

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Doctorado en Ciencias
en Ciencias de la Vida con
orientación en Biología Ambiental**

**Evaluación de la afectación de algunas variables
físicas y biológicas en el proceso de detección
acústica de vaquita (*Phocoena sinus*)**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Doctor en Ciencias

Presenta:

Gustavo Cárdenas Hinojosa

Ensenada, Baja California, México
2020

Tesis defendida por

Gustavo Cárdenas Hinojosa

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Horacio Jesús De la Cueva Salcedo
Codirector de tesis

Dr. Armando Martín Jaramillo Legorreta
Codirector de tesis

Miembros del Comité

Dr. Tim Gerrodette

Dr. Ernesto García Mendoza

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo



Dra. Patricia Juárez Camacho
Coordinadora del Posgrado en Ciencias de la Vida

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Gustavo Cárdenas Hinojosa © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Gustavo Cárdenas Hinojosa** como requisito parcial para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Ciencias de la Vida con orientación en Biología Ambiental.

Evaluación de la afectación de algunas variables físicas y biológicas en el proceso de detección acústica de vaquita (*Phocoena sinus*)

Resumen aprobado por:

Dr. Horacio Jesús De la Cueva Salcedo
Codirector de tesis

Dr. Armando Martín Jaramillo Legorreta
Codirector de tesis

La vaquita (*Phocoena sinus*) es una marsopa endémica del Alto Golfo de California y es el mamífero marino en mayor peligro de extinción en el mundo. La principal amenaza para su sobrevivencia es la captura incidental en redes de enmalle. De 2008 a 2019 el Gobierno de México ha invertido un nivel sin precedentes de financiación y esfuerzo para evitar su extinción. Las acciones de conservación han abarcado estrategias para evitar su captura incidental, como vigilancia de actividades ilegales, establecimiento de áreas de prohibición de uso de redes y remoción de redes. Una parte fundamental del plan de recuperación fue la implementación de un programa de monitorización acústica que permitiera indicar la tendencia de la población de vaquita para conocer si los esfuerzos de conservación fueron efectivos. El programa consiste en una red de muestreo con detectores acústicos colocados dentro del Refugio de la Vaquita para grabar sus series de chasquidos de ecolocación y con esta información estimar la tasa de encuentro acústico de vaquita. Aún no se han evaluado todas las variables que pudieran sesgar la tasa de encuentro acústico si no se manejan y modelan de forma adecuada. En este estudio usamos los datos de las temporadas de muestreo de 2011 a 2015 con el objetivo de evaluar la afectación potencial de algunas variables oceanográficas, antropogénicas y biológicas en la detección acústica de vaquita. Para esto se caracterizaron las firmas acústicas que producen los delfines, se identificaron estos eventos en los datos del programa, se caracterizó la distribución de la actividad acústica de los delfines y se analizó las variables que están relacionadas con la detección acústica de vaquita. El modelo final de la ocurrencia acústica de vaquita arrojó como variables predictoras a la interacción de las variables sitios y temporada de muestreo, más la variable presencia de delfines. Por ello, se analizó la interacción espacial y temporal entre delfines y vaquitas durante el periodo de estudio. Dada la función de los chasquidos de ecolocación en los delfines y vaquitas, se infiere que la actividad acústica documentada en los patrones temporales y espaciales de estos cetáceos esta relacionada con la disponibilidad de presas y a que los delfines cambian el comportamiento acústico de vaquita y/o las alejan del sitio de muestreo. Por esta razón, probablemente los patrones de vaquita y de delfines mostraron poco traslape a pesar de tener presas similares y fueron constantes en las temporadas de muestreo. Aunado a esto, la variable temporada de muestreo se considera que fue predictora también por que la tasa de detección acústica de vaquita declinó drásticamente en promedio un 39% cada temporada. Se concluye también que la variable presencia de delfines no debe incluirse como covariable para disminuir el sesgo potencial ocasionado por esta variable en las futuras estimaciones de la tendencia de la población de la vaquita. Finalmente, los resultados pueden contribuir al manejo y protección de las poblaciones de delfines ya que se encuentran clasificados en la NOM-059 como “protección especial”.

Palabras clave: vaquita, monitoreo acústico pasivo, delfines, distribución, y Alto Golfo de California.

Abstract of the thesis presented by **Gustavo Cárdenas Hinojosa** as a partial requirement to obtain the Doctor of Science degree in Life Sciences with orientation in Environmental Biology

Evaluation of the affectation of some physical and biological variables in the acoustic detection process of vaquita (*Phocoena sinus*)

Abstract approved by:

Dr. Horacio Jesús De la Cueva Salcedo
Codirector de tesis

Dr. Armando Martín Jaramillo Legorreta
Codirector de tesis

The vaquita (*Phocoena sinus*) is an endemic porpoise to the Upper Gulf of California and is the most endangered marine mammal in the world. Bycatch in gillnets is the main threat of vaquita. From 2008 to 2019, the Government of Mexico has invested an unprecedented level of funding and effort to prevent its extinction. Conservation actions have included strategies to reduce and eliminate bycatch, such as surveillance of illegal activities, the establishment of areas banning the use of gillnets, removal of gillnets, etc. A key part of the vaquita recovery plans was the implementation of an acoustic monitoring program to estimate the population trend of vaquita to know if the conservation efforts have been effective. The program consists of a sampling mesh with autonomous acoustic loggers inside the Vaquita Refuge to record echolocation click trains to be able to estimate the acoustic encounter rate of the vaquita. Not all the variables have been evaluated yet to analyze potential bias in the acoustic detection of the vaquita. In this study, we analyzed data from the sampling seasons 2011 to 2015 collected during summers to evaluate the potential impact of some oceanographic, anthropogenic, and biological variables in the acoustic detection of vaquita. To achieve this goal, it was needed to characterize the acoustic signatures produced by the dolphins, identify these events in the database, characterize the distribution of the acoustic activity of the dolphins, and study the variables that are related to the acoustic detection of the vaquita. The final model of the acoustic occurrence of vaquita included as predictor variables the interaction of the sites and sampling season variables, plus the presence of dolphins. Therefore, the spatial and temporal interaction between dolphins and vaquitas was analyzed during the study period. Given the role of echolocation clicks in dolphins and vaquitas, the most likely explanations for the acoustic echolocation activity found in the temporal and spatial patterns of these cetaceans could be related to prey availability, and that the presence of dolphins potentially could change the acoustic behavior of vaquita or move away from the sampling site. For this reason, the vaquita and dolphin patterns probably showed little overlap despite having similar prey, and the patterns were constant in the sampling seasons. Moreover, the sampling season variable was predictive also because the vaquita's acoustic detection rate declined drastically by an average of 39% each season. It is also concluded that the variable presence of dolphins is not needed to be included as a covariate to reduce the potential bias in future estimates of the trend of the vaquita population. Finally, the results may also contribute to the management and protection of dolphin populations, as they are classified in NOM-059 as "special protection".

Keywords: vaquita, passive acoustic monitoring, dolphins, distribution, and Upper Gulf of California.

Dedicatoria

A mi esposa y amor de mi vida: Diana. Tu apoyo y comprensión durante el desarrollo de la tesis fueron clave para poder culminarla. Pasamos tiempos duros, pero al fin lo logramos. ¡Este logro es de los dos!

A mis tremendos amores: Ángel André y Said. Mi inspiración para lograr más cosas y ser mejor. Junto con su mami son lo más importante en mi vida ¡Los amo!

A mi papá y mi mamá (†): Lo que he logrado es gracias a sus enseñanzas y ejemplo de vida. ¡Los amo!

A mis amigos, ex compañeros de trabajo de campo y de lucha por la conservación de la vaquita: Juan 23, Paco Valverde y Ramón Arozamena. Los extraño y sé que estarían contentos por este logro. Es de ustedes también.

Agradecimientos

Los datos utilizados en este estudio fueron recolectados durante el programa de monitoreo acústico de la vaquita. Diferentes instituciones y agencias proporcionaron fondos durante el desarrollo y la implementación del programa de monitoreo (2009 – 2015). Se agradece a WWF-México, la Comisión de Mamíferos Marinos de EE. UU., Le Equipe Cousteau, The Ocean Foundation, Fonds de Dotation pour la Biodiversité, MAAF Assurances (Save Your Logo), WWF-US, CICESE, Opel Project Earth, Secretaría Mexicana del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y a Barbara Taylor. A la Fundación Rufford por otorgarme una subvención para coleccionar señales acústicas de delfines en el área de estudio. También se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para poder realizar el programa de doctorado en CICESE a través de la beca No. 165214. Gracias al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y al posgrado en Ciencias de la Vida por poder formar parte de su programa de doctorado.

A mi comité de tesis: Dr. Ernesto García, Dr. Rodrigo Méndez, Dr. Tim Gerrodette, Dr. Horacio De la Cueva y Dr. Armando Jaramillo. Les agradezco muchísimo sus orientaciones y sus importantes observaciones que permitieron mejorar el desarrollo de la tesis. Particularmente, agradezco a Horacio sus aportaciones y revisiones meticulosas al escrito de la tesis; y a Armando por las discusiones tan enriquecedoras que fueron clave para la investigación. Gracias Armando, Horacio y Tim por su valiosa colaboración en el desarrollo del artículo. Fue una grata experiencia.

Un especial agradecimiento a Lorenzo Rojas Bracho y Armando Jaramillo, cuyo arduo trabajo ha permitido recabar fondos para realizar el monitoreo de vaquita y conducir de manera exitosa el programa de monitoreo acústico. A Edwyna Nieto García por su valiosa ayuda en campo, en el análisis de la confirmación visual de las señales de vaquita y por apoyar en la administración del programa de monitoreo. El colaborar con el Grupo de Investigación que dirige Lorenzo Rojas es lo mejor que le pudo pasar a mi formación profesional. Aunado a eso, no tengo palabras suficientes para agradecer el compañerismo, amistad y apoyo que me brindaron los tres (Armando, Lorenzo y Edwyna) a lo largo del posgrado.

También agradezco muchísimo a mis queridos compañeros pescadores de San Felipe: Carlos Samudio, Chalunga, El Gordis, Alex, La Gata, Malacara, El Chino, Alan, etc.; así como a Paco Valverde y Ramón Arozamena (QEPD) de la CONANP; quienes colaboraron en las actividades de colocación y recuperación de los C-POD. En especial, agradezco la entrega y el interés por colaborar en un proyecto que tiene el objetivo de conservar a la vaquita. Además, les agradezco el compañerismo y amistad formada durante

tanto tiempo en San Felipe. A mi querido amigo Mauricio Nájera Caballero: además de apoyar en la coordinación de campo en San Felipe, nos ayudó en la preparación de los detectores acústicos, así como en mil cosas más que surgían en San Felipe. Querido Mau: esa combinación de tomar unas heladas y platicar mucho en San Felipe no ayudaron tanto al desarrollo de la tesis, pero siempre agradeceré tus palabras de aliento para terminarla.

Al personal del posgrado en Ciencias de la Vida y a Servicios Escolares. Siempre recordaré su amabilidad y apoyo en el desarrollo de los trámites. ¡Gracias!

A Anahí Bermúdez por ayudarme con MatLab al inicio de la tesis. ¡Gracias!

Por último, pero no menos importante, a mis suegros: María de Jesús y Luis. El apoyo para cuidarnos a niños y poder trabajar ratos para la tesis fueron clave. Nunca nos dijeron que no. ¡Mil gracias!

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	i
Resumen en inglés.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Características generales de la vaquita.....	1
1.2. Conservación de la vaquita.....	2
1.3. Abundancia de la población.....	5
1.3. Tendencia de la población con técnicas acústicas pasivas.....	6
1.3.1 Señales acústicas de vaquita.....	7
1.3.2. Técnicas acústicas pasivas.....	7
1.3.3. Programa de monitorización acústica pasiva de vaquita.....	8
1.3.4. Evaluación de variables que afectan potencialmente a la detección acústica de vaquita.....	9
1.4. Hipótesis y objetivos.....	11
1.4.1. Hipótesis.....	11
1.4.2. Objetivo general.....	11
1.4.3. Objetivos particulares.....	12
1.5. Área de estudio.....	12
Capítulo 2. Validación de las señales acústicas clasificadas como delfines por el detector acústico C-POD.	14
2.1. Introducción.....	14
2.1.1. Características del C-POD.....	14

2.1.2. Parámetros acústicos de series de chasquidos para identificar delfines con el C-POD.....	16
2.2. Objetivos	19
2.3. Métodos	19
2.3.1. Colecta de datos.....	19
2.3.2. Procesamiento de datos e identificación de los chasquidos producidos por los fenómenos que producen ruido.....	23
2.3.3. Validación de las series de chasquidos de delfines.....	25
2.4. Resultados	27
2.4.1. Datos colectados en el Programa de Monitorización Acústica de Vaquita	27
2.4.2. Características de los ruidos producidos por embarcaciones.....	28
2.4.3. Características de las series de chasquidos de delfines.....	29
2.4.4. Validación de las series de chasquidos de delfines.....	32
2.5 Discusión	33
2.5.1. Limitaciones en la detección de series de chasquidos de ecolocalización de delfines.....	33
2.5.2. Validación de series de chasquidos de delfines.....	34
Capítulo 3. Análisis espacial y temporal de la actividad acústica de delfines	36
3.1. Introducción	36
3.2. Objetivos	37
3.3. Métodos	38
3.3.1. Análisis de la distribución de la ocurrencia acústica de delfines.....	38
3.4. Resultados	40
3.4.5. Patrones circadianos	40
3.4.6. Distribución de las tasas de detección de los delfines.....	41
3.4.7. Modelo de ocurrencia acústica de delfines.....	43
3.5. Discusión	47

Capítulo 4. Evaluación de la potencial afectación en la detección acústica de vaquita ocasionada por la presencia de delfines y por otras variables	52
4.1. Introducción	52
4.2. Objetivos	53
4.3. Métodos	53
4.3.1. Análisis de la distribución espacial y temporal de la ocurrencia acústica de vaquita.....	53
4.3.2. Modelo de ocurrencia acústica de vaquitas como análisis exploratorio de las variables que se relacionan con su detección acústica.....	54
4.3.3. Análisis de las variables relacionadas a la detección de vaquitas.....	55
4.4. Resultados	56
4.4.1. Análisis de la distribución espacial y temporal de la ocurrencia acústica de vaquita.....	56
4.4.2. Modelo de ocurrencia acústica de vaquitas como análisis exploratorio de las variables que se relacionan con su detección acústica.....	57
4.4.3. Análisis de las variables relacionadas a la detección de vaquitas.....	61
4.5. Discusión	65
4.5.1. Evaluación de variables que afectan potencialmente a la detección acústica de vaquita.	65
4.5.2. Distribución espacial y temporal de la actividad acústica de vaquita.....	69
4.5.3. Distribución de la vaquita relacionada a la interacción con delfines.....	71
 Capítulo 5. Conclusiones	 74
 Literatura citada	 75
 Anexos	 84

Lista de figuras

Figura	Página
1	Mapa del Alto y Norte del Alto Golfo de California, donde se muestra el polígono del Refugio de la vaquita..... 12
2	Detector acústico tipo C-POD..... 13
3	Ejemplo de algunas características acústicas de las series de chasquidos de vaquita visualizadas con el software del CPOD. En la imagen superior se muestra el rango de la frecuencia (kHz) y en el inferior la duración (número de ciclos) de los chasquidos.... 15
4	Refugio de la Vaquita y sitios de muestreo. El polígono del Refugio esta trazado con línea discontinua. Los 48 sitios en el interior del Refugio están señalados con círculos. Las boyas del polígono están señaladas con cuadrados. Tomado de Jaramillo-Legorreta <i>et al.</i> (2011)..... 19
5	Arreglo de tres C-POD colocados a diferentes profundidades. El peso muerto sirvió para que el arreglo no lo movieran las corrientes del mar y la boya en superficie del mar sirvió para ubicar el arreglo. Un arreglo similar, pero sin el peso muerto, se colocó en la superficie del mar para registrar las señales acústicas de los delfines..... 21
6	Distribución de la moda de la frecuencia (kHz) de las series de chasquidos de delfines. En el eje x se muestran los rangos de la moda y en el eje y su frecuencia en las series de chasquidos..... 24
7	Diagrama del algoritmo que se aplicó para determinar si una serie de chasquidos fue clasificada correctamente como delfines por el algoritmo KERNO..... 26
8	Diagrama de una serie de chasquidos de delfín donde se muestran los chasquidos, el intervalo entre chasquidos y su duración. Modificado de Philpott y colaboradores (2007)..... 30
9	Chasquidos de los delfines registrados por hora del día durante el periodo de estudio. El cuadro azul indica la media y el triángulo rojo la mediana. La figura inferior muestra en el eje y los datos con un rango de 0 a 20 chasquidos y la superior los muestra con un rango de eje y de 20 a 8,000 chasquidos..... 39
10	Tasas de detección de chasquidos de ecolocación de delfines obtenidas durante las temporadas de muestreo. El tamaño de los círculos indica los días de muestreo de grabación obtenidos por los detectores acústicos por sitio de muestreo y cuando el anclaje o el C-POD fue perdido por actividades ilegales de pesca o por vandalismo. El rango de colores indica las tasas de detección acústica por día..... 41
11	Valores de coeficiente de correlación de Pearson entre las variables predictoras. El eje de la y muestra una paleta de colores en los que se indica el valor del coeficiente.. 42

12	Distribución espacial de la ocurrencia acústica de los delfines en el Refugio de la Vaquita durante 2011 a 2015. El color de los círculos indica el rango de los valores de las tasas de predicción de chasquidos de delfines por día.....	44
13	Tasas de predicción de chasquidos de delfines por condición del día (día y noche) y por velocidad vertical de la de la marea (alta, moderada y baja) obtenidas con el modelo final.....	47
14	Patrones circadianos de la actividad acústica de vaquita y de los delfines. Se muestran los promedios de chasquidos de este par de cetáceos obtenidos durante cada hora del día.....	59
15	Comparación de la distribución predicha de la actividad acústica de vaquita en temporadas de muestreo 2011 a 2015. En la figura de la izquierda se presentan resultados obtenidos con GLM y la de la derecha con un modelo espacial (Jaramillo-Legorreta <i>et al.</i> , 2017).....	61
16	Promedio de chasquidos de vaquitas y delfines por temporada de muestreo.....	64
17	Promedio de chasquidos de vaquita por sitio de muestreo durante las temporadas de muestreo 2011 a 2015.....	65
18	Chasquidos de vaquita y de delfines por sitio de muestreo para la temporada 2013.....	66

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Características de las series de chasquidos para los delfines tursiones del Atlántico, delfín común de rostro corto y delfín de Risso registradas al mismo tiempo de avistamientos realizados a menos de un 1 km de distancia del sitio del C-POD. Todos los valores son promedios y en paréntesis están sus desviaciones estándar. Tomada de Robbins <i>et al.</i> (2015).....	17
2 Resumen del esfuerzo y de los datos acústicos de delfines, vaquitas y de ecosondas registrados durante el 19 de junio al 19 de agosto durante las temporadas de muestreo de 2011 a 2015.....	27
3 Resumen de datos usados para obtener las características acústicas de las series de chasquidos de los delfines.....	28
4 Parámetros acústicos de tursiones y delfín común de rostro largo basado en las series de chasquidos colectados <i>in situ</i> en el Alto Golfo de California. Todos los valores son la media y en paréntesis se muestra la desviación estándar.....	30
5 Descripción y tipo de variables usadas para analizar la ocurrencia acústica de los delfines en el Refugio de la Vaquita.....	37
6 Combinación de fórmulas de las variables de los modelos lineales generalizados para el conteo de los chasquidos de ecolocación de delfines. Se muestra el valor AIC para cada modelo. Las interacciones entre las variables predictoras se representan con una “x”.....	44
7 Registro de cetáceos capturados de manera incidental en redes de enmalle en el Refugio de la Vaquita y en la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. La lista solo incluye registros de animales con el arte de pesca enredada aún en el cuerpo o animales con las extremidades mutiladas.....	49
8 Combinación de fórmulas de las variables de los modelos lineales generalizados para el conteo de los chasquidos de ecolocación de vaquitas. Se muestra el valor de AIC para cada modelo y las interacciones entre las variables de los modelos se representan con una “x”.....	59
9 Estimación de los coeficientes de las variables de los mejores modelos para predecir el conteo de chasquidos de vaquitas y de delfines. Se muestra el error estándar y el valor de significancia de cada variable (** $p < 0.05$, *** $p < 0.001$). Con un asterisco * se indican las interacciones entre las variables de los modelos. Se explican también la varianza explicada por cada modelo.....	60

10	Esfuerzo y chasquidos de delfines recolectados por sitio de muestreo durante los veranos de 2011 a 2015.....	84
11	Combinación de las 26 fórmulas de las variables de los modelos lineales generalizados para el conteo de los chasquidos de ecolocación de delfines. Se muestra el valor AIC para cada modelo. Las interacciones entre las variables predictoras se representan con una “*” .	86

Capítulo 1. Introducción

1.1. Características generales de la vaquita.

La vaquita, *Phocoena sinus*, es un cetáceo de la familia de las marsopas (Odontoceti: Phocoenidae). Esta especie fue descrita por Norris y MacFarland en 1958 usando material óseo. La mayoría de la información sobre la dieta, ciclo de vida, parámetros de vida, mortalidad y genética ha sido obtenida a partir de individuos capturados en redes o encontrados varados en playas. La longitud promedio de las hembras es de 140.6 cm y la de los machos es de 134.9 (Hohn *et al.*, 1996). Estas medidas hacen de la vaquita la más pequeña de las marsopas y también de todos los cetáceos. Los machos tienen la aleta dorsal más grande y la aleta caudal relativamente más ancha (Torre *et al.*, 2014). En el patrón de pigmentación, su característica más distintiva son los parches negros alrededor de los ojos y de los labios (Brownell *et al.*, 1987).

Se había determinado que las hembras no ovulan en años consecutivos, de tal forma que una hembra es capaz de engendrar una cría cada dos años como máximo (Hohn *et al.*, 1996). Las hembras de la marsopa común (*Phocoena phocoena*), ovulan anualmente y su fecundidad es cercana a una cría por año, se ha estimado que su tasa de crecimiento poblacional máxima es de aproximadamente 4% anual (Woodley y Read, 1991). Basado en lo anterior, Hohn *et al.* (1996), infirieron que probablemente la tasa de incremento poblacional de la vaquita debe ser menor a la de la marsopa común. Sin embargo, en un estudio reciente sobre foto-identificación de vaquita se pudo inferir que algunas hembras de vaquita pueden llegar a producir una cría por año al igual que la marsopa común (Taylor *et al.*, 2019).

La vaquita se distribuye en un área de aproximadamente 4,000 km², principalmente hacia la costa occidental del Alto Golfo de California (Rojas-Bracho *et al.*, 2006). Tiene una preferencia por habitar las aguas más turbias de la región con una profundidad de 20 a 40 m. *P. sinus* es endémica del Golfo de California y su distribución actual e histórica es una de las más restringidas de todos los cetáceos del mundo (Rojas-Bracho y Jaramillo-Legorreta, 2002).

1.2. Conservación de la vaquita.

Desde su descripción como especie, se señaló el riesgo que las redes de pesca representaban para la vaquita (Norris y Prescott, 1961). Entre 1993 y 1994 se documentó la muerte incidental de 128 vaquitas ocasionada en un 65% por la pesquería de totoaba (Vidal, 1995). En 1993-94 se hizo la primera estimación de muertes incidentales en redes agalleras (D'Agrosa *et al.*, 2000). Los autores concluyeron que la mortalidad fue de al menos 39 vaquitas ese año solamente para la flota ribereña del El Golfo de Santa Clara, Sonora.

Dado que el principal factor de riesgo ha seguido operando en el Alto Golfo de California, la vaquita está considerada la especie de cetáceo en mayor peligro de extinción en el mundo, después de que baiji (*Lipotes vexilifer*) fuera declarado funcionalmente extinto (Turvey *et al.*, 2007). Está clasificada dentro las categorías más críticas de las especies amenazadas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 1996), por la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, 1997), por la Ley de Especies en Peligro del Gobierno de E.U.A. (ESA, 1985) y en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF, 2010).

De acuerdo a Rojas-Bracho *et al.* (2006), una acción clave en la conservación de la vaquita fue la creación en 1997 del Comité Internacional para la Recuperación de la Vaquita (CIRVA). El mandato de este grupo es proponer un plan de recuperación basado en la mejor evidencia científica disponible. Ya han ocurrido once reuniones del CIRVA y en ellas han coincidido sus miembros en recomendar que la mortalidad incidental de vaquita tiene ser cero tan pronto como sea posible, en que se tienen que eliminar las redes de enmalle, en desarrollar artes de pesca alternativas que no capturen vaquitas, en desarrollar alternativas socioeconómicas para los pescadores y en que haya una aplicación efectiva de la ley, entre otras recomendaciones.

Por las recomendaciones del CIRVA, desde el año 2005 el Gobierno Mexicano ha implementado estrategias para la recuperación de la especie. En ese año se acordó el Área de Refugio para la Protección de la Vaquita (de aquí en adelante, Refugio), donde se prohíbe el uso de artes de pesca que capturan incidentalmente a vaquitas (DOF, 2005). A partir de 2008 a la fecha, el Gobierno de México ha dedicado un nivel sin precedentes de financiación y esfuerzo para ayudar a revertir el declive tan drástico de la población de *P. sinus* como en el Programa de Acción para la Conservación de la Especie: Vaquita (PACE-Vaquita). En el marco de este programa, se tomaron en cuenta algunas de las recomendaciones del CIRVA y se implementaron varias estrategias para reducir y eliminar el principal factor de riesgo, las redes de enmalle,

para la sobrevivencia de la vaquita en su hábitat (SEMARNAT, 2008). Una parte fundamental del plan de recuperación del PACE-Vaquita fue la implementación de un programa de monitorización acústica, que permitiera indicar la tendencia de la población de vaquita con el fin de conocer si las estrategias de conservación han sido efectivas o si es necesario ajustarlas para lograr la recuperación de la especie (SEMARNAT, 2008).

