945	1693	0	1990	100	477
1946	1582	0	1991	100	485
1947	1047	0	1992	100	492
1948	966	0	1993	100	500
1949	883	0	1994	100	571
1950	687	0	1995	100	643
1951	607	0	1996	100	714
1952	480	0	1997	100	786
1953	486	0	1998	100	857
1954	659	0	1999	100	929
1955	526	0	2000	0	1000
1956	436	0	2001	0	1000
1957	287	0	2002	0	1000
1958	280	0	2003	0	1000
1959	356	0	2004	0	1000
1960	731	0	2005	0	1000
1961	719	0	2006	0	1000
1962	1066	0	2007	0	1000
1963	999	0			
1964	598	0			

Apéndice C

Código escrito en ADMB para ensamblar y correr el modelo del Capítulo III

```
DATA_SECTION
//número de años con datos
  init_int n
  //matriz con kilos de captura de totoaba y número de pangas registradas
init_matrix Data(1920,2007,1,2)
  //vectores para almacenar los datos de la matriz original
  vector Cap_Totoaba(1920,2007)
  vector Reg_Boats(1920,2007)
  //contadores para loops
  int a
  int b
  int c
INITIALIZATION_SECTION
  K 8.00636756765025
  rmax -3.2188758248682
  Shape 0.0
  qT -10.0
  qO -10.0
PARAMETER_SECTION
  init_bounded_number K(6.21460809842219,9.61580548008435)
  init_bounded_number rmax(-6.90775527898214,-1.6094379124341)
  init_bounded_number Shape(-6.90775527898214,1.6094379124341,-1)
  init_bounded_number qT(-23.0258509299405,-7.82404601085629)
  init_bounded_number qO(-23.0258509299405,-7.13089883029635)
  sdreport_number KK
  //para la abundancia estimada entre 1920 y 2007
  vector Nt(1920,2007)
  vector Nrec(2007,2200)
  //para el número de vaquitas muertas por año (totoaba, otras, total)
  vector VT(1921,2007)
  vector VO(1921,2007)
  vector VTot(1921,2007)
  number Prop
  number PropCre
  objective_function_value f
PRELIMINARY_CALC_SECTION
  Cap_Totoaba=column(Data,1);
  Reg_Boats=column(Data,2);
PROCEDURE_SECTION
  //se supone que en este año la población estaba en equilibrio alrededor de K
  Nt(1920) = exp(K);
  KK=K;
  for(a=1921;a<=2007;a++)
  {
    //calcula la mortalidad para el año en cada una de los dos factores pesqueros
    //en totoaba se multiplica por mil a las capturas para obtener Kg
    VT(a)=Cap_Totoaba(a)*Nt(a-1)*exp(qT);
    VO(a)=Reg_Boats(a)*Nt(a-1)*exp(qO);
    VTot(a)=VT(a)+VO(a);
```

```

//progreso logístico de la población con denso-dependencia
//menos el número de vaquitas capturadas en pesquerías
Nt(a)=Nt(a-1)+((Nt(a-1)*exp(rmax)*(1-pow(Nt(a-1)/exp(K),exp(Shape)))))-
VTot(a);

//para evitar que la abundancia tome valores negativos y forzar su valor a cero
if(Nt(a)<0.0) Nt(a)=0.0;

}

//cálculo de la función objetivo
//prior para K
f+=log(exp(K)*0.554513029376191*sqrt(2.0*3.1415927))+(square(K-
8.36345084154226)/(2.0*sqrt(0.554513029376191)));
//prior para rmax
f+=log(exp(rmax)*0.789434881643359*sqrt(2.0*3.1415927))+(square(rmax+3.3073359897316
2)/(2.0*sqrt(0.789434881643359)));
//verosimilitudes
//para el número de vaquitas capturadas en 1993 por las otras pesquerias
f+=log(VO(1993)*0.293560379208524*sqrt(2.0*3.1415927))+(square(log(VO(1993))-
4.31361997856907)/(2.0*sqrt(0.293560379208524)));
//para el número de vaquitas capturadas en 1985 por la pesqueria de totoaba
f+=log(VT(1985)*0.293560379208524*sqrt(2.0*3.1415927))+(square(log(VT(1985))-
2.30767995185141)/(2.0*sqrt(0.293560379208524)));
//para la abundancia en 1997
f+=log(Nt(1997)*0.62767545455221*sqrt(2.0*3.1415927))+(square(log(Nt(1997))-
6.14337106560409)/(2.0*sqrt(0.62767545455221)));
//Proporcion desde acustica
Prop=(Nt(2007)-Nt(1997))/Nt(1997);
f+=log(0.656964364217862*sqrt(2.0*3.1415927))+(square(Prop+0.581384393113152)/(2.0*sq
are(0.656964364217862)));

if(mceval_phase())
{
Nrec(2007)=Nt(2007);
PropCre=Nrec(2007)/exp(K);
a=2007;
while(PropCre<0.5 && a<=2200)
{
a++;
Nrec(a)=Nrec(a-1)+((Nrec(a-1)*exp(rmax)*(1-pow(Nrec(a-
1)/exp(K),exp(Shape)))));
PropCre=Nrec(a)/exp(K);
}
}

cout << f << " " << Nt(1997) << " " << VT(1985) << " " << VO(1993) << " " << Prop << endl;

```

Apéndice D

Medidas de tendencia central y dispersión de los parámetros del modelo y parámetros derivados del Capítulo III

Parámetro	Promedio	Primer momento	Mediana	Desviación estándar	Raíz cuadrada segundo Momento	Mínimo	Máximo	Intervalo de credibilidad al 95%		Intervalo de credibilidad al 90%		Intervalo de credibilidad al 80%	
								Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
<i>K</i>	5355	5355	5015	2192.2	2192.8	730	14997	2088	10697	2417	9513	2865	8276
<i>K (burn-in)</i>	5354	5354	5014	2192.1	2192.7	745	14997	2088	10699	2417	9512	2864	8276
<i>r max</i>	0.04028	0.04028	0.03270	0.02937	0.02937	0.00100	0.20000	0.00617	0.11743	0.00811	0.09864	0.01116	0.07963
<i>Shape (z)</i>	1.0												
<i>qT</i>	6.229×10^{-5}	6.229×10^{-5}	5.648×10^{-5}	2.788×10^{-5}	2.791×10^{-5}	6.717×10^{-6}	3.506×10^{-4}	2.668×10^{-5}	1.335×10^{-4}	3.013×10^{-5}	1.141×10^{-4}	3.464×10^{-5}	9.610×10^{-5}
<i>qR</i>	1.946×10^{-4}	1.946×10^{-4}	1.846×10^{-4}	7.836×10^{-5}	7.841×10^{-5}	1.164×10^{-6}	7.748×10^{-4}	7.177×10^{-5}	3.845×10^{-4}	8.457×10^{-5}	3.385×10^{-4}	1.017×10^{-4}	3.010×10^{-4}
<i>N₂₀₀₇</i>	175	179	93	231.6	229.3	0	6182	3	821	6	620	12	436
<i>N₂₀₀₇ / K</i>	0.04219	0.04275	0.01880	0.06344	0.06315	0.00000	0.89114	0.00051	0.22706	0.00097	0.16467	0.00199	0.10947