A pesar de los esfuerzos de conservación, en la 5ª Reunión del CIRVA realizada en 2014 se presentaron los resultados de 2011 a 2013 del programa de monitorización acústica. Ellos mostraron que la tasa de encuentro acústico de vaquita estaba disminuyendo 18.5% anualmente (CIRVA, 2014). Por lo tanto, el CIRVA determinó que a pesar de todos los esfuerzos llevados a cabo, la población de vaquita estaba notablemente disminuida y recomendó regulaciones de emergencia como el establecimiento de una zona de exclusión de redes agalleras (CIRVA, 2014). En efecto de lo anterior, el Gobierno de México acordó una suspensión temporal durante abril 2015 a abril 2016 de la pesca comercial mediante el uso de redes de enmalle, cimbras y palangres, en la zona de distribución de la vaquita, como medida que contribuya a la conservación de la especie (DOF, 2015). Lo anterior se inscribió en el marco de la Estrategia Integral para Preservar el Ecosistema Marino del Alto Golfo de California, cuyo objetivo prioritario es el evitar la extinción de la Vaquita Marina, puesta en marcha el 16 de abril de 2015 por el Presidente de México. Esta estrategia además contempló, un programa de compensación a la cadena productiva relacionada con la suspensión temporal, financiación para una expedición para estimar la abundancia de vaquita, vigilancia comunitaria y la presencia del Estado Mexicano para combatir la pesca ilegal.

Aunado a esto, el 22 de julio de 2016, los presidentes de EEUA y de México se comprometieron a intensificar la cooperación bilateral para proteger a la vaquita mediante las siguientes acciones: a partir de septiembre 2016, México establecerá la veda permanente de redes de enmalles en todas las pesquerías en el rango de distribución de la vaquita en el Alto Golfo de California; ambos países incrementarán la cooperación y esfuerzos de vigilancia para inmediatamente detener la pesca y el tráfico ilegal de la vejiga natatoria de la totoaba; ambos países redoblarán esfuerzos, en colaboración con expertos internacionales, para desarrollar artes de pesca alternativas a las redes de enmalle que no resultan en enmallamiento de la vaquita y así establecer pesquerías “vaquita-safe”. Por último, se comprometieron a establecer e implementar un programa de largo plazo para eliminar artes de pesca ilegales y abandonadas en el hábitat de la vaquita (<https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2016/07/22/hoja-informativa-relaciones-estados-unidos-mexico>).

En 2017, la Semarnat y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sagarpa) llegaron a un acuerdo para establecer una veda permanente de redes de enmalle en el Alto Golfo de California, entre otras acciones (DOF, 2017). Sin embargo, debido a que la pesca ilegal de totoaba continuaba provocando la disminución de la población de vaquita de manera catastrófica, se inició otro tipo de esfuerzos para evitar la extinción de esta especie.

En la VII reunión del CIRVA, realizada en mayo de 2016, la Secretaría de Marina y la Sea Shepherd Conservation Society presentaron reportes que mostraban que continuaba de manera intensa la actividad ilegal del uso de redes agalleras en el hábitat de la vaquita. En la reunión se hizo notar también que al menos en marzo de 2016 las últimas tres muertes de vaquitas fueron por causa de las redes de pesca. Debido a esto, el CIRVA recomendó que se retiraran de manera inmediata todas las redes abandonadas (llamadas redes fantasmas) porque representan una grave amenaza (CIRVA, 2016).

Por esta razón, en octubre 2016 inició el Programa de Eliminación de Redes Fantasmas en el Alto Golfo de California. Una colaboración multiinstitucional integrado por dependencias del gobierno (lideradas por la Semarnat), así como pescadores locales de San Felipe y organizaciones de la sociedad civil nacionales e internacionales. En un principio fue planeado para buscar y eliminar las redes abandonadas en el mar; sin embargo, los resultados iniciales mostraron la intensa actividad de pesca ilegal, ya que la mayoría de las redes obtenidas del mar son redes activas (recién colocadas) para la pesca de totoaba. Desde que empezó el programa en octubre de 2016, y hasta junio de 2018, se había extraído un total de 1 100 redes. De enero a junio de 2018 se retiraron del mar 557, de las cuales alrededor de 80 % eran redes activas y cerca de 90 % eran artes de pesca para capturar totoaba.

Asimismo, debido a la inminente extinción de la especie y a que la pesca ilegal de totoaba no parecía disminuir, en 2017 la Semarnat decidió implementar un plan de emergencia recomendado por el CIRVA, con el objetivo de buscar, capturar y trasladar a algunos individuos de vaquitas a un santuario temporal ubicado en su hábitat, donde tendrían cuidado humano. El objetivo central pretendía conseguir más tiempo para eliminar la pesca ilegal de totoaba y desarrollar pesquerías legales con artes de pesca que no afecten a la vaquita. De tal forma, la meta era contar con individuos que pudieran ser liberados, posteriormente, en un ambiente libre de redes (Rojas-Bracho *et al.*, 2019). Se logró capturar dos vaquitas. La primera fue una hembra inmadura que estaba en buenas condiciones, pero los equipos de veterinaria y de cuidado animal determinaron que ésta no se estaba aclimatando a la piscina del centro de cuidado (llamado El Nido), por lo que tomaron la decisión de liberarla. La segunda vaquita fue una hembra adulta y también se consideró que estaba en buenas condiciones para su transporte a El Nido. Al principio la

vaquita no presentó señales de estrés y parecía que aprendía a adaptarse a la instalación marina, pero después dejó de nadar y su estado se deterioró muy rápidamente, por lo que se inició una liberación de emergencia. Sin embargo, no se tuvo éxito y la vaquita fue recapturada rápidamente para la administración de atención de emergencia; durante estas labores, el animal sufrió un paro cardíaco y no respondió a los intentos de reanimación (Rojas-Bracho *et al.*, 2019). Debido a estos dos acontecimientos, y de acuerdo con el protocolo establecido, el programa se suspendió por el riesgo que representaba a la población la captura de más vaquitas.

Aunado a esto, el 26 de julio de 2018, en respuesta a una demanda presentada por grupos conservacionistas internacionales, la Corte Internacional de Comercio de Estados Unidos ordenó prohibir las importaciones de pescado (como sierra, chano, curvina) y camarón que son capturados con redes agalleras en el hábitat de la vaquita. Esto con el fin de eliminar su principal causa de mortalidad y evitar su extinción.

1.3. Abundancia de la población.

Los esfuerzos de conservación de vaquita han sido impulsados principalmente por los resultados de las investigaciones sobre abundancia y tendencia de su población, ya que se han hecho para conocer si las acciones de conservación implementadas por el Gobierno de México han sido efectivas o necesitan ser modificadas de acuerdo al estatus de la población. A continuación se describen las dos técnicas de estudio que se han empleado para este tipo de investigaciones y sus resultados de manera general.

Las últimas estimaciones de la población de vaquita han sido bajas y en declive. Durante otoño de 1997, en un crucero conjunto México-EEUA, se obtuvieron los datos para estimar la abundancia de la población, con base en el método de muestreo de distancias (Buckland *et al.* 1993). Se estimó que 567 individuos componían a la población de vaquita (I.C. 95% 177 – 1073) y su distribución se restringió principalmente a la zona occidental del Alto Golfo (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Esto último ya había sido reportado previamente por estudios sobre vaquita (Silber, 1990; Gerrodette *et al.*, 1995; Vidal, 1995). Con el mismo método usado en 1997, aunado a la detección acústica de vaquita en aguas someras con un arreglo de hidrófonos de arrastre y usando el Software PAMGuard y el sistema RainbowClicks, se realizó de nuevo un crucero científico en 2008 para obtener una estimación combinada de estos dos métodos, siendo el resultado 245 vaquitas (I.C. 95%, 68–884) (Gerrodette *et al.*, 2011). Esta estimación fue 57% menor a la de

1997, lo que en promedio representó una tasa de disminución de 7.6%/año en 11 años (Gerrodette *et al.*, 2011).

Para estimar la población de vaquita, durante el otoño de 2015 se llevó a cabo la Expedición Vaquita 2015, un proyecto realizado también en conjunto México-EEUA financiado por SEMARNAT. Se utilizaron dos métodos, uno acústico y otro visual. El componente visual fue basado en el método de muestreo de distancias y modelos geoespaciales a bordo del buque de investigación Ocean Starr (52 m de eslora). Al igual que en 1997 y 2008, desde esta plataforma se usaron binoculares de alta potencia (25x) a una altura de al menos 10 m por encima del nivel del mar para avistar a las vaquitas. El componente acústico de la expedición fue basado en una red de muestreo de 135 detectores acústicos (C-PODs) colocados en el Alto Golfo de California, incluido el Refugio de la Vaquita. Esto fue necesario debido a que parte de la población de la vaquita vive en aguas poco profundas, donde el barco no puede navegar. Por lo tanto, el área de estudio de la Expedición cubrió las zonas de aguas profundas (20-50 metros) visualmente y las áreas someras (10-20m) con detectores acústicos pasivos, pero hubo una zona de traslapeo en la cobertura visual y la acústica (área de calibración). Aplicando las características y bondades del marco de estimación bayesiano, se pudo utilizar la información generada en 1997 y 2008 (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999 y Gerrodette *et al.*, 2011), junto con la generada en el crucero 2015, para estimar los parámetros de un modelo espacial que combinó los datos visuales y acústicos disponibles en un marco de análisis integral. El resultado fue que para el otoño de 2015 se estimó un tamaño de la población de sólo 59 individuos (IC 95% 22 – 145) (Taylor *et al.*, 2017). Esta estimación representó un decremento del 92% (IC 80% - 97%) de 1997 a 2015 en el estrato núcleo del área de estudio de los tres cruceros sistemáticos (CIRVA, 2016).

1.3. Tendencia de la población con técnicas acústicas pasivas

Debido a que esta tesis está basada principalmente en los datos que se han colectado durante 2011 a 2015 por el programa de monitorización acústica de vaquita se detallará más sobre la técnica acústica pasiva usada en este programa y de manera general sobre sus resultados.

1.3.1 Señales acústicas de vaquita.

Las vaquitas como otros odontocetos, emiten y reciben sonidos para poder orientarse para navegar en su medio, comunicarse y para encontrar a su presa para alimentarse. A diferencia de los delfines, las vaquitas solamente emiten chasquidos para actividades de ecolocación. Estas señales acústicas son emitidas a una alta frecuencia (frecuencias principalmente centradas entre 128 y 139 KHz) y con banda estrecha (de 11 a 28 KHz de ancho) (Silber, 1991; Kamminga *et al.*, 1996). Otra característica es que los chasquidos son producidos en series, compuestas de entre 3 a 57 chasquidos individuales (Silber, 1991).

Los chasquidos de ecolocación de alta frecuencia y banda estrecha son usados por todas las marsopas, por las especies de delfines del género *Cephalorhynchus* y dos especies del género *Lagenorhynchus* y el cachalote pigmeo (*Kogia breviceps*) (Madsen *et al.*, 2005). También la Franciscana (*Pontoporia blainvillei*) emite este tipo de chasquidos (Von Fersen *et al.*, 1999). De todas las especies que emiten este tipo de señal, solo la vaquita habita en el Alto Golfo de California e inclusive es el único odontoceto que produce este tipo de señales en México. Esta característica ha permitido su registro acústico con técnicas acústicas pasivas sin posibilidad de confundirse con otra especie de cetáceo.

1.3.2. Técnicas acústicas pasivas.

El estudio de los cetáceos a través de técnicas acústicas pasivas es usado ampliamente para investigar sus diferentes aspectos ecológicos y biológicos. En este tipo de observación, los instrumentos no producen ningún tipo de sonido, lo que hacen es registrar con equipos de detección los sonidos del ambiente (Mellinger *et al.*, 2007). Algunas de las ventajas de este tipo de técnicas contra los métodos visuales para estudiar cetáceos, es que el registro de datos no está restringido a las horas luz, a las condiciones climáticas; comparado contra la renta de un buque de investigación es más económico utilizar este tipo de técnicas. En los métodos visuales la probabilidad de detectar todos los cetáceos presentes durante el transecto es menor que en los métodos acústicos ya que los observadores solo pueden verlos durante el poco tiempo que los cetáceos permanecen en superficie (Mellinger *et al.*, 2007) y además los métodos visuales son realizados generalmente usando pocos puntos de observación, como en tierra o con una o pocas embarcaciones, durante pocas semanas o meses del año (Mellinger *et al.*, 2007).

Los dos tipos de equipos más ampliamente usados para la detección acústica pasiva son los hidrófonos cableados y los detectores autónomos. Se describirá de manera general las dos que se han empleado para la detección acústica de vaquita. El primero ha consistido en colocar un hidrófono desde una embarcación en estaciones de muestreo entre las que se desplaza la embarcación y el segundo en colocar detectores acústicos autónomos en sitios de muestreo. La ventaja de este último es que no depende de una embarcación (y por lo tanto de las condiciones del mar para navegar) para registrar los datos y esto permite capturar más datos y de manera continua. Los detectores autónomos pueden ser colocados en la columna de agua por meses hasta que sus baterías se agoten o se acabe el espacio de las memorias internas de almacenamiento. En ambas modalidades, los sonidos recibidos son filtrados específicamente, sólo ciertas características acústicas del sonido como frecuencia, ancho de banda, duración, etc. son almacenadas en una memoria interna o en una computadora (en el caso del hidrófono). En el estudio de la vaquita se han empleado tanto hidrófonos cableados como detectores acústicos autónomos para la detección de sus señales.

1.3.3. Programa de monitorización acústica pasiva de vaquita.

El estudio de la vaquita con técnicas acústicas pasivas empezó en 1997. Durante los siguientes 10 años se realizaron 15 cruceros para el registro de sus señales acústicas. En los primeros años de muestreo, desde una embarcación se arrastraba el hidrófono. Durante el estudio se notó que al realizar el muestreo estacionario con la embarcación las detecciones acústicas de vaquita aumentaron considerablemente (Jaramillo-Legorreta, 2008). La variable obtenida fue tasa de encuentro acústico medida como número de detecciones por hora. La distribución de esta variable mostró que durante todo el año la actividad acústica de vaquita es preponderante en una pequeña porción en el occidente del Alto Golfo, cerca del poblado de San Felipe, B.C. La tendencia en el tiempo de esta variable indicó que durante 10 años, de 1997-2007, la tasa de detección acústica de *P. sinus* decreció en un 58% (Jaramillo-Legorreta, 2008).

Debido al bajo nivel de abundancia de *P. sinus* la probabilidad de detectar acústicamente individuos o grupos se reduce drásticamente. Se ha inferido que probablemente la tasa de crecimiento máximo de vaquita es menor a 4% anual (Hohn *et al.*, 1996), por lo que pequeños cambios en el tamaño poblacional son extremadamente difíciles de medir. Por lo tanto, se exploraron nuevos métodos de monitorización, ya que el aplicado por Jaramillo-Legorreta (2008) fue basado en un equipo de detección acústico semiautónomo, que requirió el uso de embarcaciones para obtener datos en sitios estacionarios en

cruceros, los cuáles son dependientes de las condiciones climáticas y restringen la posibilidad de obtener una muestra de tamaño suficiente. Se buscaron esquemas de monitoreo que permitieran incrementar la toma de datos para disminuir la varianza muestral para poder detectar cambios que permitieran estimar la tendencia de la población. En 2008, la Expedición Vaquita además de estimar la abundancia también tuvo la meta de diseñar un esquema de monitorización acústica. En un Taller realizado durante 2009, se analizó la información procesada, se delineó un programa de monitorización y se diseñaron las pruebas necesarias para implementarlo (Rojas-Bracho *et al.*, 2010). Se llegó a un esquema de 48 detectores acústicos arreglados en una malla de muestreo entre junio y septiembre dentro del Refugio colocados con un sistema de anclaje en la columna de agua. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en colaboración con el CICESE realizaron las pruebas de desempeño de detectores y el estudio piloto durante 2009-2010 (CICESE, 2009; 2010). También han ejecutado la monitorización acústica desde 2011 a 2015, el cual permitió estimar la tendencia de la población para el período 2011-2015 (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2017). Los resultados del Programa de Monitorización Acústica indicaron que la población de vaquita experimentó en promedio un decline anual de 34% (95% CI 21 a 48%) de 2011 a 2015, antes de la veda de redes agalleras de emergencia que empezó en mayo de 2015. En general, los resultados del modelo indicaron que la población de vaquita disminuyó un 80% (95% CI 62% - 93%) entre 2011 a 2015 (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2017). Otro estudio, usando la estimación de la población de 2015 y datos del Programa, indicó que la tasa de detección acústica de vaquita disminuyó entre 2015 y 2016 un 49%, y el total del decline entre la temporada de muestreo 2011 a 2016 fue de cerca del 90% (Thomas *et al.*, 2017). Los mismos autores estimaron que en noviembre de 2016 había 30 vaquitas aproximadamente. De manera similar, Jaramillo-Legorreta y colaboradores (2019), usando datos del Programa de 2011 a 2018 y los registros de avistamientos de vaquitas en 2017 y 2018, estimaron que el decline de la población de vaquita desde 2011 a 2018 fue de 98.6% y que para el verano de 2018 había menos de 19 vaquitas.

1.3.4. Evaluación de variables que afectan potencialmente a la detección acústica de vaquita.

La monitorización acústica de la vaquita se ha realizado de manera sistemática y ha sido evaluada por el Comité Guía de la Monitorización Acústica de Vaquita (Rojas-Bracho *et al.*, 2010; 2011) y avalado por el Comité Internacional para la Recuperación de la Vaquita (CIRVA, 2012; 2014; 2016). A pesar de esto, aún se tiene que realizar más investigación para evaluar las variables que determinan o afectan la detección acústica de vaquita, con el fin de identificar potenciales fuentes de variación adicionales como diferencias espaciales en la tasa de detección acústica, por interacciones biológicas (delfines), físicas (mareas), y por

interacciones antropogénicas (ruido de ecosondas de pangas y de barcos de arrastre), así como potenciales efectos de movimientos diferenciales entre años en la distribución de individuos dentro y fuera de la zona de muestreo. Por ejemplo, en las interacciones biológicas, se ha documentado que los tursiones (*Tursiops truncatus*) agreden físicamente a las marsopas de puerto (*Phocoena phocoena*) probablemente por competencia por presas, por conductas de juego para practicar peleas o por conductas infanticidas, logrando desplazarlas temporalmente de su hábitat u ocasionando la muerte de las marsopas. Esto se ha documentado en el Fiordo de Moray, Escocia (Ross y Wilson, 1996), en Bahía Cardigan, Gales (Jepson y Baker, 1998) y en la Bahía de Monterey, California (Cotter *et al.*, 2012). En un estudio con detectores acústicos en la costa entre Punta Concepción a Bahía de San Francisco, California, se calculó la presencia acústica relativa de marsopas de puerto y se evidenció que esta disminuyó o que las marsopas se desplazaron a otra área por la presencia acústica de los tursiones (Jacobson *et al.*, 2015). Con métodos acústicos también se ha documentado la coocurrencia de vocalizaciones e interacción de toninas y delfines comunes (*Delphinus spp.*) con *P. sinus* (Campos, 2012). Este estudio, basado en los datos colectados de 2001 a 2007 para el monitoreo de vaquita (Jaramillo-Legorreta, 2008), menciona en sus conclusiones que la distribución espacial de vaquita pudiera estar negativamente correlacionada con la presencia de delfines.

Por lo tanto, a pesar de que ya se tiene conocimiento previo sobre la interacción de delfines con *P. sinus* y de inclusive, cómo la marea influye en los movimientos de individuos de vaquita (Jaramillo-Legorreta, 2008; Campos, 2012) estos resultados se basan en una metodología diferente a la que se emplea actualmente en el programa de monitorización acústica y con un tamaño de muestra mucho menor. Por último, es importante mencionar que aún no se ha realizado un estudio detallado en los datos de la actual monitorización de cómo variables como delfines o embarcaciones pueden afectar a la detección acústica de vaquita. Esto solamente se ha hecho para la variable espacio y se utilizó la latitud-longitud de los sitios de muestreo como variables. De igual manera, para evaluar si la marea afecta al comportamiento acústico de vaquita y por lo tanto a tasa de detección acústica, utilizando como métrica chasquidos por día, se determinó que la marea no afecta a las detecciones (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2017). Sin embargo, los valores de credibilidad de los modelos que se utilizaron para estimar la tasa fueron muy amplios, debido probablemente a que no incluyen las variaciones ocasionadas en la tasa de encuentro por otros factores (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2014; 2017). Por lo tanto, en este estudio se pretende identificar que variables pueden ocasionar afectaciones en la detección acústica de vaquita y por lo tanto ser incluidos como variables en el modelo su la tendencia poblacional.

A pesar de la abundancia tan baja de la vaquita se planea continuar realizando su monitorización, por lo que es necesario reducir los sesgos potenciales introducidos por algunas variables en su detección, ya que estos probablemente eviten detectar la magnitud de los cambios poblacionales que puedan estar ocurriendo de esta especie, vitales para determinar la efectividad de las medidas de conservación y, en su caso, planear nuevas.

En el Capítulo 2 se describe como se registró el sonido producido por dos variables, delfines y embarcaciones y como se procesaron y caracterizaron sus firmas acústicas, obteniendo simultáneamente datos acústicos y visuales colectados durante 2013-2014 en salidas de campo en embarcación menor al Refugio de la Vaquita. En el Capítulo 3, se presenta el análisis de la distribución espacial y temporal de la actividad acústica de delfines y se determina con que variables están relacionadas. En el Capítulo 4, se analiza que variables pueden afectar potencialmente la detección acústica de vaquita. En último Capítulo 5 se resumen las conclusiones de esta investigación.

1.4. Hipótesis y objetivos

1.4.1. Hipótesis

La acción o el ruido producido por algunos fenómenos biológicos, físicos o antropogénicos afectarán el proceso de detección acústica de vaquita.

1.4.2. Objetivo general

- ❖ Evaluar la afectación potencial de algunas variables oceanográficas, antropogénicas y biológicas en la detección acústica de vaquita.

1.4.3. Objetivos particulares

- ❖ Caracterizar sonidos de alta frecuencia producidos por delfines y embarcaciones en forma de firmas acústicas.
- ❖ Utilizar las firmas acústicas para identificar la presencia de delfines y embarcaciones en los datos acústicos de monitorización de la población de vaquita.
- ❖ Caracterizar la distribución de la actividad acústica de los delfines.
- ❖ Determinar la potencial afectación en la detección acústica de vaquita ocasionada por la presencia de delfines y embarcaciones y por otras variables oceanográficas.

1.5. Área de estudio

El área de este estudio es el polígono del Refugio de la Vaquita. Este se localiza en la parte oeste del Alto Golfo de California, frente al puerto de San Felipe, Baja California (Figura 1). La porción del Refugio dentro del polígono de la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, tiene una superficie de 897.09 km² y la porción del Refugio que se encuentra fuera es de 366.76 km² (DOF, 2005). La provincia del Golfo de California donde habita *P. sinus*, se caracteriza por ser un área somera con profundidades menores a los 30m, con un régimen de mareas semidiurno con un rango de hasta 7m y con corrientes de marea con una velocidad cercana a 0.5ms⁻¹ (Lavín y Marinone, 2003). El Alto Golfo se caracteriza por ser un estuario inverso debido a la alta evaporación y al aporte casi nulo de agua dulce del Río Colorado (Lavín *et al.* 1998). También por presentar una alta turbidez en comparación con el resto del Golfo de California. Las aguas más turbias en el Alto Golfo se encuentran en la región noroeste en la costa de la Península de Baja California (Álvarez y Jones, 2004).

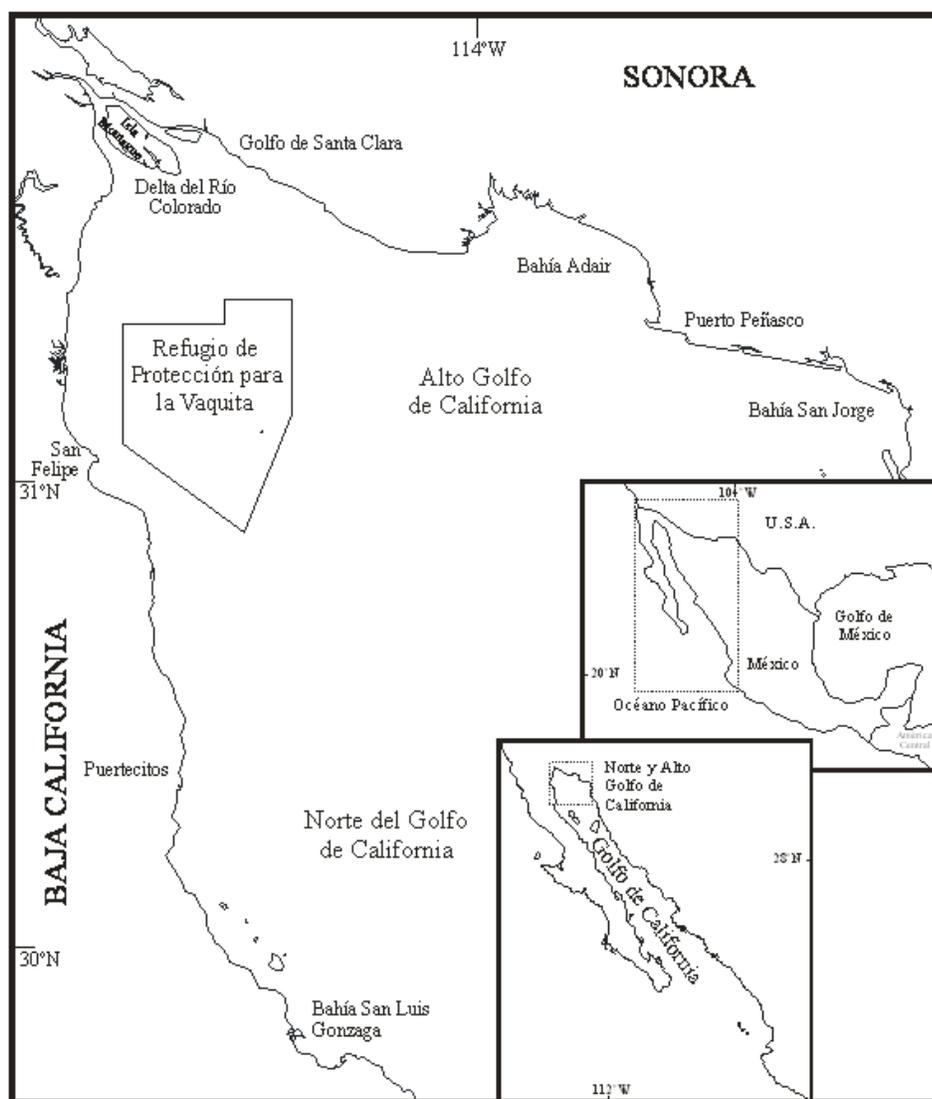


Figura 1. Mapa del Alto y Norte del Alto Golfo de California, donde se muestra el polígono del Refugio de la Vaquita.

Capítulo 2. Validación de las señales acústicas clasificadas como delfines por el detector acústico C-POD.

2.1. Introducción.

2.1.1. Características del C-POD.

El C-POD es el dispositivo de detección autónomo que se ha utilizado desde 2011 a la fecha para la colecta de datos (Figura 2). Este aparato fue el que arrojó mayor sensibilidad en la detección de los chasquidos artificiales de vaquita durante pruebas realizadas en 2008 contrastando diferentes detectores acústicos. Este dispositivo pudo registrar estos chasquidos a una distancia de 180m (Rojas-Bracho *et al.*, 2010). En el caso de la detección de delfines, de acuerdo con Nuuttila y colaboradores (2013), en su investigación realizada con C-PODs en Cardigan Bay en Gales, la distancia máxima de detección de tursiones fue de 1343-1779m, con una mediana de rango de detección de 462-729m. Con el T-POD, versión anterior del C-POD, Elliot y colaboradores (2012) reportaron resultados similares en su estudio hecho en Doubtful Sound, Nueva Zelanda ya que reportó que la distancia máxima de detección de tursiones fue de 1313m.

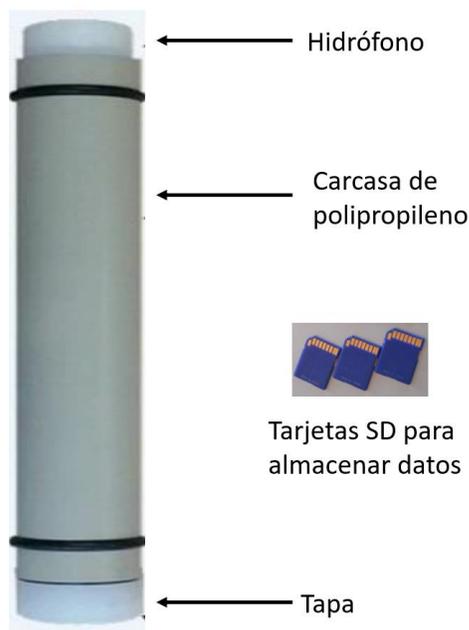


Figura 2. Detector acústico tipo C-POD.

El C-POD se puede dejar por periodos largos (más de 4 meses) en la columna de agua a una profundidad máxima de 100m para grabar señales acústicas funcionando las 24 horas bajo casi cualquier condición meteorológica. El C-POD tiene un hidrófono omnidireccional con la capacidad de grabar chasquidos entre el rango de 20 a 160 KHz en una tarjeta de memoria de 4GB (Tregenza, 2014). En este rango se incluyen chasquidos de ecolocación de altas frecuencias con banda estrecha (120 a 140 KHz) típicos de marsopas y se incluyen chasquidos de ecolocación de delfines de frecuencia media (30 a 60 kHz) (Jacobson *et al.*, 2015).

Los datos adquiridos se descargan en el software C-POD.exe y en este se procesan los datos. Las características acústicas de los chasquidos que puede grabar el C-POD son duración, ancho de banda, frecuencia, nivel de presión del sonido (SPL, por sus siglas en inglés), etc. de las series de chasquidos clic. Estas características permiten seleccionar posibles chasquidos de cetáceos (Figura 3). La clasificación de los chasquidos se hace con el clasificador KERNO, un algoritmo del software. El clasificador extrae de los datos colectados las series de chasquidos coherentes y los clasifica como NBHF (chasquidos de alta frecuencia y banda estrecha), como perteneciendo a otros cetáceos, indicando que son otras especies de odontocetos (excluyendo a los cachalotes), sonar y series de chasquidos sin categorizar (Tregenza, 2014). La temperatura del mar y el ángulo de la posición del C-POD en la columna del agua son registrados cada minuto. Esto último puede ser usado para conocer si las corrientes influyen en el funcionamiento del C-POD, ya que si las mareas lo colocan en posición horizontal el dispositivo deja de grabar (Tregenza, 2014).

De acuerdo a Robbins y colaboradores (2015), este dispositivo de monitoreo acústico pasivo es el más utilizado en Europa para detectar series de chasquidos de odontocetos, principalmente para cuantificar a marsopas y conocer la ocurrencia de delfines.

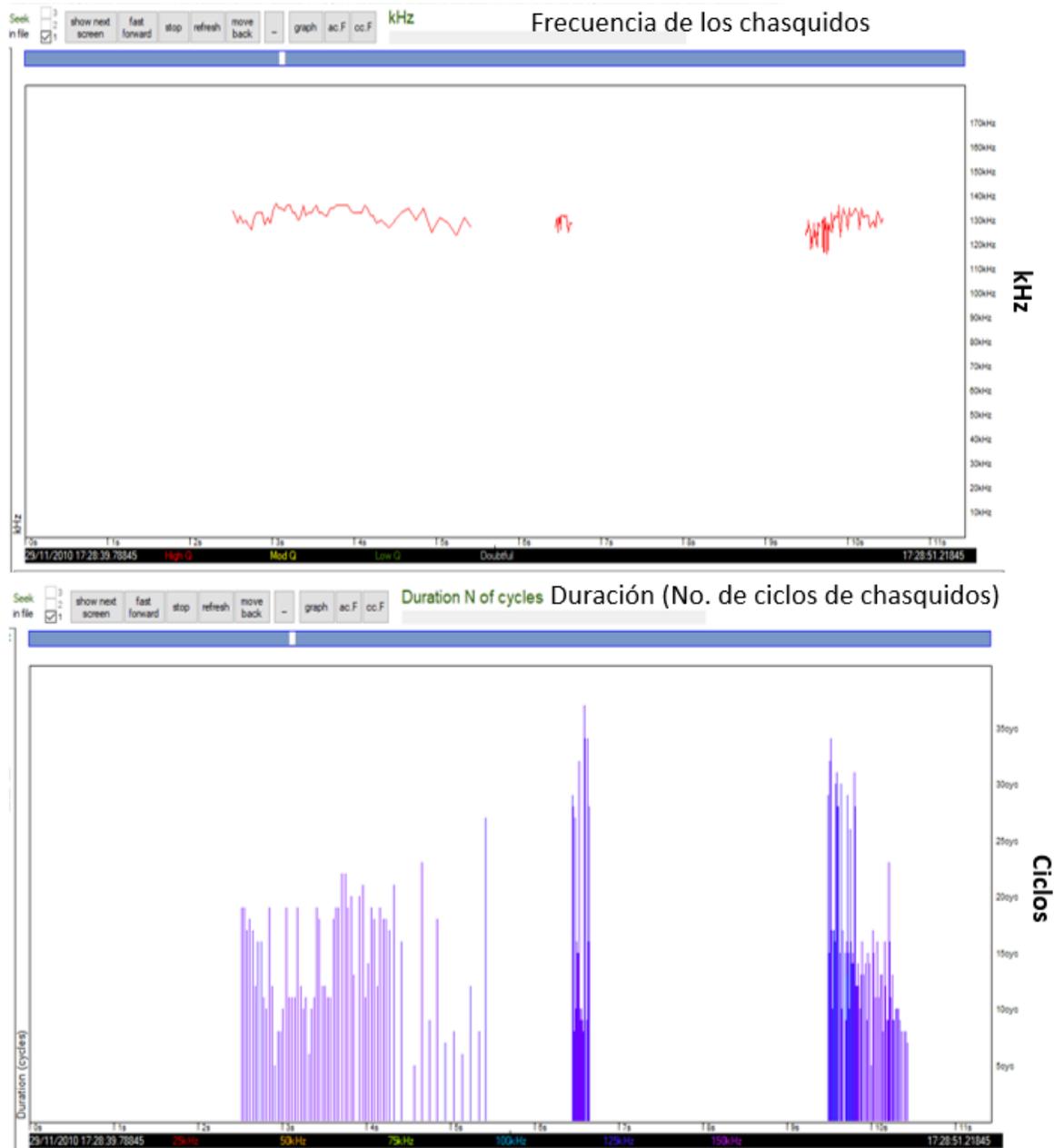


Figura 3. Ejemplo de algunas características acústicas de las series de chasquidos de vaquita visualizadas con el software del C-POD. En la imagen superior se muestra el rango de la frecuencia (kHz) y en el inferior la duración (número de ciclos) de los chasquidos.

2.1.2. Parámetros acústicos de series de chasquidos para identificar delfines con el C-POD

Las detecciones clasificadas como NBHF por el C-POD se pueden verificar usando parámetros acústicos específicos descritos anteriormente como marsopa, mientras que en el caso de los delfines el software del

C-POD no cuenta con un algoritmo para clasificar las series de chasquidos de delfines a nivel especie. Además, no se tiene caracterizado los parámetros acústicos de muchas especies de delfines. De acuerdo a Robbins y colaboradores (2015), el desarrollo de tales parámetros acústicos incrementaría la exactitud de las detecciones de delfines y eliminaría la necesidad de detectores o técnicas de monitoreo adicionales para estudiar a los delfines, reduciendo el costo de los programas de monitorización. Además, las detecciones de delfines a nivel especie ayudarían a estudiar cómo se relacionan con otras especies de delfines o de marsopas, lo cual es un objetivo de este estudio.

Debido a que no se ha caracterizado previamente las series de chasquidos de ecolocación de algunas especies de delfines, en un estudio con C-PODs en Menai Bay, Tanzania, se consideró como a una sola población de estudio a dos especies de delfines, la tonina del Océano Índico (*Tursiops aduncus*) y el delfín jorobado del Indo-Pacífico (*Sousa plumbea*) para estimar su abundancia relativa (Temple *et al.*, 2016).

En otro estudio realizado con C-POD en la costa entre Punta Concepción a Bahía de San Francisco, California, se calculó la presencia acústica relativa de marsopas de puerto y se evidenció que esta disminuyó o que las marsopas se desplazaron a otra área por la presencia acústica de los tursiones (Jacobson *et al.*, 2015). En este estudio, no tuvieron necesidad de tratar de diferenciar con parámetros acústicos a los dos odontocetos, ya que de acuerdo con los autores son los únicos cetáceos que se distribuyen cerca de su área de estudio. Sin embargo, hicieron esfuerzo visual en el sitio de muestreo para confirmar la correcta detección del C-POD comparado a los avistamientos de delfines y marsopas. Por lo tanto, los chasquidos registrados de alta frecuencia fueron asignados como marsopa común y los de media-frecuencia asignados a tursiones (Jacobson *et al.*, 2015). En otro estudio, en Cardigan Bay, Gales, también no tuvieron problemas en diferenciar con parámetros acústicos en el software del C-POD a la marsopa común y a los tursiones, ya que también son los únicos dos odontocetos que habitan en esa bahía y sus parámetros acústicos son muy diferentes (Simon *et al.*, 2010). Ellos usaron como métrica acústica las detecciones positivas en un día y por hora para conocer la presencia relativa y uso de hábitat de los dos odontocetos.

De acuerdo a Tregenza (2014) con el C-POD no es posible diferenciar las series de chasquidos de delfines a nivel especie. Sin embargo, en un estudio hecho en Broadhaven Bay, Irlanda, con estos dispositivos se pudo obtener diferentes parámetros acústicos a nivel especie basados en las características acústicas de las series de chasquidos de tursiones del Atlántico, delfín común de rostro corto (*Delphinus delphis*) y delfín de Risso (*Grampus griseus*). Las características usadas fueron frecuencia, intervalo de emisión entre chasquidos y duración de los chasquidos. En este estudio, se realizó esfuerzo simultáneo de observación

(visual y acústica), para evaluar la eficacia de la identificación a nivel especie con los parámetros acústicos comparada con la identificación a nivel especie desde un sitio de observación en tierra. Los valores de las series de chasquidos se muestran en Tabla 1 (Robbins *et al.*, 2015).

Tabla 1. Características de las series de chasquidos para los delfines tursiones del Atlántico, delfín común de rostro corto y delfín de Risso registradas al mismo tiempo de avistamientos realizados a menos de un 1 km de distancia del sitio del C-POD. Todos los valores son promedios y en paréntesis están sus desviaciones estándar. * SPL significa nivel de presión del sonido (sound pressure level por sus siglas en inglés). Tomada de Robbins *et al.* (2015).

Especie de delfín	SPL (Pa)*	Frecuencia mínima (kHz)	Frecuencia máxima (kHz)	Duración (número de ciclos)	Chasquidos por segundo
Delfín de Risso (n = 99)	57.07 (±34.99)	37.51 (±5.35)	104.96 (±27.66)	6.19 (±1.02)	8.48 (±5.47)
Delfín común (n = 19)	72.26 (±33.33)	42.11 (±8.36)	127.74 (±16.41)	6.00 (±1.16)	11.15 (±9.21)
Toninas (n = 29)	73.14 (±34.05)	42.59 (±16.59)	99.45 (±26.87)	5.27 (±0.68)	25.03 (±32.20)

A pesar de que hubo traslape o similitud en los valores de diferentes características acústicas medidas en las tres especies (Tabla 1), en el estudio de Robbins y colaboradores (2015), pudieron diferenciar a nivel especie a los tres delfines después de realizar análisis estadísticos multivariados tipo PERMANOVA. Encontraron diferencias en la media del nivel de presión del sonido, frecuencia máxima de los chasquidos e intervalo de emisión de los chasquidos que contribuyeron para diferenciar entre el delfín común y el delfín de Risso y la media del nivel de presión del sonido, frecuencia máxima de los chasquidos y número de chasquidos por segundo contribuyeron mayormente a diferenciar entre tursiones y delfines comunes. Sin embargo, los autores mencionaron que tuvieron que hacer una verificación visual en los datos para revisar que las series de chasquidos cumplieran con las características acústicas específicas para cada especie.

Por lo tanto, a pesar de que es difícil diferenciar delfines por su alto traslape de los valores de las características de sus series de chasquidos y a que los odontocetos pueden variar sus chasquidos de ecolocación en diferentes ambientes (y por lo tanto, no tener valores de referencia robustos de las características acústicas) (Au, 1993). En este estudio se espera lograr la diferenciación ya que se colectaron datos visuales (para identificar a nivel especie) y acústicos tomados simultáneamente lo que permitirá

conocer los valores de las características acústicas de los delfines más abundantes en el Refugio de la Vaquita, los tursiones y los delfines comunes de rostro largo (*Delphinus delphis bairdii*).

2.2. Objetivos

- ❖ Caracterizar sonidos de alta frecuencia producidos por delfines y embarcaciones en forma de firmas acústicas.
- ❖ Utilizar las firmas acústicas para identificar la presencia de delfines y embarcaciones en los datos acústicos de monitorización de la población de vaquita.
- ❖ Obtener datos de otras variables como velocidad vertical de la marea y temperatura del mar durante el periodo de estudio.

2.3. Métodos

2.3.1. Colecta de datos

2.3.1.1. Programa de Monitorización Acústica Pasiva de Vaquita

El diseño de muestreo del Programa de Monitorización Acústica de Vaquita fue planeado con una red de sitios de muestreo donde se colocaron los C-PODs de manera sistemática en tiempo y espacio en el Refugio, por ser un área donde no se permite la pesca con redes, y así evitar pérdidas de los dispositivos. Este consistió en colocar por 90 días 62 C-PODs en sitios de muestreo en el Refugio, 48 en el interior y 14 en la periferia, en algunas de las 16 boyas de marcaje que lo delimitan (Figura 4) (Rojas-Bracho *et al.*, 2010).

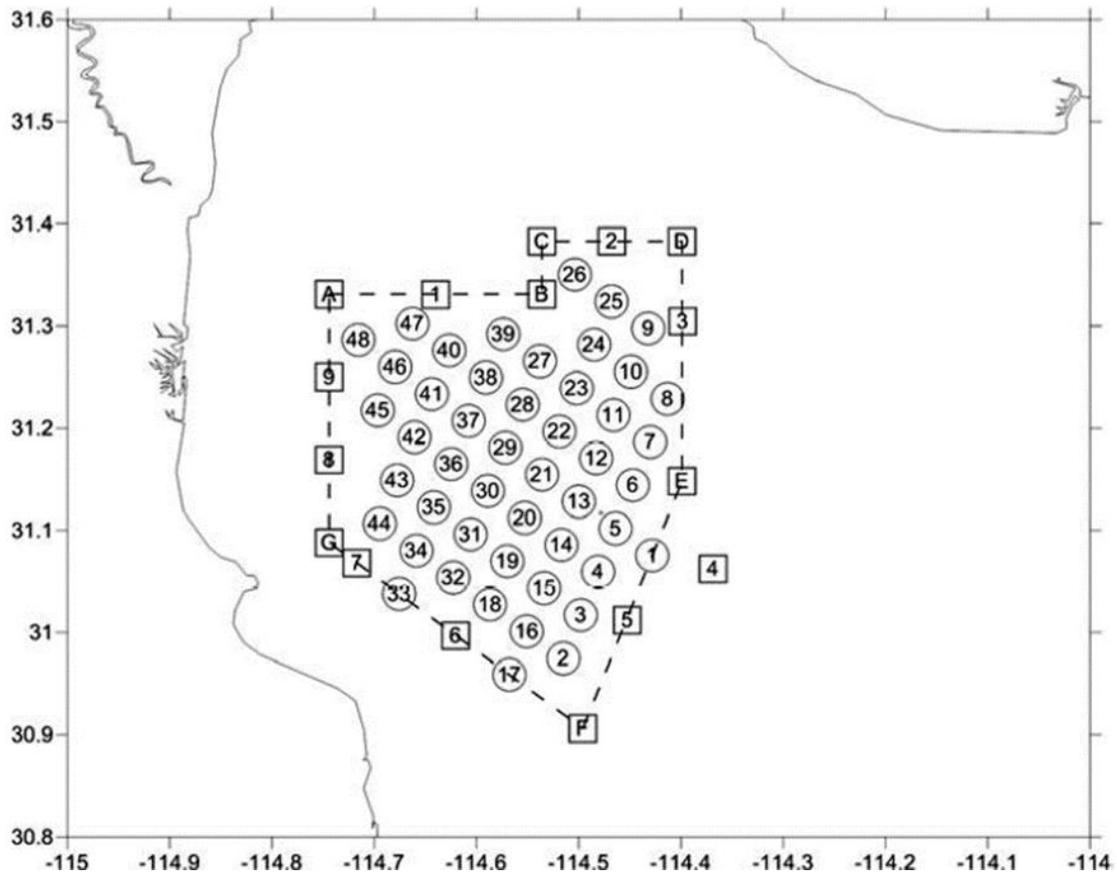


Figura 4. Refugio de la Vaquita y sitios de muestreo. El polígono del Refugio está trazado con línea discontinua. Los 48 sitios en el interior del Refugio están señalados con círculos. Las boyas del polígono están señaladas con cuadrados. Tomado de Jaramillo-Legorreta *et al.* (2011).

Se diseñaron sistemas de anclaje tanto para sitios dentro del refugio como en las boyas que lo delimitan, los cuales debieron ser sometidos a pruebas de operación (Rojas-Bracho *et al.*, 2011). Los anclajes diseñados para instalar los detectores acústicos en las boyas no fueron exitosos (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2012). En 2010 se realizó una prueba piloto de detección acústica. Debido a que en ese estudio los anclajes dentro del Refugio tuvieron una alta tasa de pérdida durante la temporada de camarón (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2011; Rojas-Bracho *et al.*, 2011), se decidió acotar el periodo de muestreo de junio a septiembre de cada año, por ser la temporada baja de actividades pesqueras en el Alto Golfo (Rojas-Bracho *et al.*, 2011). En 2011, se realizó la primera campaña de monitorización acústica de vaquita (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2012), en 2019 se realizó la novena campaña. Durante las temporadas de muestreo de 2011 y de 2012 todos los detectores colocados en las boyas de marcaje y en dos sitios de muestreo dentro del Refugio se perdieron cada año. Por lo tanto, no se volvieron a colocar y el diseño de muestreo final

consistió en 46 sitios (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2017). En este estudio se usarán las señales acústicas de vaquita colectadas en las temporadas de muestreo de 2011 a 2015.

2.3.1.2. *Sonidos producidos por los objetos de estudio*

Los datos colectados con los detectores acústicos durante las campañas de monitorización incluyen además de los chasquidos de vaquitas, el registro de sonidos producidos por delfines y embarcaciones. También se registró el ruido producido por el transporte de sedimentos provocado por viento intenso y corrientes de marea que puede saturar el almacenamiento de chasquidos del C-POD (Tregenza, 2014). Tanto el ruido y sonidos son almacenados como chasquidos. Aunado a esto, con el fin de caracterizar los chasquidos de ecolocación de los delfines y los chasquidos emitidos por las ecosondas de las embarcaciones, realizamos salidas de campo al Refugio de la Vaquita para colecta simultánea de datos acústicos y visuales de los objetos de estudio. En el caso de las señales de vaquita, se utilizaron las series de chasquidos clasificadas como marsopas por el algoritmo del software del C-POD y validadas posteriormente como vaquitas por analistas (detalles en Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2017).

2.3.1.3. *Delfines y embarcaciones*

Durante agosto de 2013 a marzo de 2014 se realizaron seis viajes de campo a San Felipe, B.C. Las navegaciones al Refugio se hicieron a bordo de una panga de 27' de eslora con motor fuera de borda de 150HP. En las navegaciones, se avistaron vaquita, tursiones (*Tursiops truncatus*), y delfín común de rostro largo (*Delphinus delphis bairdii*). Durante la mayoría de los avistamientos, se navegó hacia la trayectoria de nado de los delfines con el objetivo de lanzar uno o tres detectores acústicos para registrar sus vocalizaciones. En algunas ocasiones, los tres detectores fueron colocados en un solo cabo y boya a una profundidad de 5, 10 y 15m de la superficie del mar (Figura 5). La mayoría de las veces, los detectores fueron colocados a una profundidad de 10 metros debajo de la superficie del mar en cabos y boyas individuales. La boya en superficie nos permitió recuperar los detectores rápidamente y colocarlos de nuevo en otro sitio. Además, durante el registro de vocalizaciones, también se anotaron datos cada cinco minutos sobre el comportamiento de los animales o cada vez que cambiaban repentinamente su comportamiento. Se anotó la composición de grupo, se identificó a nivel especie, se tomaron fotografías

de los animales y se estimó de manera subjetiva la distancia del grupo de los animales a los detectores acústicos. Para aumentar la probabilidad de registro de las vocalizaciones y evitar disturbios en el comportamiento de los animales ocasionado por el ruido producido por el motor de la panga, la mayoría de las veces se lanzaron tres detectores acústicos en diferentes posiciones por si cambiaban la trayectoria de nado y siempre se apagó el motor de la panga.

Con las embarcaciones, se hizo el registro del ruido producido de manera diferente. En el caso de los barcos camaroneros, se pudo registrar la distancia del barco a los detectores acústicos de manera más precisa, ya que los detectores no se dejaron a la deriva como en el caso de los delfines, sino que se amarró un cabo a la panga donde se colocaron tres detectores a una profundidad de 5, 10 y 15m de la superficie del mar. Con un telemetro láser Ranging Bushnell (EEUU) se registraron cada tres minutos la distancia y el ángulo de la panga al barco, se anotaron los cambios de dirección o de actividad (navegando, arrastrando la red, etc.) del barco y por último, también se registró automáticamente con un GPS cada 30 segundos el tiempo y la posición geográfica de la panga.

Para registrar el ruido producido por las pangas, el arreglo de los tres detectores se colocó en el mar con un ancla en su extremo distal para que no se moviera y se anotó su posición geográfica (similar a Figura 5 pero con muerto llegando a fondo del mar). En la panga se navegó a tres diferentes velocidades con el fin de conocer si conforme se forzaba el motor el detector registraría el ruido producido por el aumento de velocidad. Las navegaciones se trazaron en ruta directa hacia los detectores y se alejó como máximo 300m. Con este experimento se trató de simular el ruido producido por una panga de pesca en tránsito hacia sus actividades pesqueras.

2.3.1.4. Velocidad de la marea y temperatura del mar.

Temperatura, salinidad y presión determinan la velocidad del sonido. Factores como oleaje y mareas determinan en parte la intensidad del ruido ambiental y, por ende, la cantidad de chasquidos que son detectados y almacenados por el C-POD (CICESE, 2009). Para conocer las características del sonido producido por las mareas y poder identificar a estos en el software, se utilizaron los datos generados por el Programa MAR 9.0 de CICESE para la zona de San Felipe. Estos datos nos permitieron calcular el componente vertical de la velocidad de marea, como una medida proporcional del componente horizontal instantáneo de la corriente de marea. La velocidad vertical se calculó como la diferencia entre dos lecturas

consecutivas, en milímetros por minuto (Jaramillo-Legorreta, 2008). El programa MAR incluye datos sobre la altura de la marea a intervalos de un minuto para una zona cercana a San Felipe, B.C., los cuales fueron utilizados en el cálculo de la velocidad de marea.

Los valores de la temperatura de las mareas registraron cada minuto por todos los C-PODs en la columna de agua durante las campañas de monitorización. Este sensor de temperatura tiene un margen de error de ± 2 °C (Tregenza, 2014).

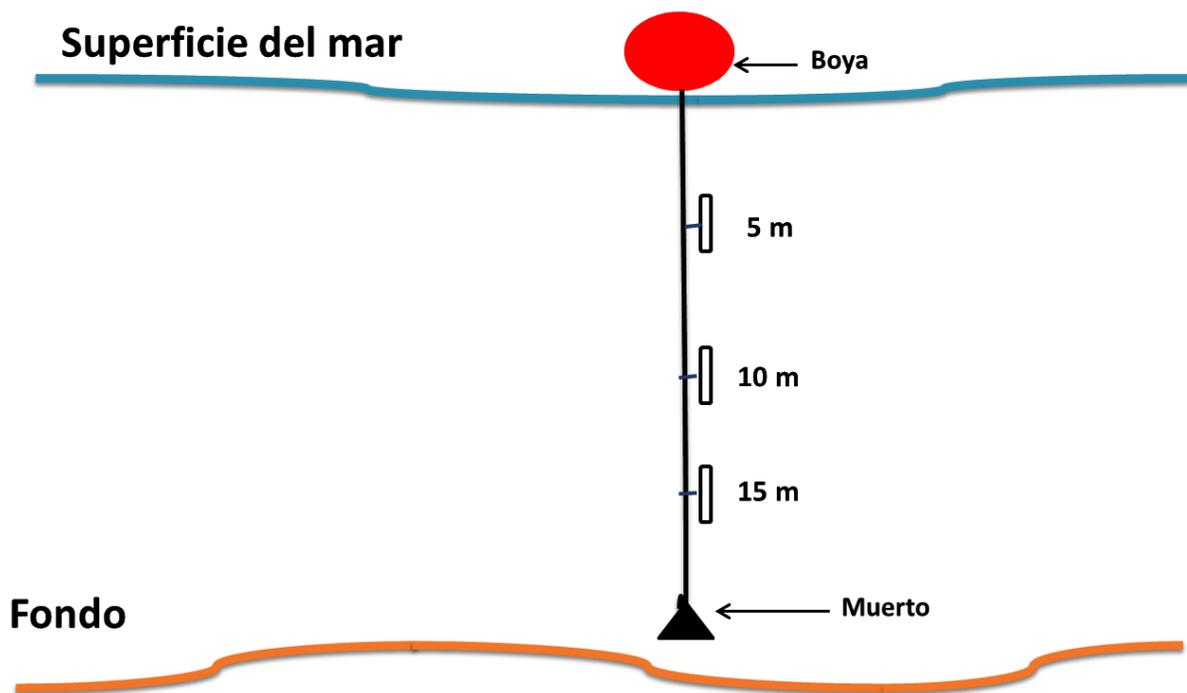


Figura 5. Arreglo de tres C-POD colocados a diferentes profundidades. El peso muerto sirvió para que el arreglo no lo movieran las corrientes del mar y la boya en superficie del mar sirvió para ubicar el arreglo. Un arreglo similar, pero sin el peso muerto, se colocó en la superficie del mar para registrar las señales acústicas de los delfines.

2.3.2. Procesamiento de datos e identificación de los chasquidos producidos por los fenómenos que producen ruido.

Se extrajeron las tarjetas de memoria de los C-PODs y fueron leídas en una computadora portátil con el programa para el análisis de datos (CPOD V2-044.exe, Chelonia Limited). El programa creó los archivos

CP1, que contienen toda la información en bruto registrada por los detectores. Para buscar eventos de chasquidos de sonar y “otros cetáceos” en los datos, se corrió la rutina de identificación de series (clasificador KERNO) en los archivos CP1. Esta rutina creó otros archivos con la información filtrada con las clasificaciones llamados CP3.

El registro del tiempo (hh:mm:ss) en la colecta de datos es clave para caracterizar e identificar las señales acústicas. El detector registró continuamente el tiempo de los eventos acústicos y permitió realizar un primer análisis exploratorio comparativo de eventos entre lo que registró el detector y los eventos observados en el campo. Esto fue posible porque en el visualizador del software se muestran los chasquidos etiquetados en el archivo CP3 con colores diferentes dependiendo de los valores de sus características acústicas. Es importante mencionar, que este etiquetado no es muy específico, ya que el clasificador KERNO del software solo incluye categorías para series de chasquidos de banda ancha y de frecuencia alta usados para ecolocación por las marsopas a 120-140kHz, sonar de embarcación, chasquidos de ecolocación de delfines de 30 a 60kHz de frecuencia (no a nivel especie) y una para ruidos sin categoría asignada. Cada serie de chasquidos es automáticamente definida con calidad “alta”, “moderada”, “baja” y “dudosa”. La clasificación del algoritmo representa el nivel de certeza que la serie del chasquido no haya sido originada de una fuente de sonido no relacionada con su clasificación asignada (marsopas, sonares o delfines).

La información que se colectó en campo en presencia de los delfines fue usada para caracterizar los parámetros acústicos de las series de chasquidos clasificados como “otros cetáceos”. La caracterización consistió en obtener la media y desviación estándar de los parámetros acústicos de las dos especies de delfines avistadas. Esta información permitió comparar que parámetros, debido a su similitud, fueron útiles para crear una rutina de identificación que permitió validar como delfines las series de chasquidos “otros cetáceos” clasificados por KERNO. De igual manera, se obtuvieron los parámetros de los chasquidos emitidos por la ecosonda de embarcaciones y se comparó su similitud con los colectados en el programa.

Para extraer datos colectados del programa de monitorización acústica de vaquita, se usaron los archivos CP3, archivos analizados para visualmente en pantalla confirmar las señales acústicas de vaquita. Por lo tanto, con el software del C-POD se extrajo esta información de los CP3, junto con las series de chasquidos clasificadas como “otros cetáceos” y como chasquidos de sonares. También se extrajo el registro de la temperatura del mar. Sólo se utilizaron series de chasquidos de “otros cetáceos” con calidad alta y moderada, para evitar la probabilidad de usar falsos positivos de chasquidos de delfines. El software del C-POD extrajo la información en formato de texto y se importó a Excel (Microsoft Office versión 365) para

el procesamiento de la información y poder realizar una base de datos con información de las señales acústicas y de las variables que se analizaron en el estudio.

2.3.3. Validación de las series de chasquidos de delfines.

Se desarrolló un algoritmo en MatLab (MathWorks, R2015a) para validar las series de chasquidos "otros cetáceos" clasificados por KERNO como series de chasquidos de delfines utilizando la caracterización de los parámetros acústicos. Se asumió que KERNO clasificó sin falsos positivos las series de chasquidos "otros cetáceos" colectados durante las salidas de campo. Se exploraron los datos de los parámetros acústicos para seleccionarlos como criterios de clasificación en el algoritmo. La selección se basó en la similitud de la media de los parámetros de las dos especies de delfines y en la inspección de la distribución de frecuencias de los parámetros seleccionados (Figura 7). Se asumió que KERNO clasificó correctamente las series de chasquidos que pertenecen a los delfines, una vez que se determinó la distribución de probabilidad de los parámetros, se seleccionaron los valores de los cuantiles de probabilidad entre 0.025 y 0.975 de los parámetros como rango de criterios de referencia para clasificar otras series de chasquidos de "otros cetáceos" como delfines. De esta forma, se eliminaron los datos de las colas de la distribución de los parámetros.

Se escogieron la duración y la moda de la frecuencia como parámetros criterios para el algoritmo. Se seleccionó la duración debido a la similitud de la media para las especies de delfines (5.7 ciclos para los delfines comunes y 5.5 ciclos para los tursiones). La frecuencia (ciclos por segundo, Hz) es un parámetro ampliamente utilizado para la clasificación de series de chasquidos de odontocetos y por eso se usó como criterio de clasificación. Los datos de los parámetros relacionados con la frecuencia (mínimo, máximo, media y moda) mostraron una distribución logarítmica normal (Figura 6). Se seleccionó la moda de la frecuencia ya que esta medida de tendencia central no se ve afectada por los datos de las colas de la distribución. Además, la diferencia notable de la media de la moda de la frecuencia y la duración de las series de chasquidos de delfines (72 kHz y 5.72 ciclos) con otras fuentes de sonido como vaquita (128-139 kHz y ciclos > 10) y sonar (50 kHz y ciclos > 20) fueron también clave para seleccionarlos con el fin de evitar que nuestra rutina clasificara una señal de delfín como vaquita o sonar. Los valores promedio de duración de los ciclos fueron similares a los valores obtenidos para delfines comunes (6.0 ciclos) y tursiones (5.27 ciclos) en Broadhaven Bay, Irlanda (Robbins *et al.*, 2015). La selección de series de chasquidos de calidad

alta y moderada de las clasificaciones “otros cetáceos” por KERNO probablemente aumentó la posibilidad de que el algoritmo evitará calcular más falsos positivos.

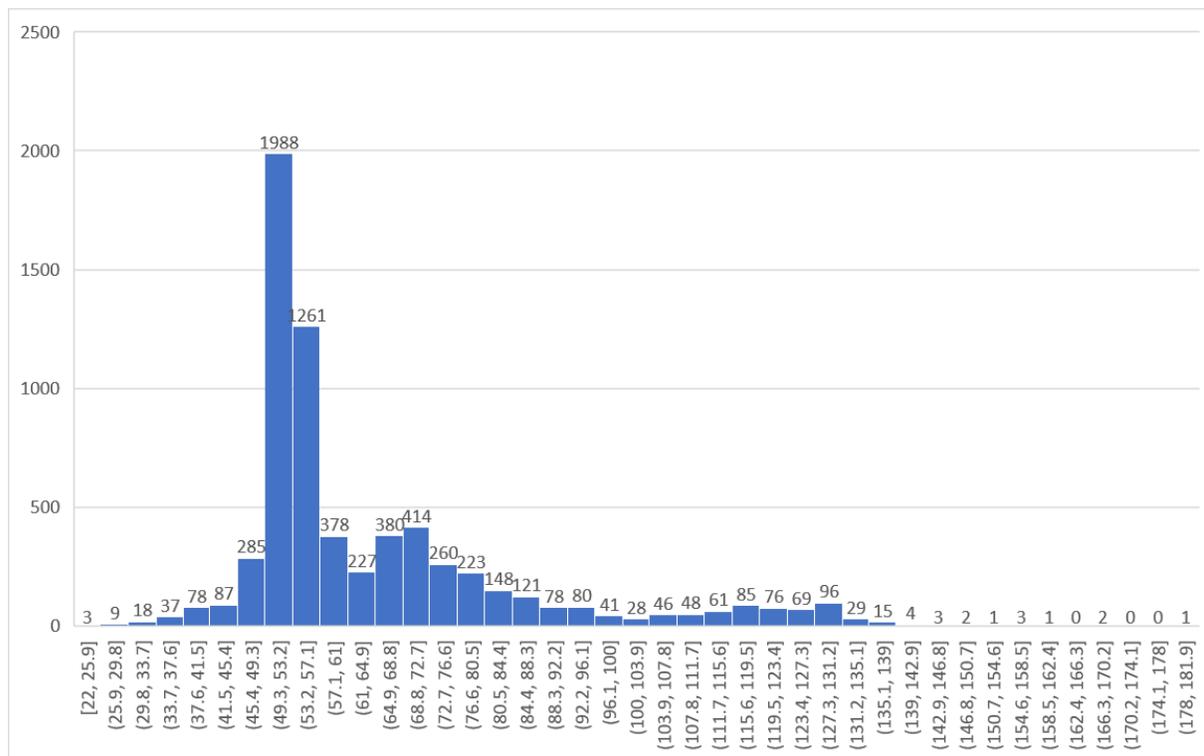


Figura 6. Distribución de la moda de la frecuencia (kHz) de las series de chasquidos de delfines. En el eje x se muestran los rangos de la moda y en el eje y su frecuencia en las series de chasquidos.

Los valores del primer y tercer cuartil estimados y utilizados como criterios de rango para la duración fueron 4 y 8.5 ciclos y 44 y 111 kHz para el promedio de la moda de la frecuencia. La rutina de identificación del algoritmo clasificó a una serie de chasquidos como falso negativo o falso positivo cuando la moda de la frecuencia o los promedios de duración de las series de los chasquidos estaban fuera del intervalo de referencia de los criterios (Figura 7). El algoritmo se aplicó primero a las series de chasquidos colectados en campo en presencia de los delfines para calcular la precisión de nuestro algoritmo calculando la tasa de falsos negativos. Posteriormente, se aplicó a las series de chasquidos clasificado como “otros cetáceos” de la base de datos del programa de monitoreo acústico. De esta manera, se calculó la tasa de falsos positivos de las series de chasquidos “otros cetáceos” clasificados por KERNO.

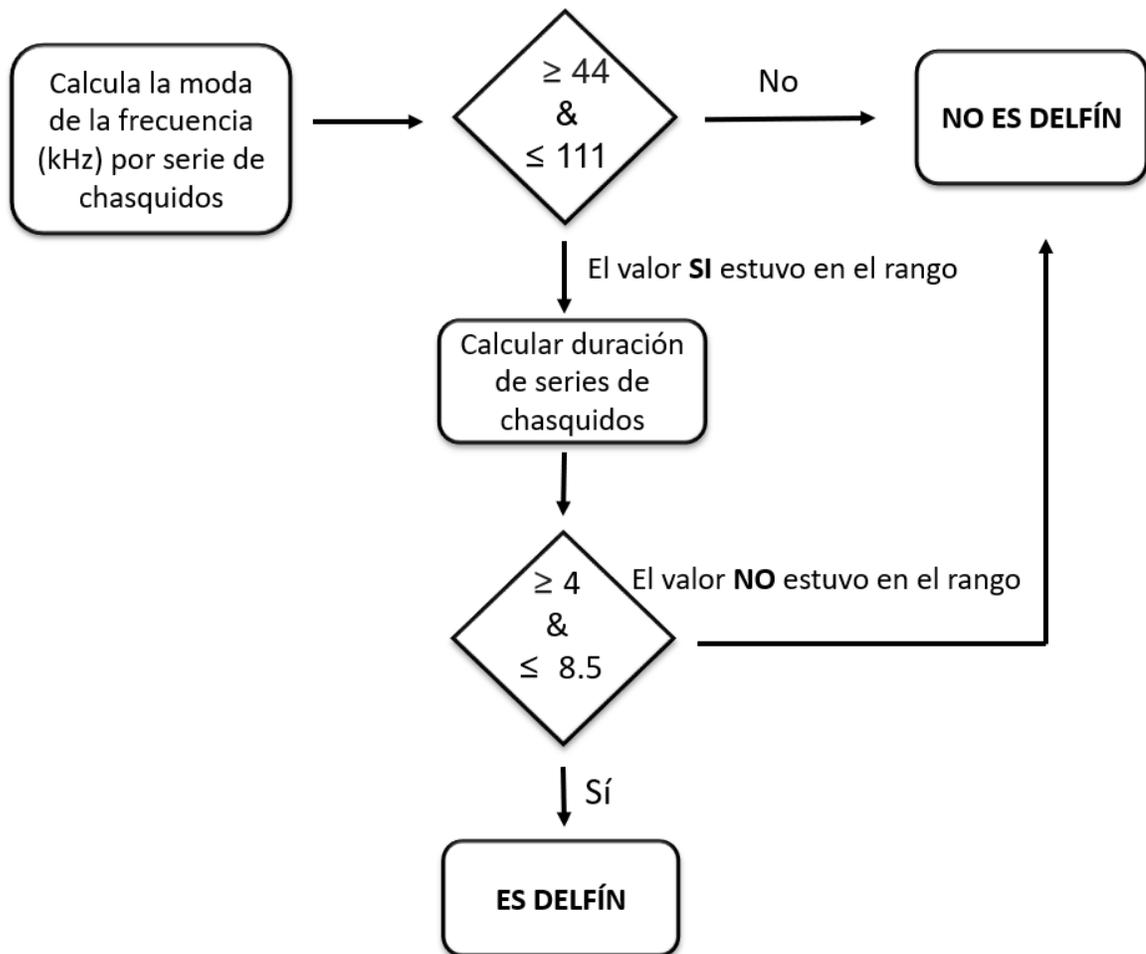


Figura 7. Diagrama del algoritmo que se aplicó para determinar si una serie de chasquidos fue clasificada correctamente como delfines por el algoritmo KERNO.

2.4. Resultados

2.4.1. Datos colectados en el Programa de Monitorización Acústica de Vaquita

Durante las temporadas de muestreo 2011-2015 del programa de monitoreo acústico, recolectamos 12,731 días de grabación entre el 19 de junio al 19 de agosto de cada año (Tabla 2). En total se obtuvieron datos de 214 sitios muestreados (Tabla 2). El algoritmo KERNO clasificó de 1,647,415 chasquidos de delfines pertenecientes a 120,038 series de chasquidos de delfines. El 21.17% (25,417) de las series de chasquidos de delfines fueron etiquetados como de "alta" calidad, y el 78.82% (94,621) como calidad "moderada".

Tabla 2. Resumen del esfuerzo y de los datos acústicos de delfines, vaquitas y de ecosondas registrados durante el 19 de junio al 19 de agosto durante las temporadas de muestreo de 2011 a 2015.

	2011	2012	2013	2014	2015	Total
Sitios de muestreo	40	45	43	40	46	214
Días de grabación	2,280	2,714	2,299	2,452	2,626	12,731
Chasquidos de delfines	464,511	112,382	244,444	466,655	359,423	1,647,415
Series de chasquidos de delfines	36,759	8,727	16,801	34,222	23,529	120,038
Series de chasquidos de delfines de calidad alta	7,116	7,553	2,093	4,593	4,062	25,417
Series de chasquidos de delfines de calidad moderada	29,643	1,174	14,708	29,629	19,467	94,621
Chasquidos de vaquita	363,938	423,911	238,624	136,033	91,057	1,253,563
Series de chasquidos de vaquita	31,027	34,912	19,801	11,404	7,699	104,843
Chasquidos de ecosonda	11,303	949,468	6,795	39,529	132,433	1,139,528

2.4.2. Características de los ruidos producidos por embarcaciones.

Para caracterizar la firma acústica del ruido producido por las embarcaciones menores, se realizó un experimento para identificar si el detector y el software tienen la capacidad de grabar, interpretar y visualizar esos sonidos en un ambiente tan ruidoso como el del Alto Golfo de California. También se colectaron datos del ruido producido por barcos de arrastres en el Refugio de la Vaquita.

El C-POD pudo detectar el sonido producido por las ecosondas de las embarcaciones ya que el algoritmo KERNO arrojó series de chasquidos clasificados como sonares. Ningún tipo de ruido producido por las embarcaciones fue detectado o clasificado por el C-POD como una serie de chasquidos de marsopa o de "otros cetáceos". Este resultado no es sorprendente ya que el límite inferior de detección del C-POD es de aproximadamente 20 kHz y la gama de ruidos que se espera produzcan las embarcaciones se hayan a frecuencias menores. Se ha documentado que una embarcación de fibra de vidrio de 7 metros de longitud (similar a las pangas usadas por los pescadores en el Alto Golfo) producen sonidos con una frecuencia de 0.63 kHz y un barco de arrastre 0.1 kHz (Malme *et al.*, 1989).

Durante algunos de los avistamientos del delfín común de rostro largo registrados el 29 de octubre de 2013, un grupo de 40 animales estuvo alimentándose de la fauna de acompañamiento que flotaba detrás de los barcos de arrastre camaroneros. El avistamiento duró 102 minutos. Durante este tiempo se colocaron tres C-PODs en la columna de agua para seguir la trayectoria de los delfines. Los delfines permanecieron con un solo barco de arrastre, aunque a menos de 1,000 metros de distancia se encontraban otros dos barcos similares. El ruido producido por los tres barcos ya fuera por enmascaramiento o por saturación de chasquidos, no causó que el algoritmo KERNO del software del C-POD no pudiera clasificar chasquidos como series de chasquidos de delfines. Se compararon los promedios de las variables acústicas de estas series de chasquidos con otras registrados de esta especie de delfines sin presencia de barcos, los promedios fueron muy similares. No se pudo obtener las firmas acústicas de barcos y de embarcaciones menores, pero se comprobó que el ruido antropogénico producido por ambas fuentes no afecta la capacidad del software del C-POD para identificar las series de chasquidos de delfines.

Concluyo que la presencia de las embarcaciones en el área de estudio a través del registro de los chasquidos producidos por ecosonda que se usó en este estudio (2011 a 2015), ha sido registrada y clasificada correctamente por el algoritmo KERNO del C-POD. Por lo tanto, los chasquidos de ecosonda se incluyeron en el análisis como una variable que puede afectar la detección acústica de vaquita.

2.4.3. Características de las series de chasquidos de delfines.

Para la caracterización de las variables acústicas de las series de los chasquidos de delfines se registraron 17 avistamientos de delfines en el Alto Golfo de California durante agosto de 2013 a marzo de 2014. Solo se avistaron dos especies de delfines, el delfín común de rostro largo y los tursiones. El delfín común fue registrado más frecuentemente, ya que representó el 82.35% del total de los avistamientos. Esto se vio reflejado en la mayor cantidad de chasquidos y de series de chasquidos para esta especie (Tabla 3).

Otro factor que afectó la cantidad de series de chasquidos registrados por el delfín común de rostro largo es que estos se encontraron en grupos mucho más grandes que los tursiones. El promedio del tamaño de grupo de los delfines comunes fue de 246.42 animales y de los tursiones 9.33 (Tabla 3). Debido a que la ecolocación de los delfines es unidireccional, la probabilidad de que el C-POD pueda registrar las series de chasquidos aumenta en grupos de delfines con mayor cantidad de individuos.

Tabla 3. Resumen de datos usados para obtener las características acústicas de las series de chasquidos de los delfines.

	Delfín común de rostro largo	Tursiones
Número de avistamientos	14	3
Promedio y desviación estándar de tamaño de grupo	246 (315)	9 (4)
Número de series de chasquidos	823	14
Número de chasquidos	12,215	275

Durante los avistamientos de delfines, los C-PODs pudieron almacenar datos acústicos en bruto en 16 archivos en formato CP1. Para buscar eventos de delfines, se corrió la rutina de identificación de series (clasificador KERNO) en los archivos CP1 que clasificó a las señales con características acústicas de delfines. Esta rutina creó otros archivos con la información procesada llamado CP3. En tres archivos CP3 el clasificador KERNO no arrojó series de chasquidos etiquetadas como delfines o en la colecta de datos *in situ* los delfines no emitieron chasquidos de ecolocación. Se clasificaron 6,764 chasquidos de delfines pertenecientes a delfín común de rostro largo distribuidos en 442 series de chasquidos.

En el caso de los tursiones, el clasificador arrojó solamente 14 series de chasquidos y 275 chasquidos etiquetados como delfines pertenecientes a esta especie de delfín. Los valores de las variables acústicas de los chasquidos se extrajeron del software del C-POD en formato de texto para caracterizar las firmas acústicas de las dos especies de delfines. Cada archivo de texto tiene información detallada de cada clic como fecha y tiempo, número de ciclos, nivel de presión de sonido, frecuencia (en kHz), ancho de banda, frecuencia final de la serie de chasquidos (kHz) y la etiqueta para indicar a que serie pertenece cada clic. El intervalo de tiempo entre cada clic detectado por el C-POD se calculó como la diferencia de tiempo entre cada clic (Figura 8).

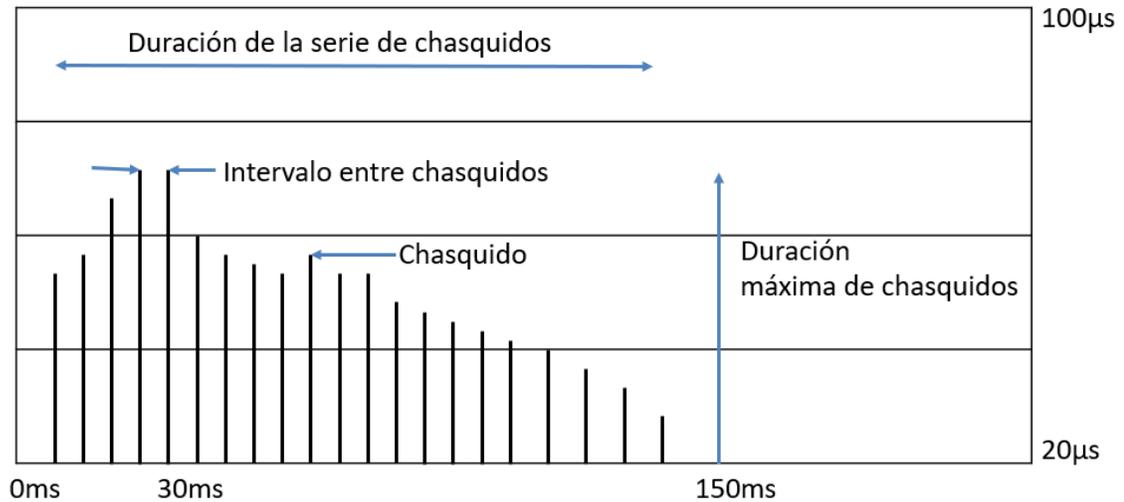


Figura 8. Diagrama de una serie de chasquidos de delfín donde se muestran los chasquidos, el intervalo entre chasquidos y su duración. Modificado de Philpott y colaboradores (2007).

En la tabla 4 se resumen los valores promedio y desviaciones estándar de cada variable acústica.

Tabla 4. Parámetros acústicos de tursiones y delfín común de rostro largo basado en las series de chasquidos colectados *in situ* en el Alto Golfo de California. Todos los valores son la media y la desviación estándar.

Parámetros acústicos	<i>D. d. bairdii</i> N = 823	<i>T. truncatus</i> N = 14	Delfines N = 837
Frecuencia (kHz)	62.91 (±13.95)	88.43 (±19.19)	63.69 (±14.78)
Moda frecuencia (kHz)	71.77 (±16.54)	93.92 (±34.85)	72.14 (±17.21)
Frecuencia mínima (kHz)	62.01 (±16.66)	49.14 (±20.42)	61.8 (±16.68)
Frecuencia máxima (kHz)	82.48 (±21.79)	123.42 (±26.13)	73.16 (±22.48)
Intervalo inter chasquidos (ms)	20.27 (± 40.25)	77.33 (±73.49)	22.0 (±42.68)
Duración de las series de chasquidos (ms)	235.37 (±752.06)	1,494.24 (±1,877.55)	256.43 (±798.14)
Duración (promedio de número de ciclos de los chasquidos de la serie)	5.73 (±1.22)	5.57 (±1.08)	5.72 (±1.21)
Chasquidos por segundo	348.49 (±304.93)	71.78 (±137.93)	343.86 (±304.92)

La Tabla 4 muestra que, el promedio de la frecuencia de los chasquidos fue mayor en los tursiones (88.43 kHz). La frecuencia mínima de las dos especies de delfines fue muy similar pero la frecuencia máxima fue más grande en el tursión (123.42 kHz). Lo mismo ocurrió en los valores promedio del intervalo entre chasquidos y la duración de la serie de chasquidos. Los valores promedio fueron muy similares para la variable acústica de número de ciclos. Por último, la única variable donde el delfín común de rostro largo presentó valores promedio mucho más altos fue en los chasquidos por segundo. En casi todas las variables los valores de las desviaciones estándar fueron altos (Tabla 4).

2.4.4. Validación de las series de chasquidos de delfines.

El algoritmo estimó 5.9% de falsos negativos en el conjunto de datos de las series de chasquidos de delfines colectados durante las salidas de campo. Por lo tanto, la precisión del algoritmo fue de un 94.1%.

El algoritmo estimó una tasa de 19.4% de falsos positivos en las series de chasquidos clasificados como “otros cetáceos”. Aunque nuestro tamaño de muestra de series de chasquidos para validar las series de delfines de chasquidos fue bajo (3%, 3601) en comparación con el total registrado (120,038 trenes de chasquidos, Tabla 2) estamos seguros de la precisión de la tasa de falsos positivos. Durante el análisis del programa de monitoreo acústico de la vaquita, todas las series de chasquidos clasificadas como marsopas (104,843 series de chasquidos, Tabla 2) fueron inspeccionadas y validadas visualmente en la pantalla. El 31 de octubre de 2013 pudimos probar de manera fortuita el rendimiento de KERNO durante condiciones de ruido antropogénico. Registramos chasquidos de ecolocalización de delfines durante un encuentro de dos grupos de delfines comunes (unos 20 individuos por grupo). Los delfines seguían a dos camaroneros entre si menos de 600 m, para alimentarse potencialmente de la captura de acompañamiento descartada por los pescadores. A pesar de la proximidad, 50 a 1,000 m, de los C-POD a la fuente de ruido el algoritmo KERNO clasificó 65 series de chasquidos como delfines. Por lo tanto, el clasificador KERNO funcionó adecuadamente para identificar las series de chasquidos emitidas por los delfines.

2.5 Discusión

2.5.1. Limitaciones en la detección de series de chasquidos de ecolocalización de delfines.

Según Au (1993), los tursiones usan la ecolocalización principalmente cuando se alimentan o viajan, y en menor medida cuando socializan y descansan. Dado que las señales de ecolocalización de los delfines son altamente direccionales, solo las vocalizaciones dirigidas hacia un detector acústico tendrán la posibilidad de ser registradas (Nuuttila *et al.*, 2017). Durante nuestras salidas de campo, fuimos testigos probables de estas limitaciones. Varias veces, cuando colocamos en la columna de agua el arreglo de C-PODs frente a grupos de delfines que viajaban, no registramos una sola serie de chasquidos, a pesar de que los animales nadaron y pasaron directamente más allá del arreglo de C-PODs. En contraste, cuando colocamos el arreglo de C-PODs cerca de grupos de delfines (delfines comunes y tursiones) alimentándose en la superficie, pudimos grabar series de chasquidos de ecolocalización.

Las señales de alta frecuencia de los odontocetos se atenúan rápidamente y, sólo son detectables a unos pocos cientos de metros del detector acústico (Philpott *et al.*, 2007; Rayment *et al.*, 2009). Un estudio en Cardigan Bay con C-POD reportó una distancia de detección máxima que varía de 1,343 a 1,749 m para tursiones (Nuuttila *et al.*, 2017). En una evaluación del rendimiento del C-POD en New River, Carolina del Norte, se detectaron las series de chasquidos de ecolocalización de tursiones a una distancia máxima de 933 m (Roberts y Read, 2015). No encontramos registros en la literatura de rangos de detección de distancia de los C-POD para delfines comunes, pero es probable que sea inferior a los 4,500 m de distancia que hubo entre nuestros sitios de muestreo. Para ambas especies de delfines, por lo tanto, hubo grandes espacios entre los C-POD donde no se pudo detectar la actividad acústica.

La actividad acústica de las dos especies de delfines no pudo separarse. A pesar de esto, sugerimos que por dos razones la mayoría de los chasquidos registrados en nuestro estudio fueron delfines comunes de rostro largo más que tursiones. Primera, los delfines comunes de rostro largo se encontraron con más frecuencia que los tursiones en nuestras salidas de campo en el Refugio Vaquita. En salidas de campo con mayor esfuerzo de búsqueda que las nuestras, realizadas entre febrero y mayo de 1986 a 1988 también documentaron que los delfines comunes eran los cetáceos más frecuentes en el norte del Golfo de California a más de 11 km de la costa (Silber *et al.*, 1994), que es el área donde se ubicaron los C-POD. Los mismos autores reportaron que el 80% de los avistamientos de tursiones se distribuyeron a menos de 10km de distancia a la costa. La distancia más cercana a la costa de nuestros sitios de muestreos fue de 12 km, lo que aumenta la probabilidad de que la mayoría de las series de chasquidos de delfines registrados

en los C-PODs pertenezcan a delfines comunes de rostro largo. Segunda, los grupos más grandes de delfines comunes aumentaron la probabilidad de registrar chasquidos de ecolocación cuando un grupo de delfines busca sus presas y están cerca de un detector acústico. Los resultados de este estudio y el de Silber y colaboradores (1994), encontraron que el tamaño promedio del grupo era de aproximadamente 250 individuos para los delfines comunes y aproximadamente 10 para los tursiones.

Al igual que los estudios de vaquitas realizados por Taylor y colaboradores (2017) y Thomas y colaboradores (2017), asumimos que no hay razones para esperar cambios sistemáticos en el nivel de presión del clic, la propagación del clic o cambios en el ruido de fondo entre los años que pudieran afectar la detección de series de chasquidos de delfines, y que los factores que pueden afectar el comportamiento acústico de los delfines, como la fase lunar o los ciclos de marea, se equilibraron entre años porque el muestreo se realizó durante los mismos 62 días calendario cada año.

2.5.2. Validación de series de chasquidos de delfines.

Se comprobó la verosimilitud de que las señales tipo "otros cetáceos" eran efectivamente delfines. En lugar de inspeccionar visualmente una muestra aleatoria de series de chasquidos de delfines para validar la clasificación del algoritmo KERNO y así estimar la tasa de falsos positivos. Se desarrolló un algoritmo simple de rendimiento aceptable. Los valores promedio de duración de los ciclos fueron similares a los valores obtenidos para delfines comunes (6.0 ciclos) y tursiones (5.27 ciclos) en Broadhaven Bay, Irlanda (Robbins *et al.*, 2015). Además, la selección de clasificaciones por KERNO de series de chasquidos de calidad alta y moderada de "otros cetáceos" probablemente aumentó la posibilidad de que nuestro algoritmo evitará identificar más falsos positivos.

Es posible que el rendimiento del algoritmo KERNO pueda ser diferente dependiendo del ruido de fondo específico de cada sitio de muestreo y, posiblemente haya afectado el rendimiento de nuestro algoritmo. De acuerdo con Nuutilla y colaboradores (2013), se espera una tasa baja de falsos positivos de series de chasquidos cuando el ruido de fondo es bajo e incluso las series de chasquidos de baja calidad (asignados por KERNO) tienen una alta probabilidad de ser clasificados como señales verdaderas positivas de delfines. Los mismos autores sugirieron que la interferencia de otras fuentes de sonido también puede afectar el rendimiento de la detección de series de chasquidos. Robbins y colaboradores (2015) descubrieron que la precisión de las clasificaciones y las clases de calidad de las clasificaciones de KERNO eran específicas del

sitio. En nuestra área de estudio, el ruido de fondo es probablemente alto debido a diferentes fuentes biológicas (presencia de camarones del género *Alpheus*, peces, etc.), físicas (transporte masivo de sedimentos suspendidos en el Alto Golfo de California) y antropogénicas (barcos de pesca). El transporte de sedimentos es el resultado de la fuerte mezcla de mareas del Alto Golfo de California (Argote *et al.*, 1995). Según Lavín y Marinone (2003), durante las mareas bajas, el rango de mareas es de 6.4 m (1.7 m) y las corrientes de marea son de aproximadamente 0.5 ms⁻¹ (0.1 ms⁻¹ - 1). Para poder eliminar fuentes antropogénicas pudimos probar de manera oportunista el rendimiento de C-POD como se explicó anteriormente.

Otros estudios han documentado tasas bajas de falsos positivos de series de chasquidos clasificados como delfines por el algoritmo KERNO. En un estudio hecho en New River, Carolina del Norte, Roberts y Read (2015) descubrieron que los C-POD arrojaron un número pequeño de detecciones falsas, con tasas de falsos positivos que variaron entre 1% y 4%, y en general el algoritmo KERNO trabajó con alta precisión (72%–91%). También en otros estudios con C-PODs, se han reportado bajas tasas de falsos positivos para los delfines de Héctor (Rayment *et al.*, 2009) y marsopas de puerto (Kyhn *et al.*, 2012). En el estudio de Robbins y colaboradores (2015) desarrollaron parámetros acústicos basados en las series de chasquidos de tres especies de delfines (delfín común, tursiones y delfín de Risso (*Grampus griseus*) para verificar las detecciones de delfines de los C-POD. Los autores documentaron una tasa de falsos positivos del 68% para las tres clases de calidad (alta, moderada y baja) de detecciones de delfines KERNO.

En nuestro estudio, una limitación de nuestra firma de delfines fue el tamaño pequeño de muestra de las series de chasquidos de delfines colectados durante los avistamientos. Los valores de rango de la firma de delfines (moda de la frecuencia y duración) podrían estar sesgados porque es posible que no hayamos recopilado suficientes datos de las series de chasquidos usados para navegar para comportamientos de alimentación. Además, nuestra firma se basó principalmente en delfines comunes, y esto potencialmente sobreestimó nuestra tasa de falsos positivos, ya que no sabemos si los tursiones son más abundantes que los delfines comunes durante el verano en el Refugio de la Vaquita. A pesar de las limitaciones, sugerimos que nuestra tasa falsa positiva de delfines fue moderada (19.4%) en comparación con otros estudios. Asumimos que nuestros resultados basados en las series de chasquidos de delfines clasificados por KERNO son confiables para inferir la distribución de la actividad acústica de ecolocación de delfines.

Capítulo 3. Análisis espacial y temporal de la actividad acústica de delfines¹

3.1. Introducción

El Alto Golfo de California es una de las regiones marinas biológicamente más productivas del mundo (Brusca *et al.*, 2017). Esta zona es muy importante para la pesca artesanal en México (Rodríguez-Quiroz *et al.*, 2010). La pesca de arrastre de mediana altura y la pesca deportiva recreativa también se realiza en esa región (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998). La pesca intensiva con redes de enmalle (Rodríguez-Quiroz *et al.*, 2012) y la pesca ilegal (CIRVA, 2016) se traslapa con la distribución de los cetáceos en el Alto Golfo de California, lo que aumenta la probabilidad de mortalidad por captura incidental o la alteración del uso del hábitat. Por lo tanto, el conocimiento básico de los patrones de distribución espacial y temporal es importante para el manejo y la conservación de los cetáceos en esta área.

El Alto Golfo de California es el hábitat del mamífero marino más amenazado del mundo, la vaquita (*Phocoena sinus*) (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2017). En esta región se crearon dos áreas marinas protegidas: la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (DOF, 1993) y el Refugio para la Protección de la Vaquita (DOF, 2005). La Reserva fue creada para proteger los ecosistemas, la biodiversidad y las especies ecológicas y comercialmente importantes, endémicas o en riesgo de extinción. El Refugio fue creado específicamente para conservar y proteger la vaquita. Históricamente, la población de vaquitas ha disminuido debido a la captura incidental insostenible en redes de enmalle (Jaramillo-Legorreta, 2008; Rojas-Bracho y Reeves, 2013). Como parte del plan de recuperación de la vaquita, el gobierno mexicano implementó un Programa de Monitoreo Acústico Pasivo en el Refugio de la Vaquita para estimar la tendencia de la población y mejorar o reforzar las acciones de conservación (Rojas-Bracho *et al.*, 2010). El diseño experimental del Programa consiste en 46 sitios de muestreo para grabar chasquidos de ecolocación de vaquita con detectores acústicos autónomos conocidos como C-POD. El Programa comenzó en 2011 y ha documentado la disminución drástica de las vaquitas debido a la captura incidental en las actividades de pesca legal y, en los últimos años, en la pesca ilegal intensiva de totoaba (*Totoaba macdonaldi*) (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2017; Thomas *et al.*, 2017; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2019).

¹ Publicado en revista PeerJ: Cárdenas-Hinojosa, G., De la Cueva H., Gerrodette, T., y Jaramillo-Legorreta, A.M. 2020. Distribution of the acoustic occurrence of dolphins during the summers 2011 to 2015 in the Upper Gulf of California, Mexico. PeerJ 8:e9121 <https://doi.org/10.7717/peerj.9121>

Los C-POD son detectores de monitoreo acústico pasivo estático equipados con hidrófonos omnidireccionales sensibles para grabar chasquidos de ecolocalización con frecuencias entre los 20 a los 160 kHz. Los detectores se pueden usar para monitorear vocalizaciones de odontocetos, como los chasquidos de ecolocalización de alta frecuencia de banda estrecha (120–140 kHz) y los chasquidos de ecolocalización de delfín de frecuencia media (30–60 kHz). Estos dispositivos también registran los chasquidos de ecosonda de barcos (Tregenza *et al.*, 2016). Los C-POD se han utilizado ampliamente en estudios ecológicos de marsopas y delfines en todo el mundo, incluidos estudios de la interacción de marsopas de puerto (*Phocoena phocoena*) y toninas (*Tursiops truncatus*) (Jacobson *et al.*, 2015), variaciones espaciales y temporales en tursiones del Indo-Pacífico (*Tursiops aduncus*) y delfines jorobados del Océano Índico (*Sousa plumbea*) (Temple *et al.*, 2016), distribución de la población de marsopas del puerto báltico (Carlén *et al.*, 2018), y estudios con múltiples especies de delfines para categorizar o describir parámetros de sus trenes de clic (Robbins *et al.*, 2015; Palmer *et al.*, 2017).

La literatura sobre la distribución de delfines en el norte del Golfo de California es escasa. En esta área, los odontocetos más comúnmente documentados son tursiones y delfín común de rostro largo (*Delphinus delphis bairdii*), aunque las orcas (*Orcinus orca*) se han registrado cuatro veces y las orcas falsas (*Pseudorca crassidens*) una vez (Silber *et al.*, 1994; Henry *et al.*, 2012; CIRVA, 2016). Este trabajo es el primer estudio de monitoreo acústico de delfines en el norte del Golfo de California, con datos recopilados cada verano entre 2011 y 2015. Describimos patrones diarios de actividad acústica y la distribución de delfines en función de las tasas de chasquidos de ecolocalización. Este estudio proporciona información de línea base robusta para los planes futuros de manejo y conservación de delfines en el Alto Golfo de California.

3.2. Objetivos

- ❖ Describir la distribución espacial y temporal de la ocurrencia acústica de los delfines en el Refugio de la Vaquita.

- ❖ Analizar la ocurrencia acústica de los delfines en relación con variables espaciales, temporales, biológicas y antropogénicas en el Refugio de la Vaquita.

3.3. Métodos

3.3.1. Análisis de la distribución de la ocurrencia acústica de delfines.

Las tasas de detección acústica se calcularon utilizando conteos de chasquidos, independientemente del número de series de chasquidos detectados. Las series incluidas en el análisis tuvieron como mínimo 5 chasquidos. Se utilizó la métrica chasquidos promedio por día por sitio de muestreo para describir los patrones de distribución de los delfines entre los sitios de muestreo. Se calcularon los patrones circadianos de la actividad acústica de ecolocalización de delfines usando una hora como unidad de tiempo. Para examinar los efectos de las condiciones de luz en la ecolocalización de delfines, cada día de muestreo se dividió en períodos diurno y nocturno establecidos a través de las horas de salida y puesta del sol (redondeadas a la hora más cercana) para la ubicación de San Felipe obtenida con el software Mar v10 (<http://predmar.cicese.mx/>). Del 19 de junio al 19 de agosto, el tiempo promedio de salida del sol para los períodos de muestreo de 2011 a 2015 fue 04:50:18 y el tiempo promedio de puesta de sol fue 18:39:21.

Los chasquidos por hora del día no se distribuyeron normalmente (Lilliefors, $p < 0.05$). Por lo tanto, las diferencias de esta variable entre los sitios de muestreo, la hora del día y entre las condiciones de luz diurna y nocturna se probaron con el análisis de varianza unidireccional de Kruskal-Wallis. Se usó la función `dunnTest` en R, con corrección de Bonferroni, para aplicar una prueba *a posteriori* de comparación múltiple de medias Dunn (Zar, 1999). En todos los análisis, un valor de $p < 0.05$ se consideró significativo.

Se utilizaron modelos lineales generalizados (GLM por sus siglas en inglés) para describir la ocurrencia acústica de delfines en relación con variables espaciales, temporales, oceanográficas, antropogénicas y biológicas. Las variables espaciales explicativas fueron los sitios de muestreo y su ubicación (latitud y longitud, en coordenadas UTM) (Tabla 5). Para evitar sesgos, eliminamos los datos de los sitios de muestreo 12 y 18 de este análisis; no había datos disponibles en al menos tres temporadas de campo debido a la pérdida de anclajes con C-POD (Anexo A). Las variables explicativas temporales fueron la temporada de muestreo, la hora del día y el período día / noche. Las variables oceanográficas fueron la temperatura a 10 m bajo la superficie de la mar registrada por un sensor de los C-POD y el componente de velocidad vertical de la marea. Esta última variable se calculó por la hora del día promediando la diferencia de las alturas de las mareas cada cinco minutos durante el período de estudio. La presencia acústica de vaquitas fue la única variable biológica considerada en el análisis. Los chasquidos del sonar del barco se incluyeron como la variable explicativa antropogénica. La variable de respuesta fue el conteo de

los chasquidos de ecolocalización de delfines por hora (Tabla 5). Todas las variables explicativas de la base de datos se calcularon u organizaron en períodos de una hora.

Tabla 5. Descripción y tipo de variables usadas para analizar la ocurrencia acústica de los delfines en el Refugio de la Vaquita.

Variable	Descripción	Tipo
Chasquidos de delfines	Conteo de chasquidos de delfines en una escala de una hora	Respuesta
Sitio	Etiqueta de número de sitio	Categórica
Ubicación de los sitios	Ubicación de los sitios de muestreo en UTM (este y norte)	Continua
Día/noche	Periodo día y noche	Categórica
Mes	Mes del periodo de muestreo	Categórica
Temporada de muestreo	Año de la temporada de muestreo	Categórica
Chasquidos de vaquita	Conteo de los chasquidos de vaquitas en una escala de una hora	Discreta
Chasquidos de sonar	Conteo de los chasquidos de ecosondas de embarcaciones en una escala de una hora	Discreta
Profundidad	Profundidad de los sitios de muestreo (m)	Continua
Temperatura del mar	Temperatura promedio por hora a 10 m debajo de la superficie del mar (°C)	Continua
Marea	Velocidad vertical promedio de la marea (mm/min) en una hora	Continua

Se buscaron valores atípicos y correlaciones entre las variables explicativas a través del análisis del coeficiente de correlación de Pearson. Utilizamos el software R (R core team, 2018) y el paquete de estadística glm () (Chambers y Hastie, 1992) para aplicar el modelo GLM. Se especificó una familia binomial negativa con una función de enlace logístico usando la función glm.nb () del paquete MASS (Venables y Ripley, 2002). El mejor modelo (combinación de variables explicativas) se seleccionó utilizando el Criterio de Información de Akaike (AIC). Para analizar la ocurrencia acústica modelada por temporada de muestreo, se dividió la base de datos por temporada, y se calcularon las predicciones de conteo de chasquidos de delfines por hora del mejor modelo usando la función de predicción () del paquete car en R (Fox y Weisberg, 2019). Se calcularon tasas de chasquidos predichas en cada sitio por temporada de muestreo para visualizar los patrones espaciales modelados para la actividad de delfines. La escala de las tasas de chasquidos predichas se cambió a escala de día para fines comparativos (chasquidos / día).

3.4. Resultados

3.4.5. Patrones circadianos

Encontramos diferencias significativas en la actividad acústica de los delfines entre el día y la noche (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$). El promedio fue de 9.8 chasquidos / hora (SD = 143.4) durante la noche, y 2.1 chasquidos / hora (SD = 57.2) durante el día.

Los promedios de los chasquidos por hora mostraron un patrón claro con un pico a las 21:00 horas (Figura 8). Debido al exceso de ceros en el conteo de chasquidos por hora, la mediana de los chasquidos por hora fue cero. La prueba de Kruskal Wallis indicó que las diferencias en la actividad acústica por hora del día fueron significativas ($p < 0.05$). La prueba de Dunn mostró diferencias significativas en los rangos de tiempo de 2000 a 0300 horas y de 0400 a 1900 horas ($p < 0.05$). La tasa de chasquidos promedio de delfines fue de 10.9 chasquidos / hora (SD = 144.6) para los rangos de tiempo de 2000 a 0300, y 2.65 chasquidos / hora (SD = 61.7) durante las 0400 a 1900 horas (Figura 9). Este último fue el rango con la mayoría de las horas con luz diurna de acuerdo con el promedio de horas promedio de puesta y salida del sol para el período de estudio.

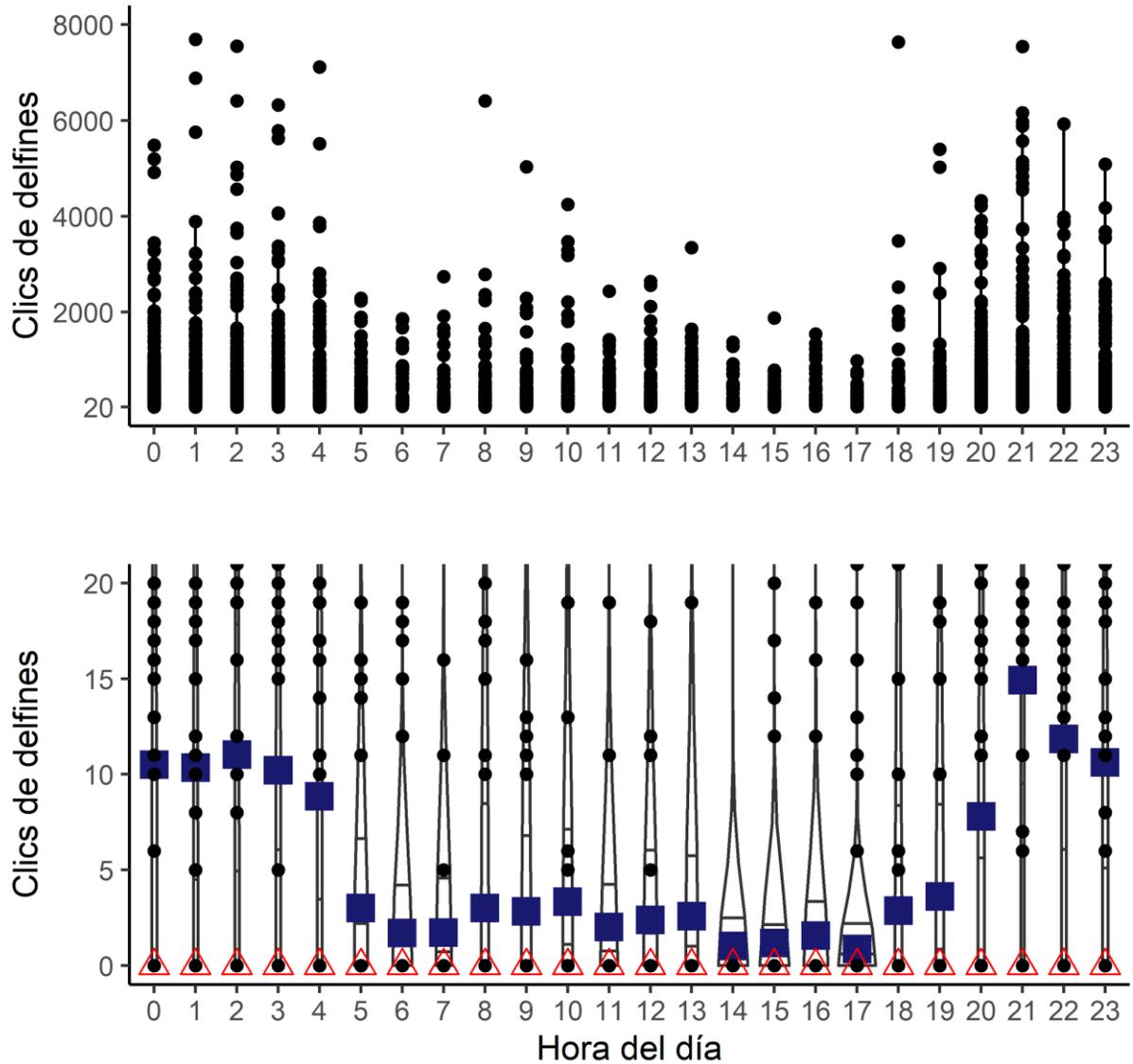


Figura 9. Chasquidos de los delfines registrados por hora del día durante el periodo de estudio. El cuadro azul indica la media y el triángulo rojo la mediana. La figura inferior muestra en el eje y los datos con un rango de 0 a 20 chasquidos y la superior los muestra con un rango de eje y de 20 a 8,000 chasquidos.

3.4.6. Distribución de las tasas de detección de los delfines

El patrón espacial de las tasas de chasquidos varió entre años (Figura 10). Durante la temporada de muestreo de 2011, hubo baja actividad acústica (0 a 25 chasquidos / día) principalmente en la esquina noroeste del Refugio de Vaquita, mientras que en 2012 la baja actividad se distribuyó de manera casi homogénea entre los sitios de muestreo. Durante las temporadas 2013, 2014 y 2015, los valores más bajos

se ubicaron principalmente en la esquina noroeste del área de estudio. En general, en las temporadas de muestreo 2011-2015, los sitios con un promedio de chasquidos superiores a 100 chasquidos por temporada se concentraron principalmente a lo largo del borde oriental del Refugio. De 2011 a 2014, no hubo datos disponibles para 16 sitios de muestreo porque los anclajes o los C-PODs fueron robados o vandalizados. Solo durante 2015, no se perdieron C-PODs (Anexo A).

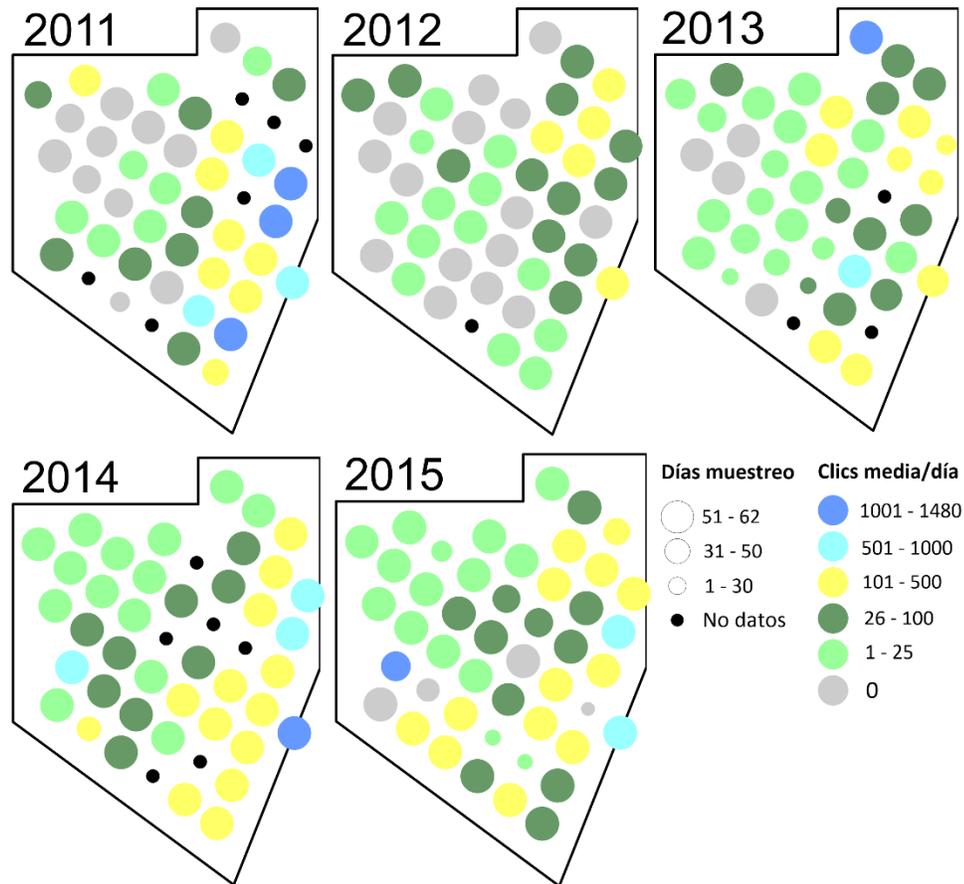


Figura 10. Tasas de detección de chasquidos de ecolocación de delfines obtenidas durante las temporadas de muestreo. El tamaño de los círculos indica los días de muestreo de grabación obtenidos por los detectores acústicos por sitio de muestreo y cuando el anclaje o el C-POD fue perdido por actividades ilegales de pesca o por vandalismo. El rango de colores indica las tasas de detección acústica por día.

La media general de la tasa de chasquidos de ecolocación por día para todas las temporadas de muestreo fue de 5.4 (DE = 103.12). Las tasas medias de chasquidos por día para cada temporada fueron 8.08 para 2011, 1.72 para 2012, 4.43 para 2013, 7.84 para 2014 y 5.33 chasquidos / temporada para 2015. Las tasas

anuales fueron estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) entre cada par de años (Dunn, $p < 0.05$), excepto la comparación entre 2013 y 2015 ($p > 0.05$).

3.4.7. Modelo de ocurrencia acústica de delfines.

3.4.7.1. Exploración de datos.

Los datos se inspeccionaron visualmente con diagramas de caja. Se calculó que la variable respuesta, chasquidos de delfines por hora, estaba representada por un 99% de ceros. En esta variable, también se encontró cinco valores extremos ($> 8,000$ chasquidos / hora) y estos valores atípicos se eliminaron de la base de datos. Por el número de ceros encontrados, se decidió modelar el conteo de chasquidos de delfines en relación con las variables explicativas con una distribución binomial negativa. Antes de aplicar el modelo lineal generalizado, también se exploró la colinealidad de las variables explicativas para evitar información redundante sobre la variable respuesta. El coeficiente de correlación de Pearson entre las variables UTM este y profundidad fue alto (0.69) y estadísticamente significativo ($p < 0.05$), y por lo tanto, se eliminó la variable UTM este como una variable explicativa (Figura 11).

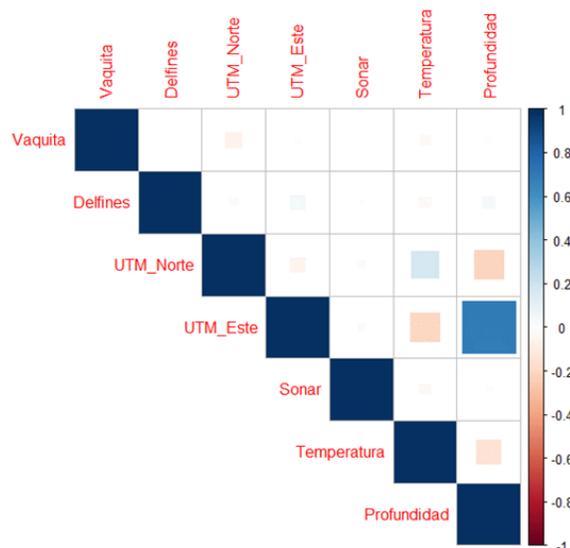


Figura 11. Valores de coeficiente de correlación de Pearson entre las variables predictoras. El eje de la y muestra una paleta de colores en los que se indica el valor del coeficiente.

3.4.7.2. Resultados de los modelos lineales generalizados

La formulación de combinaciones de variables explicativas dio como resultado 26 modelos lineales generalizados (Anexo B). Quince de estos modelos convergieron. La Tabla 6 muestra los valores de AIC de estos modelos. El modelo con el AIC más bajo (73,889) incluyó la interacción del sitio de muestreo con la variable condición día-noche, más la variable velocidad vertical de la marea. Otro modelo con valor muy similar de AIC (73,981) también arrojó la interacción de las variables sitio de muestreo y condición día-noche más la interacción de velocidad vertical de la marea rápida y profundidad del sitio de muestreo. Sin embargo, se seleccionó como modelo final el que arrojó menos variables y valor más bajo de AIC para obtener un modelo más simple para el conteo de chasquidos de ecolocalización de delfines. Los modelos que solo incluyeron variables espaciales (sitio de muestreo), temporales, biológicas, oceanográficas, condición día-noche o antropogénicas arrojaron un mal desempeño, lo que indicó que ninguno de estos modelos por sí solo es adecuado para explicar la actividad acústica de los delfines (Tabla 6). Todos los modelos con valores más bajos de AIC incluyeron las variables sitio de muestreo y condición día-noche, lo que indicó que estas dos variables son clave para comprender la distribución de la actividad acústica de los delfines.

Tabla 6. Combinación de fórmulas de las variables de los modelos lineales generalizados para el conteo de los chasquidos de ecolocalización de delfines. Se muestra el valor AIC para cada modelo. Las interacciones entre las variables predictoras se representan con una “x”.

Modelos	AIC
Variable respuesta: Conteo de chasquidos de delfines por hora.	
Sitio × Día-noche + Marea	73889
Sitio × Día-noche + Marea × Profundidad	73891
Sitio + Hora del día + Marea	73952
Sitio + Hora del día + Profundidad	73694
Sitio + Hora del día + Profundidad + Día-noche	73694
Día-noche + Vaquita + Marea + Sitio	73966
Sitio + Día-noche	73982
Sitio + Día-noche + Marea	74210
Sitio + Marea	74210
Sitio	74225
Variables temporales	74381
Variables biológicas y oceanográficas	74486
Día-noche × Marea	74531
Día-noche	74540
Variable antropogénica (chasquidos de sonar)	74677

La actividad acústica de los delfines predicha por el mejor modelo y el promedio de las tasas de chasquidos observadas durante las cinco temporadas de muestreo mostraron distribuciones espaciales muy similares, con la mayoría de los valores más altos en el lado este del Refugio de Vaquita (Figura 12). Esto sugirió un ajuste robusto del modelo a los datos observados.

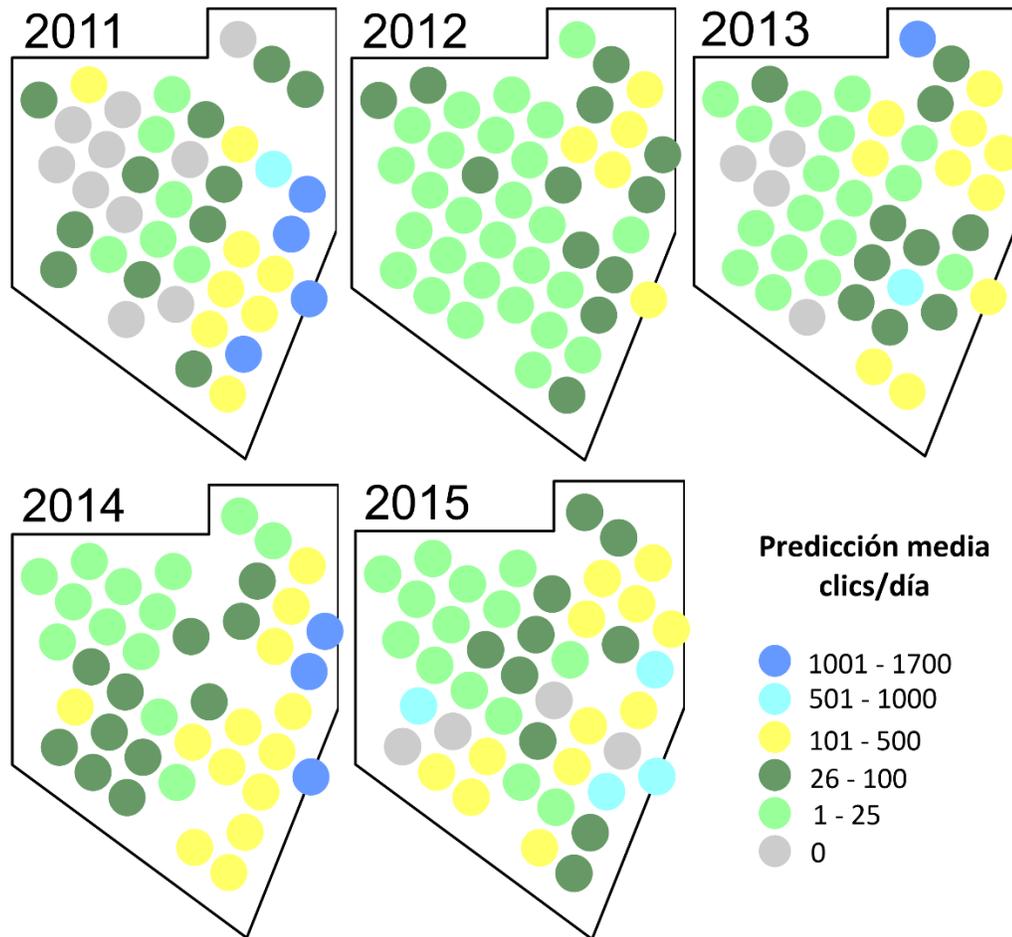


Figura 12. Distribución espacial de la ocurrencia acústica de los delfines en el Refugio de la Vaquita durante 2011 a 2015. El color de los círculos indica el rango de los valores de las tasas de predicción de chasquidos de delfines por día.

También se analizó gráficamente la actividad acústica de los delfines por condición día-noche y el efecto del componente de la velocidad vertical de la marea. Esto se examinó creando tres categorías de esta variable: baja ($0 - 0.005 \text{ m/s}$), moderada ($0.005 - 0.015 \text{ m/s}$) y alta ($0.015 - 0.03 \text{ m/s}$). Esto nos mostró que la mayor actividad de ecolocación (chasquidos predichos por día) de los delfines se encontró principalmente en los sitios de muestreo ubicados en el este del Refugio de la Vaquita y estuvo determinada por la condición nocturna independientemente de la velocidad vertical de la marea (Figura

13). Las tasas de chasquidos de delfines predichas para la velocidad vertical baja, moderada y alta de la marea fueron muy similares durante el día con las tasas de chasquidos más altas distribuidas en el este del Refugio de Vaquita como en la condición nocturna (Figura 13).

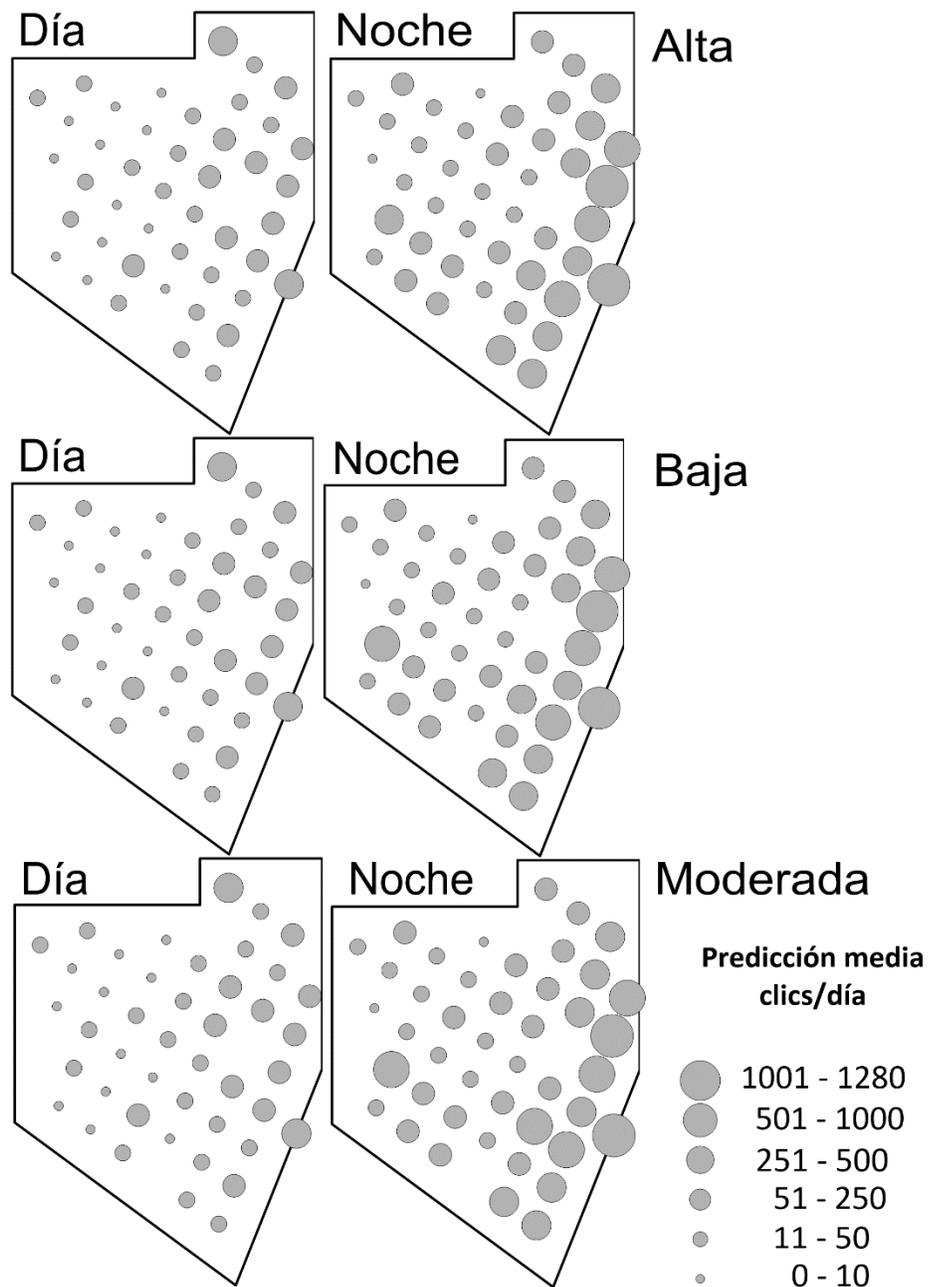


Figura 13. Tasas de predicción de chasquidos de delfines por condición del día (día y noche) y por velocidad vertical de la de la marea (alta, moderada y baja) obtenidas con el modelo final.

3.5. Discusión

El monitoreo acústico pasivo es un método de creciente importancia para el estudio de la distribución y ocurrencia de cetáceos. Este es el primer estudio sobre la distribución de delfines en México que usa monitoreo acústico pasivo sistemático a mediano plazo, y los resultados pueden contribuir a un mejor manejo del área natural protegida ubicada en el Alto Golfo de California, México. En esta región la actividad acústica de los delfines varió entre sitios muestreados, con una mayor actividad en la parte oriental del Refugio Vaquita. La actividad acústica fue mayor durante la noche que durante el día. El mejor modelo GLM para predecir la actividad acústica de los delfines incluyó a las variables sitio de muestreo, la condición de día o noche y la velocidad vertical de la marea. La distribución espacial de la actividad acústica predicha mostró un patrón similar a la distribución observada de la actividad acústica por temporada de muestreo. Los valores más altos predichos ocurrieron durante la noche, la variable velocidad vertical de la marea no fue relevante para la actividad acústica de los delfines durante la noche. Los patrones de actividad acústica obtenidos podrían estar relacionados con la disponibilidad de presas, ya que las series de chasquidos de ecolocación están asociados con actividades de alimentación y forrajeo de delfines (Cárdenas-Hinojosa *et al.*, 2020)

La mayor actividad acústica de los delfines registrada durante la noche concuerda con otros estudios donde se han examinado los chasquidos de ecolocalización de los delfines. Tregenza y colaboradores (2016) mencionaron que se han encontrado fuertes patrones circadianos, de marea y estacional del uso del hábitat de los animales, incluidos los sitios costeros que se usan regularmente solo por la noche. En un estudio de tursiones en Doubtful Sound, Nueva Zelanda, los zumbidos y la actividad de ecolocación en general fueron significativamente más comunes durante el amanecer y el anoecer, lo que sugiere la búsqueda de alimento crepuscular (Elliot, Dawson y Henderson, 2011). En siete áreas marinas protegidas del Mediterráneo español, una observación general en todos los sitios de muestreo del estudio fue la preferencia de los delfines por los períodos nocturnos (Castellote *et al.*, 2015). En otro estudio que utilizó C-POD en Menai Bay, Tanzania, el ciclo circadiano también fue la variable temporal más importante que influyó en la ocurrencia de delfines en los sitios de muestreo, con una probabilidad de ocurrencia en la noche significativamente mayor que durante la luz del día, el amanecer y el atardecer (Temple *et al.*, 2016).

Los tursiones producen series de chasquidos de ecolocalización principalmente durante la alimentación o el viaje, pero no tanto durante la socialización y el descanso (Au, 1993). Las vocalizaciones de los delfines comunes en el sur de California Bight tienen un patrón circadiano, ya que el comportamiento de alimentación se produjo principalmente de noche y el comportamiento de viaje y social durante el día

(Henderson *et al.*, 2012, Wiggins *et al.*, 2013). Por lo tanto, los resultados sobre la distribución de la actividad de ecolocalización de los delfines se basaron principalmente en su comportamiento de búsqueda de alimento de la presa de estos cetáceos. Desafortunadamente, no hay estudios sobre la dieta de los delfines comunes y tursiones en el Alto Golfo de California para analizar las distribuciones espacio-temporales de presas y depredadores (delfines). Este tipo de información es muy importante para tratar de entender por qué la variable de ubicación del sitio de muestreo, junto con la condición de día y noche, siempre se enumeró en la formulación de variables de los modelos con los valores más bajos de AIC (Tabla 6).

En algunos estudios se ha documentado que los tursiones tienen una dieta amplia de peces pelágicos y demersales (Walter, Potter y Macko, 1999; Santos *et al.*, 2007; Hernández-Milian *et al.*, 2015). Los calamares del género *Lolliguncula* también se han reportado como presas frecuentes en el contenido estomacal de los tursiones (Barros y Odell, 1990; Pate y McFee, 2012). Las presas de los delfines comunes incluyen principalmente cardúmenes de anchovetas y sardinas (Young y Cockcroft, 1994; Pusineri *et al.*, 2007; Garcia-Gobos *et al.*, 2007, Santos *et al.*, 2013). Mientras que en el Alto Golfo de California no hay actividad de pesca comercial de sardina y anchovetas, esta área es un importante lugar de desove para las anchovetas (*Anchoa spp*) (Sánchez-Velasco *et al.*, 2012). Las principales especies de peces de importancia comercial en la región son chano norteño (*Micropogonias megalops*), la sierra golfina (*Scomberomorus concolor*) y la curvina golfina (*Cynoscion othonopterus*) (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998; Rodríguez-Quiroz *et al.*, 2012). La distribución del calamar dedal (*Lolliguncula panamensis*) incluye todo el Golfo de California (Arizmendi-Rodríguez *et al.*, 2012), y podría ser presa de los tursiones. En el contenido estomacal de las vaquitas, se ha reportado el calamar dedal (*Lolliguncula spp*) y algunas especies de anchovetas en etapa adulta (Vidal, Brownell y Findley, 1999). Además, se sabe que los delfines comunes y los tursiones se alimentan de diferentes especies dependiendo de la disponibilidad de la presa (Evans, 1982; Blanco *et al.*, 2001).

La interacción de los delfines con las actividades humanas también podría afectar la distribución de los delfines y, por lo tanto, la detección de sus chasquidos de ecolocalización. Por ejemplo, los resultados de Castellote y colaboradores (2015) mostraron que las toninas preferían meses de baja intensidad de actividad recreativa, lo que sugiere que la presencia humana también podría desempeñar un papel importante en la temporalidad de las toninas. Según Lusseau (2004), la exposición de los delfines a las actividades humanas tiene un efecto de desplazamiento temporal en el comportamiento de estos animales. Sin embargo, en nuestro estudio no sugerimos que las actividades antropogénicas puedan tener un efecto potencial en la actividad de clic de ecolocalización de los delfines, ya que nuestro período de

estudio (19 de junio al 19 de agosto) estuvo dentro de la temporada baja de pesca en el Alto Golfo de California descrita por Cudney-Bueno y Turk-Boyer (1998). Por esta razón, el programa de monitoreo acústico se llevó a cabo durante esta temporada para evitar la pérdida potencial de equipo por vandalismo o actividades de pesca ilegal dentro del Refugio Vaquita. Además, tenemos claro que el registro de sonar de embarcaciones para inferir su presencia en nuestro estudio tenía la limitación de que las embarcaciones menores de pesca artesanal (pangas) comúnmente no usan un ecosonda para pescar. Sin embargo, los chasquidos de sonar se registraron en todas las temporadas de muestreo (Tabla 2). Se sabe que el uso de un ecosonda lo usan barcos de mediana altura (arrastreros), embarcaciones menores para pesca deportiva o embarcaciones de la naval mexicana en nuestra área de estudio.

Dado que la distribución espacial de los delfines, como la vaquita, se traslapa con la pesca legal e ilegal con redes de enmalle, la probabilidad de mortalidad por captura incidental es alta. Aunque los esfuerzos de inspección y vigilancia no han sido efectivos para evitar la mortalidad de las vaquitas, los esfuerzos deben continuar ya que otras poblaciones de cetáceos enfrentan las mismas amenazas. Durante las operaciones de patrullaje y / o eliminación de redes de enmalle ilegales en el Alto Golfo de California, la Procuraduría Federal para la Protección del Ambiente (PROFEPA), las organizaciones Sea Shepherd Conservation Society y el Museo de la Ballena y Ciencias del Mar, han documentado captura incidental de al menos 3 delfines comunes (*Delphinus spp*), 12 delfines comunes de rostro largo, 2 tursiones, 1 ballena barbada y 4 ballenas jorobadas (*Megaptera novaeangliae*) en redes de enmalle (principalmente para totoaba) durante el invierno de 2015 al invierno de 2020 (Tabla 7).

Tabla 7. Registro de cetáceos capturados de manera incidental en redes de enmalle en el Refugio de la Vaquita y en la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. La lista solo incluye registros de animales con el arte de pesca enredada aún en el cuerpo o animales con las extremidades mutiladas.

Fecha	Nombre común	Número	Ubicación y/o posición geográfica.	Fuente y comentarios
28/12/2015	Ballena jorobada	1	Refugio de la Vaquita	PROFEPA. Enmallado.
17/20/2016	Ballena jorobada	1	Refugio de la Vaquita	PROFEPA. Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Enmallado en red totoabera.
06/03/2016	Delfín común (<i>Delphinus spp</i>)	1	Reserva de la Biosfera 31° 31.26' N 114° 41.93' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Enmallado en red totoabera.
22/12/2016	Delfín común de rostro largo	1	San Felipe* 31° 1.468' N	PROFEPA. Varamiento. Aleta caudal mutilada

			114° 49.924' W	
29/12/2016	Tonina	1	San Felipe 30° 59.70' N 114° 49.246' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Varamiento. Enmallado en red totoabera.
02/01/2017	Tonina	1	Refugio de la Vaquita 31°07.6' N 114°42.8' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Aleta caudal mutilada
9/2/2017	Delfín común de rostro largo	1	Bahía San Felipe 30°59.225'N 114°45.781' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Aleta caudal, pectoral y dorsales mutiladas.
11/2/2017	Delfín común de rostro largo	1	Reserva de la Biosfera 31°07.62' N 114°47.24' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Enmallado con aleta caudal mutilada.
13/2/2017	Delfín común de rostro largo	1	Refugio de la Vaquita	PROFEPA. Aleta caudal, pectoral y dorsales mutiladas.
15/2/2017	Delfín común	1	San Felipe 31° 2.136' N 114° 49.604' W	CONANP. Varamiento. Enmallado.
17/2/2017	Ballena jorobada	1	Reserva de la Biosfera	PROFEPA. Enmallado en red totoabera.
21/2/2017	Delfín común de rostro largo	1	Reserva de la Biosfera 31° 15.88' N 114° 47.50' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Enmallado en red totoabera.
8/3/2017	Ballena barbada	1	Reserva de la Biosfera 31° 07.15' N 114° 48.014' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Enmallado en red totoabera.
22/3/2017	Delfín común de rostro largo	1	Reserva de la Biosfera 31° 24.15' N 114° 46.69' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Enmallado en red totoabera.
26/2/2019	Delfín común de rostro largo	1	Reserva de la Biosfera 31° 02.832' N 114° 48.788' W	Museo de la Ballena y Ciencias del Mar, A.C. Aleta caudal mutilada.
13/3/2019	Delfín común	1	Reserva de la Biosfera 31° 03.416' N 114° 44.654' W	Museo de la Ballena y Ciencias del Mar, A.C. Enmallado.
23/3/2019	Delfín común de rostro largo	1	Reserva de la Biosfera 31° 05.04' N	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Aleta caudal mutilada

			114° 46.32' W	
27/3/2019	Delfín común de rostro largo	2	Refugio de la Vaquita 31° 07.452' N 114° 45.587' W	Museo de la Ballena y Ciencias del Mar, A.C. Enmallado. Un delfín con aleta caudal mutilada y en otro con cicatrices de redes.
15/11/2019	Delfín común de rostro largo	1	Refugio de la Vaquita 31° 02.80' N 114° 25.87' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Enmallado en red totoabera.
26/1/2020	Delfín común de rostro largo	1	Refugio de la Vaquita 31° 04.332' N 114° 41.359' W	Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Enmallado en red totoabera.
23/2/2020	Ballena jorobada	1	Refugio de la Vaquita	PROFEPA. Sea Shepherd Conservation Society (Hidalgo y Sánchez, 2020). Enmallado en red totoabera.

* El poblado de San Felipe no está ubicado en la Reserva de la Biosfera, pero está en la misma latitud que el Refugio de la Vaquita (Figura 1).

La Reserva de la Biosfera se creó para proteger los ecosistemas, la biodiversidad y las especies que son ecológica y comercialmente importantes, endémicas o que están clasificadas como en riesgo de extinción (DOF, 1993). Los delfines comunes de rostro largo y las toninas están clasificadas en la categoría de protección especial en las regulaciones ambientales de México, con objetivos de protección, conservación y uso sostenible (DOF, 2010). Por lo tanto, los resultados de nuestro estudio sobre la distribución de delfines, que son los principales depredadores topes en el ecosistema, son relevantes para mejorar o fortalecer las decisiones de manejo para la conservación de vaquitas en la Reserva de la Biosfera, así como para una mejor conservación de las poblaciones de otros cetáceos en el Alto Golfo de California (Cárdenas-Hinojosa *et al.*, 2020).

Capítulo 4. Evaluación de la potencial afectación en la detección acústica de vaquita ocasionada por la presencia de delfines y por otras variables

4.1. Introducción

La monitorización acústica de la vaquita se ha realizado de manera sistemática desde 2011 a 2019 y los resultados sobre su tendencia de la población han sido publicados (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2016; Thomas *et al.*, 2017; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2019). A pesar de esto, se tiene que realizar más investigación para evaluar las variables que determinan o afectan la detección acústica de vaquita, con el fin de identificar potenciales fuentes de variación adicionales como diferencias espaciales en la tasa de detección acústica, por interacciones biológicas (delfines), físicas (mareas), y por interacciones antropogénicas (ruido de ecosondas de pangas y de barcos de arrastre), así como potenciales efectos de movimientos diferenciales entre años en la distribución de individuos dentro y fuera de la zona de muestreo. Por ejemplo, en relación las interacciones biológicas, se ha documentado que los tursiones (*Tursiops truncatus*) agreden físicamente a las marsopas de puerto (*Phocoena phocoena*) probablemente por competencia por presas, por conductas de juego para practicar peleas o por conductas infanticidas, logrando desplazarlas temporalmente de su hábitat u ocasionando la muerte de las marsopas. Esto ha sido documentado en el Fiordo de Moray, Escocia (Ross y Wilson, 1996), en Bahía Cardigan, Gales (Jepson y Baker, 1998) y en la Bahía de Monterey, California (Cotter *et al.*, 2012). En un estudio realizado con detectores acústicos en la costa entre Punta Concepción a Bahía de San Francisco, California, se calculó la presencia acústica relativa de marsopas de puerto y se evidenció que esta disminuyó o que las marsopas se desplazaron a otra área por la presencia acústica de los tursiones (Jacobson *et al.*, 2015). Con métodos acústicos también se ha documentado la coocurrencia de vocalizaciones e interacción de toninas y delfines comunes (*Delphinus spp.*) con *P. sinus* (Campos, 2012). Este estudio, basado en los datos colectados de 2001 a 2007 para el monitoreo de vaquita (Jaramillo-Legorreta, 2008), menciona en sus conclusiones que la distribución espacial de vaquita pudiera estar negativamente correlacionada con la presencia de delfines.

Por lo tanto, a pesar de que ya se tiene conocimiento previo sobre la interacción de delfines con *P. sinus* y de inclusive, cómo la marea influye en los movimientos de individuos de vaquita (Jaramillo-Legorreta, 2008; Campos, 2012) estos resultados se basan en una metodología diferente a la que se emplea actualmente en el programa de monitorización acústica y con un tamaño de muestra mucho menor. Por último, es importante mencionar que aún no se ha realizado un estudio detallado en los datos de la actual

monitorización de cómo variables como delfines o embarcaciones pueden afectar a la detección acústica de vaquita. Esto solamente se ha hecho para la variable espacio y se utilizó la latitud-longitud de los sitios de muestreo como variables. De igual manera, para evaluar si la marea afecta al comportamiento acústico de vaquita y por lo tanto a tasa de detección acústica, utilizando como métrica chasquidos por día, se determinó que la marea no afecta a las detecciones (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2016). Sin embargo, los valores de credibilidad de los modelos que se utilizaron para estimar la tasa fueron muy amplios, debido probablemente a que no incluyen las variaciones ocasionadas en la tasa de encuentro por otros factores (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2014; 2016). Por lo tanto, en este estudio se pretende identificar que variables pueden ocasionar afectaciones en la detección acústica de vaquita y por lo tanto ser incluidos como variables en el modelo de su la tendencia poblacional de vaquita.

Es importante notar también que a pesar de la abundancia tan baja de la vaquita se planea continuar realizando la monitorización de vaquita, por lo que y es muy necesario reducir los sesgos potenciales introducidos por las algunas variables en la su detección de vaquita, ya que estos probablemente eviten detectar la magnitud de los cambios poblacionales muy que puedan estar ocurriendo pequeños de esta especie, vitales para determinar la efectividad de las medidas de conservación y, en su caso, planear nuevas.

4.2. Objetivos

- ❖ Analizar que variables pueden afectar la detección acústica de vaquita.
- ❖ Determinar la relación de la detección acústica de vaquita con las variables que afectan su detección.

4.3. Métodos

4.3.1. Análisis de la distribución espacial y temporal de la ocurrencia acústica de vaquita.

Al igual que con los delfines, las tasas de detección acústica de vaquita se calcularon utilizando conteos de chasquidos, independientemente del número de series de chasquidos detectados. Las series de

chasquidos incluidas en el análisis tuvieron como mínimo cinco chasquidos. Se utilizó la métrica chasquidos promedio por día por sitio de muestreo para describir los patrones de distribución de las vaquitas entre los sitios de muestreo. Se calcularon los patrones circadianos de la actividad acústica de ecolocalización de vaquitas usando la media de chasquidos por hora del día. Para examinar los efectos de las condiciones de luz en la ecolocalización de vaquitas, cada día de muestreo se dividió en períodos día y noche, establecidos a través de las horas de salida y puesta del sol (redondeadas a la hora más cercana) para la ubicación de San Felipe obtenida con el software Mar v10 (<http://predmar.cicese.mx/>). Entre el 19 de junio y el 19 de agosto, el tiempo promedio de salida del sol para los períodos de muestreo de 2011 a 2015 fue 04:50:18 y el tiempo promedio de puesta de sol fue 18:39:21.

Los chasquidos por hora del día no se distribuyeron normalmente (Lilliefors, $p < 0.05$). Por lo tanto, las diferencias de esta variable entre los sitios de muestreo, la hora del día y entre las condiciones de luz diurna y nocturna se probaron con el análisis de varianza unidireccional de Kruskal-Wallis. Se usó la función `dunnTest` en R, con corrección de Bonferroni, para aplicar una prueba *a posteriori* de comparación múltiple de medias Dunn (Zar, 1999). En todos los análisis, un valor de $p < 0.05$ se consideró significativo.

4.3.2. Modelo de ocurrencia acústica de vaquitas como análisis exploratorio de las variables que se relacionan con su detección acústica.

Al igual que con el análisis de los delfines, se aplicaron modelos lineales generalizados para describir la ocurrencia acústica de vaquitas en relación con variables espaciales, temporales, oceanográficas, antropogénicas y biológicas. Las variables espaciales explicativas fueron los sitios de muestreo y su ubicación (latitud y longitud, en coordenadas UTM) (Tabla 5). Para evitar sesgos, eliminamos los datos de los sitios de muestreo número 12 y 18, ya que no había datos disponibles en estos sitios en al menos tres temporadas de campo debido a la pérdida de anclajes con C-POD (Anexo A). Las variables temporales explicativas fueron la temporada de muestreo, la hora del día y el período día / noche. Las variables oceanográficas fueron la temperatura 10 m bajo la superficie de la mar registrada por un sensor de los C-POD y el componente de velocidad vertical de la marea (m/s). Esta última variable se calculó por la hora del día promediando la diferencia de las alturas de las mareas cada cinco minutos durante el período de estudio. La presencia acústica de delfines fue la única variable biológica considerada en el análisis. Los chasquidos del sonar del barco se incluyeron como la variable explicativa antropogénica. La variable de

respuesta fue el conteo de los chasquidos de ecolocalización de vaquitas por hora (Tabla 5). Todas las variables explicativas de la base de datos se calcularon u organizaron en períodos de una hora.

Utilizamos el software R (R core team, 2018) y el paquete de estadística glm () (Chambers & Hastie, 1992) para aplicar el modelo GLM. Se especificó una familia binomial negativa con una función de enlace logístico usando la función glm.nb () del paquete MASS (Venables y Ripley, 2002). El mejor modelo (combinación de variables explicativas) se seleccionó utilizando el Criterio de Información de Akaike (AIC). Para analizar la ocurrencia acústica modelada por temporada de muestreo, se dividió la base de datos por temporada. Con estos datos, se calcularon las predicciones de conteo de chasquidos de vaquita por hora del mejor modelo usando la función de predicción () del paquete car en R (Fox y Weisberg, 2019). Se calcularon tasas de chasquidos predichas en cada sitio por temporada de muestreo para visualizar los patrones espaciales modelados para la actividad de vaquitas. La escala de las tasas de chasquidos predichas se cambió a escala de día (chasquidos/día) para fines comparativos con las tasas predichas por el modelo espacial para el mismo periodo obtenido por Jaramillo-Legorreta *et al.* (2017).

4.3.3. Análisis de las variables relacionadas a la detección de vaquitas.

Debido que el modelo GLM arrojó que el mejor modelo relacionado a la ocurrencia de vaquitas incluyó a las variables sitios de muestreo, temporada de muestreo y presencia de delfines se exploró a detalle como estas variables afectaban a la presencia acústica de vaquita.

4.3.3.1. Sitios y temporada de muestreo.

Se analizó si el promedio de chasquidos de vaquitas por sitio o temporada de muestreo mostraron diferencias significativas. Esto con el fin de conocer a detalle porque estas variables fueron importantes para el modelo final de actividad acústica de vaquita. La prueba a posteriori de Dunn nos permitió conocer las diferencias entre las mismas variables y así indagar aún con más detalle como determinaron la actividad acústica de vaquita.

4.3.3.2. *Presencia acústica de delfines.*

Se analizó gráficamente si los encuentros acústicos de delfines afectaban a la presencia acústica de vaquitas. Para complementar el análisis se calcularon las diferencias en tiempos entre los encuentros acústicos (delfines vs. vaquitas) para la temporada de muestreo 2013. Un encuentro acústico de vaquita es cualquier serie de chasquidos en un periodo de 30 minutos. Para los delfines, un encuentro acústico es la presencia acústica (determinada por al menos una serie de chasquidos) de delfines en un periodo de una hora.

Los encuentros acústicos de delfines y de vaquitas se categorizaron dependiendo de su tiempo de duración. Los encuentros acústicos que duraron 1 hora se les clasificó como T1, a los que duraron dos horas como T2, y así de manera consecutiva.

Se registró el tiempo (duración) de diferencia entre un encuentro acústico de delfines y de vaquita. También se anotó la cantidad de veces que hubo traslape espacial y temporal entre los encuentros acústicos de vaquita y de delfines.

Este mismo ejercicio se hizo para las temporadas de muestreo 2011 a 2015 para poder inferir más sobre la interacción espacial y temporal de vaquitas y delfines en el Refugio de la Vaquita.

4.4. Resultados

4.4.1. **Análisis de la distribución espacial y temporal de la ocurrencia acústica de vaquita.**

No encontramos diferencias significativas en la actividad acústica de las vaquitas entre el día y la noche (Kruskal-Wallis, $p > 0.05$). El promedio de la actividad acústica de las vaquitas fue de 3.9 chasquidos / hora (SD = 56.08) durante la noche, y 4.4 chasquidos / hora (SD = 56.9) durante el día.

En la Figura 14 se muestra el promedio de chasquidos de vaquita por hora del día no mostró un patrón identificable en que rangos de horas su actividad fue mayor, pero aparentemente durante las horas luz su actividad fue mayor. La prueba de Kruskal-Wallis arrojó que no hubo diferencias significativas entre la

condición noche y día ($p > 0.05$). Esto fue diferente para los patrones encontrados en la actividad acústica de delfines (Figura 9).

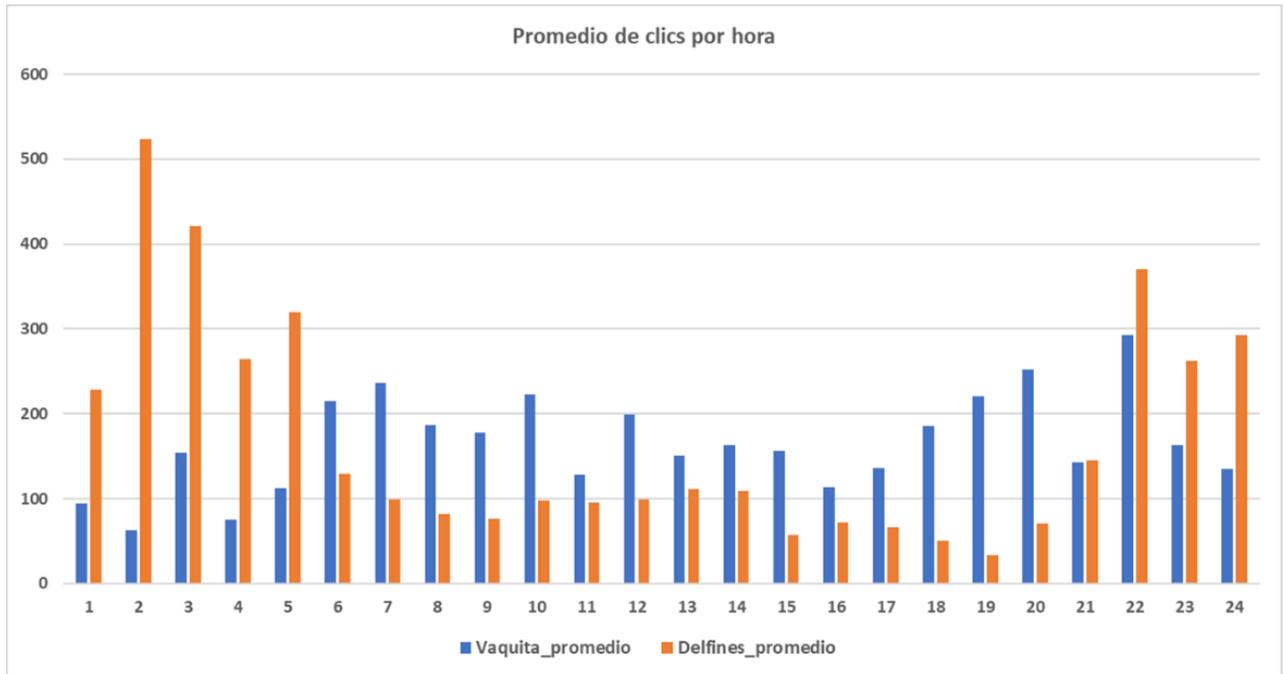


Figura 14. Patrones circadianos de la actividad acústica de vaquita y de los delfines. Se muestran los promedios de chasquidos de este par de cetáceos obtenidos durante cada hora del día.

4.4.2. Modelo de ocurrencia acústica de vaquitas como análisis exploratorio de las variables que se relacionan con su detección acústica.

La formulación de combinaciones de variables explicativas resultó en 45 modelos lineales generalizados. La Tabla 8 muestra los valores AIC de 25 modelos con los valores de AIC más bajos. El modelo con el AIC más bajo, 137,428, incluyó la interacción del sitio de muestreo con la variable temporada de muestreo más la presencia/ausencia de delfines. Otro modelo con valor muy similar de AIC (137,436), también arrojó la interacción de las variables sitio de muestreo y temporada de muestreo más la variable conteo de chasquidos de delfines. Se seleccionó como mejor modelo el que arrojó el valor más bajo de AIC. Aunado a esto, la variable que cambió estuvo relacionada a la presencia de delfines. Los modelos que solo incluyeron variables espaciales (sitio de muestreo), temporales, biológicas, oceanográficas, condición día-noche o antropogénicas arrojaron un mal desempeño, indicando que ninguno de estos modelos por sí solo es adecuado para explicar la actividad acústica de las vaquitas (Tabla 8). Todos los modelos con valores

más bajos de AIC incluyeron las variables sitio de muestreo, temporada de muestreo y presencia de delfines, lo que indicó que estas tres variables son clave para comprender la distribución de la actividad acústica de las vaquitas.

Tabla 8. Combinación de fórmulas de las variables de los modelos lineales generalizados para el conteo de los chasquidos de ecolocación de vaquitas. Se muestra el valor de AIC para cada modelo y las interacciones entre las variables de los modelos se representan con una “x”.

Modelo	Combinación de variables predictoras	AIC
Modelo45	Sitio * Temporada + Delfín01 (presencia/ausencia)	137,428
Modelo38	Sitio * Temporada + Delfín (conteo de clics)	137,436
Modelo40	Sitio * Temporada	137,436
Modelo42	Sitio * Temporada + Marea	137,437
Modelo43	Temporada * Sitio + Marea + Delfín	137,438
Modelo16	Sitio * Día-noche + Marea	139,845
Modelo28	Día-noche + Temporada + Marea + Sitio + Delfín	139,871
Modelo33	Día-noche + Temporada + Marea + Sitio	139,872
Modelo36	Sitio + Temporada	139,941
Modelo37	Sitio + Temporada + Delfín	139,942
Modelo29	Temporada + Marea + Sitio + Delfín	139,943
Modelo34	Temporada + Marea + Sitio	139,943
Modelo14	Sitio + Día-noche + Marea + Delfines + Temperatura del mar	140,130
Modelo18	Día-noche + Marea + Sitio + Delfín + Temperatura del mar	140,130
Modelo9	Sitio + Día-noche + Delfines + Temperatura del mar	140,134
Modelo11	Temperatura del mar + Sitio + Día-noche	140,136
Modelo24	Sitio + Hora del día + Marea	140,161
Modelo19	Día-noche + Marea + Sitio + Delfín	140,314
Modelo21	Día-noche + Delfín + Marea + Sitio	140,314
Modelo12	Sitio + Día-noche	140,320
Modelo20	Marea + Sitio + Delfín	140,369
Modelo35	Marea + Sitio	140,370
Modelo22	Sitio + Delfín	140,373
Modelo10	Sitio	140,374
Modelo3	Sólo variables espaciales	140,374

La actividad acústica de la vaquita predicha por el mejor modelo por cada temporada de muestreo mostró distribuciones espaciales muy similares, con la mayoría de los valores más altos en el lado suroeste del Refugio de Vaquita (Figura 15).

Comparamos los resultados de las tasas de detección obtenidas por el modelo final GLM con la distribución espacial modelada de la actividad acústica de vaquita obtenida en el estudio de Jaramillo-Legorreta y colaboradores (2017). A pesar de que se usaron diferentes modelos los patrones de la distribución de la actividad acústica son similares, con la mayor actividad acústica en el suroeste del Refugio de Vaquita y muy poca actividad acústica en la esquina noroeste.

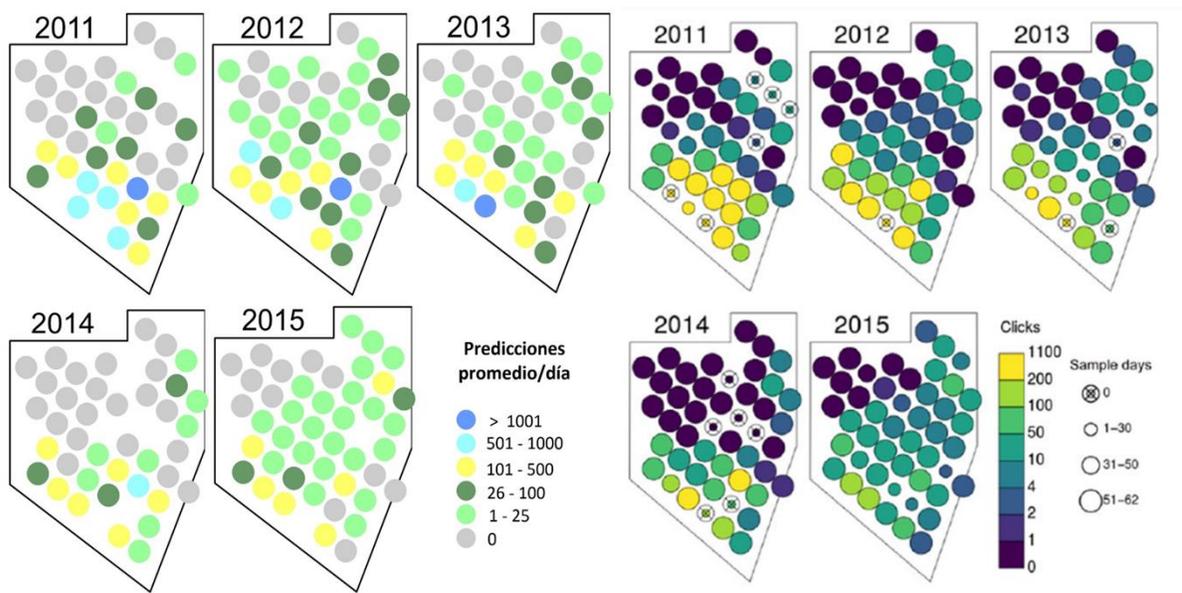


Figura 15. Comparación de la distribución predicha de la actividad acústica de vaquita en temporadas de muestreo 2011 a 2015. En la figura de la izquierda se presentan resultados obtenidos con GLM y la de la derecha con un modelo espacial (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2017).

También comparamos los valores de los coeficientes de las variables del modelo final de vaquita y de los delfines (Tabla 9) obtenidos con los modelos lineales generalizados para conocer el sentido de la interferencia (a través de su signo) y magnitud (relativa a las otras variables del modelo seleccionado).

A diferencia del modelo de vaquita, el intercepto del modelo de los delfines no inicia en menos de cero ya que el modelo arrojó un valor positivo de 3.02. Los coeficientes de las variables sitio de muestreo y velocidad vertical de la marea indicaron una asociación negativa con la variable respuesta (chasquidos de delfines), sugiriendo que, si este par de variables predictoras aumentan de manera independiente, los chasquidos de los delfines tienden a disminuir y viceversa. Sin embargo, la velocidad vertical se relaciona con una mayor magnitud (-32.77) con la variable dependiente en comparación con el resto de las variables

predictoras. Tanto para la variable día-noche y la interacción del sitio de muestreo y la condición de la luz del día (día-noche) los coeficientes del modelo arrojaron que, al incrementar el valor de estas variables, la media del conteo de los chasquidos por horas tiende a incrementar. El valor del coeficiente para la variable condición de luz fue 1.21 y para la interacción de variables fue 1.35 (Tabla 9).

Tabla 9. Estimación de los coeficientes de las variables de los mejores modelos para predecir el conteo de chasquidos de vaquitas y de delfines. Se muestra el error estándar y el valor de significancia de cada variable (** $p < 0.05$, *** $p < 0.001$). Con un asterisco * se indican las interacciones entre las variables de los modelos. Se explican también la varianza explicada por cada modelo.

Variables	Estimación coeficiente	Error estándar	p	Varianza explicada del modelo
Vaquita				44.63
Intercepto	-1.38	0.32	0***	
Sitio	28.11	7961	1	
Temporada	-24.93	8190	1	
Delfin01	0.90	0.28	0**	
Sitio*Temporada	-1.06	11420	1	
Delfines				14.92
Intercepto	3.02	0.42	0***	
Sitio	-2.39	0.61	0***	
Día-noche	1.21	0.64	0.06	
Velocidad marea	-32.77	8.13	0***	
Sitio*Día-noche	1.35	0.95	0.16	

En el modelo de la vaquita, el sitio de muestreo mostró una interacción positiva con la variable respuesta y a comparación con las otras variables predictoras fue la de mayor magnitud (28.11). También la variable temporada de muestreo mostró una magnitud grande (-24.93) pero con una asociación negativa en relación con el conteo de los chasquidos de vaquita (Tabla 9). Tal vez los valores de los coeficientes estén relacionados a las mayores tasas de encuentro acústicos de las vaquitas documentadas de manera constante en el suroeste del Refugio de la Vaquita (Figura 14). En el caso de la variable temporada de muestreo también el valor alto del coeficiente y su valor negativo puede estar relacionado la disminución drástica anual de la población de vaquita. La relación de la variable presencia/ausencia de delfines con el conteo de chasquidos de vaquita fue positiva, pero con un valor muy bajo del coeficiente (0.90), indicando que a mayor presencia de los delfines la actividad acústica de vaquita aumenta (Tabla 9). Es importante

notar, que los valores de los errores estándar de las variables predictoras del modelo de la actividad de vaquita fueron muy altos (con excepción de la presencia/ausencia de delfines) creando incertidumbre en las estimaciones de los coeficientes. Aunado a esto, los modelos con los valores más bajos de AIC (Tabla 8) de los modelos de vaquita siempre arrojaron como variable predictora la interacción de la temporada y sitio de muestreo. Por lo tanto, se asume que el nivel de interacción entre estos dos cetáceos es muy bajo de acuerdo con el modelo y al análisis espacial - temporal obtenidos en este estudio.

4.3.3. Análisis de las variables relacionadas a la detección de vaquitas.

Debido que el modelo GLM arrojó que el mejor modelo relacionado a la ocurrencia de vaquitas incluyó a las variables sitios de muestreo, temporada de muestreo y presencia de delfines se exploró a detalle como estas variables afectaban a la presencia acústica de vaquita.

4.3.3.1. Sitios y temporada de muestreo.

Se encontraron diferencias significativas entre los promedios de chasquidos de vaquita por temporada de muestreo (Kruskall-Wallis, $p < 0.05$). Las diferencias se encontraron en todas las comparaciones de la media de los chasquidos de todas las temporadas (Dunn, $p < 0.05$). Este resultado no es sorprendente, estas diferencias están relacionadas a la disminución tan drástica de la población de vaquita. Por ejemplo, se estimó que en 2008 había 245 vaquitas (Gerrodette *et al.*, 2011) y solo 59 vaquitas para el año 2015 (Taylor *et al.*, 2017). Los resultados del programa de monitorización acústica de vaquita arrojaron que la población decreció un 80% entre 2011 y 2015 (Jaramillo *et al.*, 2017). Era de esperarse que la temporada de muestreo fuera una variable incluida en el modelo final de GLM para la predicción de actividad acústica de vaquita. En la Figura 16, se observa como el promedio de chasquidos de vaquita por temporada de muestreo fue disminuyendo notoriamente entre 2011 y 2015. En el caso de los delfines su promedio de chasquidos por temporada no presentó un patrón de cambio.

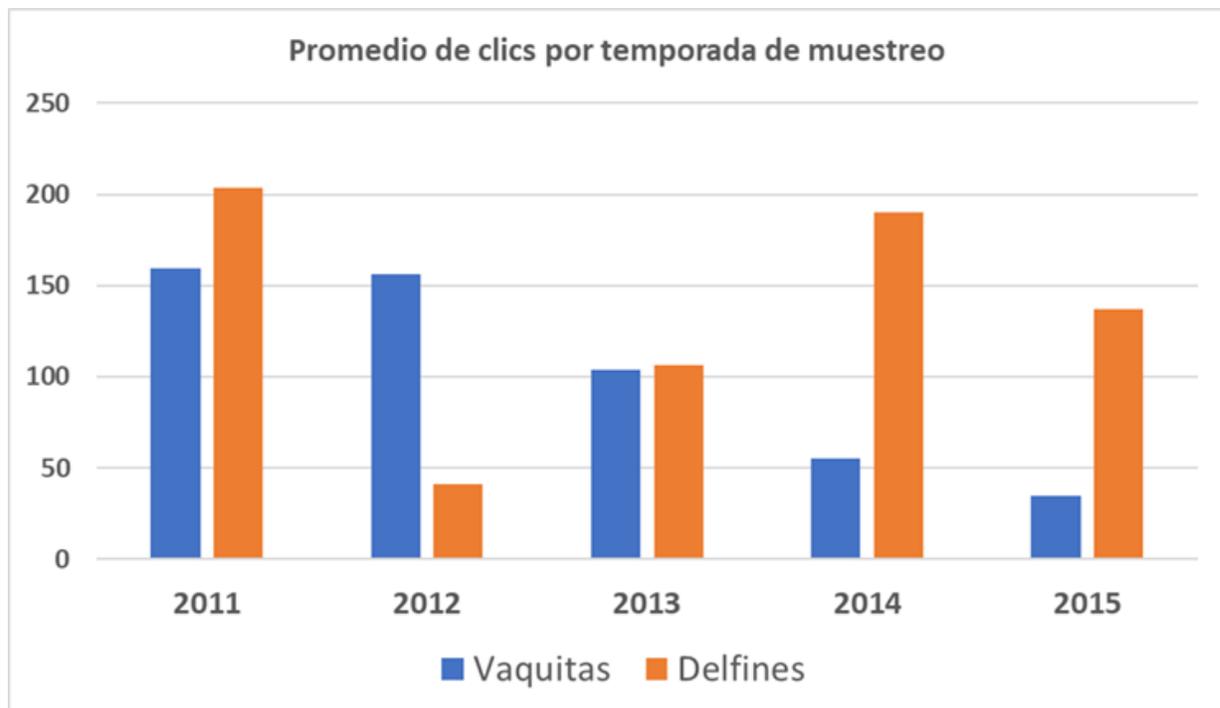


Figura 16. Promedio de chasquidos de vaquitas y delfines por temporada de muestreo.

El promedio de los chasquidos de vaquitas por sitio de muestro también mostró diferencias significativas. El promedio de chasquidos de vaquita por sitio de muestreo mostró diferencias significativas (Kruskall - Wallis, $p = < .05$). Este resultado también es esperado, ya que la actividad acústica de vaquita presentó un patrón muy marcado en mayor actividad en los sitios ubicados en la esquina suroeste del Refugio de la Vaquita. En algunos sitios de muestreo el promedio de chasquidos de vaquita fue cercano a cero o menor a un promedio de 5 chasquidos por temporada de muestreo. El resultado sugiere que la vaquita tiene una preferencia de actividad de ecolocación limitada dentro del Refugio de la Vaquita (Figura 17).

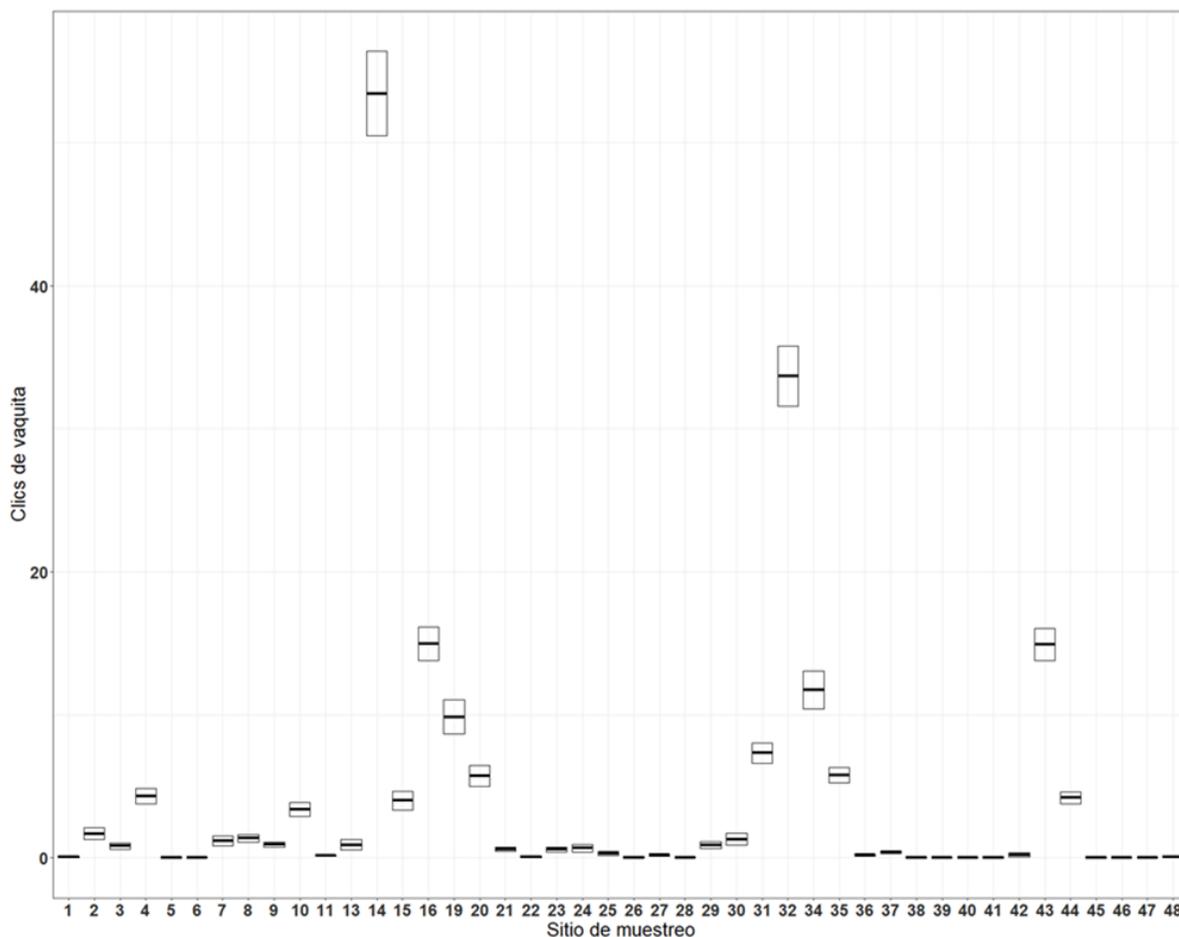


Figura 17. Promedio de chasquidos de vaquita por sitio de muestreo durante las temporadas de muestreo 2011 a 2015.

4.3.3.2. Presencia acústica de delfines.

Durante el análisis de la temporada de muestreo 2013, se encontró que sólo en 33 sitios de muestreo hubo encuentros de delfines y de vaquitas. En otros siete sitios de muestreo (5, 26, 28, 39, 40, 41 y 48), solo hubo encuentros de delfines. En el sitio 32 solo hubo encuentros de vaquitas. Esta información se grafica en la Figura 18. observamos que cuando hay un encuentro acústico de delfines (independientemente del tiempo de duración) un encuentro de vaquita ocurre después en un promedio de 52.9 horas (> 2 días). En sólo 5 ocasiones hubo traslape de encuentros acústicos de delfines y vaquitas.

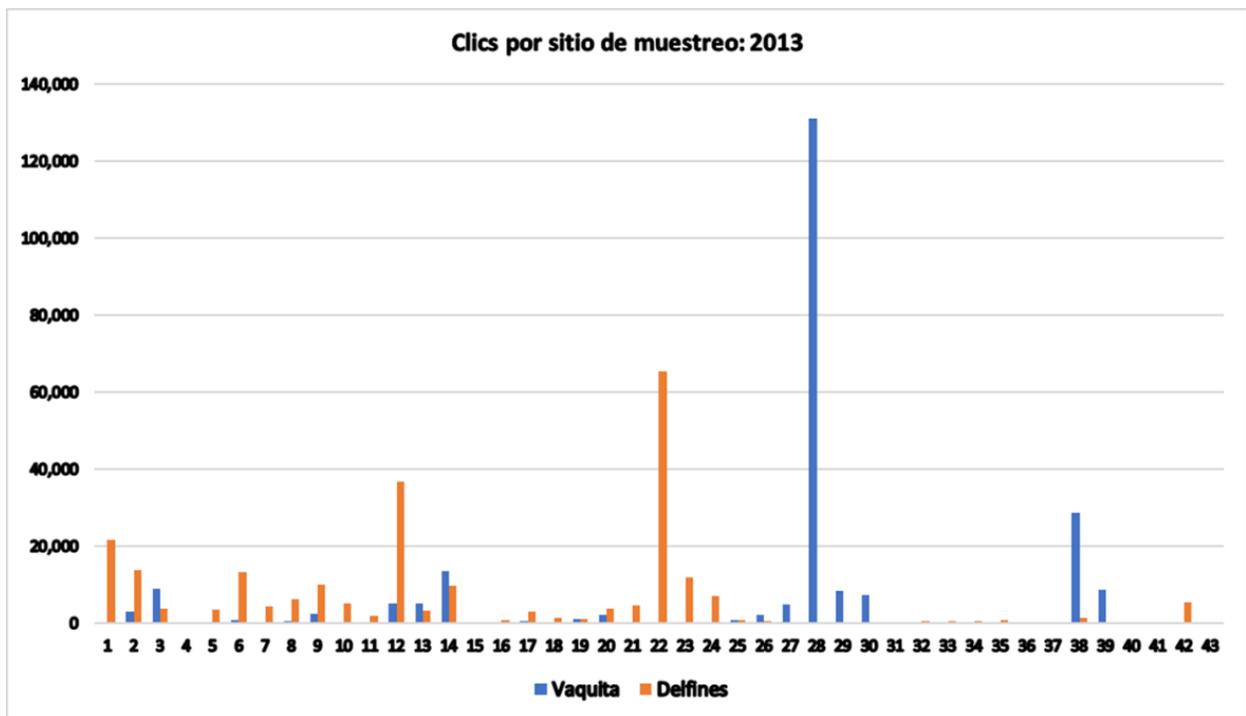


Figura 18. Chasquidos de vaquita y de delfines por sitio de muestreo para la temporada 2013.

En el análisis para todo el periodo de muestreo (2011-2015) además de realizar mismo ejercicio para temporada de muestreo 2013, se realizó el cálculo de las horas con presencia de delfines y de vaquita.

En total se obtuvieron 9,382 encuentros acústicos de vaquitas y delfines. De estos, 6,573 fueron de vaquita y 2,809 de delfines. Solamente en 46 ocasiones hubo traslape de presencia acústica de vaquitas y delfines. El porcentaje de horas con traslape fue de 0.5%. La mayoría de las horas con traslape fue durante la noche (82.6%). Esto no es sorprendente ya que los delfines fueron mucho más activos en la noche que en el día y por ello aumenta la probabilidad de traslape bajo esa condición.

Otro aspecto importante del bajo porcentaje de horas con traslape es que espacialmente el traslape ocurrió en 18 sitios de muestreo del total de sitios de muestreo. Por lo tanto, se sugiere que esto ocurrió por la diferencia espacial y temporal de uso de hábitat del Refugio de la Vaquita donde los delfines tienen sus tasas de detección más altas en el este y las vaquitas en el suroeste del Refugio de la Vaquita.

4.5. Discusión

4.5.1. Evaluación de variables que afectan potencialmente a la detección acústica de vaquita.

El modelo final de la ocurrencia acústica de vaquita estuvo compuesto por variables relacionadas con el sitio y temporada de muestreo y la presencia de delfines. Estudios previos realizados con el mismo set de datos y con más temporadas de muestreo, documentaron que otras variables no representaban sesgos importantes en las tasas de detección de las series de chasquidos de vaquita. Algunas de estas variables tampoco fueron predictoras de nuestro modelo final. Estas se discuten a continuación:

Ruido ambiental

A pesar de que el ruido ambiental no se cuantificó en nuestro estudio para incluirla como una variable predictora en nuestro análisis se asume que el sesgo ocasionado por esta variable en la detección de vaquita, por enmascaramiento de sonidos producidos por vaquitas, y en el desempeño del algoritmo KERNO fue mínimo. De acuerdo al estudio realizado en el Alto Golfo de California por Jaramillo-Legorreta (2008), no se encontró una tendencia en los niveles de ruido ambiental en los sitios de muestreo donde se detectaron acústicamente a vaquitas. En las aguas más someras en el norte del Alto Golfo, es donde se registraron los niveles de ruido más altos y esa área ruidosa no es parte de este estudio.

Taylor y colaboradores (2017) hacen reporte similar. En este estudio usaron una malla de muestreo que incluyó el rango histórico de la vaquita y el método incluyó el estimar a la abundancia de vaquita con monitoreo acústico pasivo con C-PODs y con el método de muestreo a distancia. En un área aplicaron los dos métodos y fue considerada un área de calibración, esta zona comprende el Refugio de la Vaquita. En las aguas someras al norte del Alto Golfo de California sólo se aplicó monitoreo acústico pasivo. Para investigar si había diferencia en el ruido ambiental entre el área de calibración y los estratos de muestreo someros se calcularon los registros de los chasquidos producidos probablemente por crustáceos y sedimentos finos en suspensión en un rango similar a la frecuencia usada por las vaquitas. Se definió como un sitio de muestreo ruidoso aquel que registró más de 3,000 detecciones de chasquidos por minuto (Taylor *et al.*, 2017). Al igual que Jaramillo-Legorreta (2008), encontraron diferencias en el ruido ambiental entre las dos áreas, siendo el área somera la más ruidosa. Taylor y colaboradores (2017) insertaron copias de series de chasquidos de vaquita en datos de los sitios de muestreo ruidosos y no ruidosos. Encontraron que hubo muy poca diferencia en el desempeño de detección del C-POD y de su algoritmo de clasificación entre los sitios con mucho ruido o poco.

En otro estudio realizado en el Refugio de la Vaquita con los datos del programa de monitorización acústica de vaquita, usaron la misma métrica de minutos ruidosos para calcular sitios de muestreo con mucho ruido ambiental durante las temporadas de muestreo 2011 a 2016. Se documentó que no hubo un cambio en la proporción de minutos ruidosos por temporada y que por lo tanto el ruido ambiental probablemente no provocó sesgos en la detección acústica de vaquita (Thomas *et al.*, 2017).

Velocidad vertical de la marea

El efecto de la velocidad vertical de la marea relacionado a posibles sesgos en de detección de vaquita ya había sido analizado. En el estudio de Jaramillo-Legorreta y colaboradores (2017) se usó el mismo set de datos de este estudio. En esa investigación se analizó a detalle la distribución de las velocidades verticales para conocer si esta variable pudiera ocasionar un sesgo en la detección acústica de vaquita. No encontraron diferencias significativas entre las temporadas de muestreo de 2011 a 2015. Inferieron que el efecto de las mareas no tuvo un efecto significativo en las detecciones. Se decidió incluir esta variable en nuestro estudio para conocer si tenía influencia a una escala de hora. También se exploró si estaba interactuando con otras variables y así, relacionarla a la detección de vaquita.

Aunque esta variable no fue incluida en el modelo final, es importante notar que en el estudio de Jaramillo-Legorreta (2008), las detecciones acústicas de vaquita se encontraron principalmente cuando aumentó la velocidad de la marea antes o después de pleamar y bajamar. Este estudio coincide con lo observado en la actividad acústica de la marsopa común ya que se encontró una mayor actividad acústica durante el mayor flujo de energía ocasionado por el cambio de las mareas (Isojunno *et al.*, 2012). Usando C-PODs, Zein y colaboradores (2019) encontraron resultados similares para la marsopa común en el Mar de Frisia. La mayoría de estos animales fueron detectados en la marea alta y en los tiempos en que las velocidades de las corrientes fueron más altas durante la marea alta o baja. El registro de la mayoría de las series de chasquidos, “zumbidos”, usados por las marsopas para buscar alimento fueron documentados en velocidades de corrientes altas y en el reflujos de la marea (Zein *et al.*, 2019).

La diferencia de nuestro estudio con los mencionados arriba radica en que los otros estudios están basados en observaciones cortas. Nuestro estudio esta basado en 12,731 días de grabaciones colectados en los mismos sitios de muestreo durante el mismo periodo (Tabla 2), lo cual disminuyó el efecto probable de la velocidad vertical de la marea para determinar la ocurrencia acústica de vaquita. Nuestro estudio no clasificó a las series de chasquidos de vaquita como “zumbidos” para inferir si esta especie fue más activamente acústica para buscar su alimento durante las velocidades verticales de la marea más altas.

Presencia de embarcaciones a través del registro de los chasquidos de sus ecosondas

A pesar de que registramos la presencia de embarcaciones en los sitios de muestreo a través del registro de los chasquidos de sus ecosondas, esta variable estuvo limitada al registro de embarcaciones pesqueras de arrastre y de pesca deportiva. Las embarcaciones menores (pangas) usadas para pesca artesanal no usan ecosondas en el Alto Golfo de California. El periodo de muestreo fue llevado a cabo durante el periodo más bajo de actividad pesquera artesanal en el Alto Golfo de California (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998). Por lo tanto, al menos durante nuestro periodo de estudio, la presencia de embarcaciones no fue un factor antropogénico que afectara la conducta acústica o comportamiento de la vaquita. Por esto, el análisis de regresión no la arrojó como variable predictora. Cabe la posibilidad de que el efecto de esta variable pudiera ser diferente en el modelo de ocurrencia acústica de vaquita si se realizará el muestreo durante la temporada alta de pesca en el área de estudio. Por ejemplo, en un estudio de tursiones, Pirotta y colaboradores (2015), encontraron que la presencia física de embarcaciones fue asociada con una reducción a corto plazo en el tiempo de forrajeo de este cetáceo.

Actividad acústica a lo largo del día y periodos nocturnos y diurnos

A diferencia de los delfines, no se encontró una relación en la actividad acústica de vaquita con las variables relacionadas a la hora del día y periodos nocturnos y diurnos. Este resultado no es sorprendente, los delfines emiten una variedad de sonidos (además de series de chasquidos) a diferencia de la vaquita que sólo emite series de chasquidos para navegar y localizar su alimento.

Las aguas del área de estudio son turbias y limitan aún más la visibilidad de cualquier cetáceo, esto obliga a cualquier cetáceo a usar más la ecolocalización que en aguas más claras. Por esta razón el patrón de actividad acústica de la vaquita fue similar durante cualquier hora del día.

Se sabe que la marsopa común busca alimento casi de manera continua todo el día (Wisniewska *et al.*, 2016), se asume que la vaquita lo hace de manera similar. Por esta razón la conducta acústica de la vaquita no está relacionada a estas variables de tiempo. Como la ecolocalización es vital para esta marsopa tampoco se asumió cambios en la tasa de producción de chasquidos y por ende la ocurrencia de algún sesgo en la detección de la vaquita.

Para revisar lo anterior, Jaramillo-Legorreta y colaboradores (2017), calcularon los minutos con detecciones positivas de vaquita y del conteo de chasquidos para usarlas como métrica para analizar si

encontraban un cambio en durante las temporadas de muestreo. El conteo de estas dos variables no cambió significativamente durante las temporadas, se asumió que la conducta acústica de vaquita no presenta cambios significativos.

Propagación del sonido

Taylor y colaboradores (2017) realizaron un estudio sobre la propagación de la señal acústica de vaquita para buscar diferencias entre aguas someras del noroeste del Alto Golfo y aguas profundas localizadas en el Refugio de la Vaquita. Para esto, emitieron series artificiales de chasquidos de vaquita en los sitios de muestreo y sugirieron que puede haber diferencias pequeñas en la propagación del sonido pero que es improbable que sean suficientes como para causar grandes cambios en los rangos de detección efectivo de vaquitas por los C-PODs (Taylor *et al.*, 2017). El estudio usó la métrica de tasa de detección por día. Para minimizar el efecto de diferencias temporales en la propagación del sonido, el análisis fue limitado al mismo periodo (19 de junio al 19 de agosto).

El promedio de la temperatura por temporada de muestreo registrada por el sensor de los C-PODs mostró un ligero incremento entre 2011 a 2015. Thomas y colaboradores (2017) no encontraron que este incremento anual en la temperatura haya afectado de manera significativa la pérdida de propagación del sonido y por ende un sesgo en la detección de vaquita.

En el Alto Golfo de California los cambios significativos que se presentan en la salinidad son entre el verano (38.8 ups) y el invierno (36.7 ups). Los cambios en la temperatura también son notables entre verano (máximo de 32°C) e invierno (15°C) (Lavín y Sánchez, 1999; Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Lavín *et al.*, 1998). La batimetría del área de estudio no varía mucho ya que el rango de profundidad oscila entre 10 a 30 m, siendo la parte noroeste del Refugio la más somera y la del sur la más profunda.

Debido a estos factores y a que el estudio fue realizado únicamente en verano, tal vez estas variables físicas no ocasionaron un sesgo significativo en la detección de vaquita.

Falsos positivos de series de chasquidos de vaquita

Todas las series de chasquidos clasificadas como marsopas por el algoritmo KERNO del C-POD fueron evaluadas y validadas a través de la visualización en pantalla de diferentes parámetros acústico de vaquita.

Unas cuantas series fueron clasificadas erróneamente y se eliminaron del set de datos. A diferencia de los delfines, el set de datos de vaquitas no tiene falsos positivos.

4.5.2. Distribución espacial y temporal de la actividad acústica de vaquita.

El rango de distribución histórica de la vaquita comprende principalmente la parte oeste del Alto Golfo de California (Silber, 1990; Silber y Norris, 1991; Silber *et al.*, 1994; Vidal, 1995; Gerrodette *et al.*, 1995; Jaramillo-Legorreta *et al.*, 1999). Estudios más recientes que abarcaron también todo su rango de distribución encontraron que la mayoría de los avistamientos fueron registrados en la misma área (Gerrodette *et al.*, 2011; Taylor *et al.*, 2017). La mayoría de los avistamientos coinciden principalmente con la porción suroeste dentro y fuera del Refugio de la Vaquita y fuera de este hacia la costa de Baja California. También han sido registrados avistamientos en la zona noroeste dentro y fuera del Refugio. En el último crucero de investigación para estimar la población de vaquita solamente fueron avistados dentro del Refugio (Taylor *et al.*, 2017). Por lo que el patrón de distribución no ha cambiado a pesar de que su población ha disminuido drásticamente y ha sufrido una contracción distribuyéndose los animales principalmente en una zona pequeña de la porción suroeste del Refugio de la Vaquita.

En estudios de vaquita que se ha usado monitoreo acústico pasivo se encontró un área pequeña de alta concentración de actividad acústica de vaquita (Jaramillo-Legorreta, 2008). Esta zona se encuentra cerca de la Bahía de San Felipe y se le llamó “zona de alta concentración acústica”. En este estudio, en las estaciones de muestreo más cercanas a la costa de Baja California es donde se detectaron más vaquitas. En particular los sitios con las tasas más altas de detecciones acústicas se distribuyeron cerca de la Bahía de San Felipe (Jaramillo-Legorreta, 2008).

A partir de 2011, como ya se ha detallado anteriormente, se inició la colecta de datos del Programa de Monitorización Acústica de Vaquita con C-PODs dentro del Refugio de la Vaquita, estudio que continuó hasta 2019. La distribución de la ocurrencia acústica de vaquita obtenida con el modelo final de este estudio fue muy similar al obtenido con un modelo geoespacial para el mismo set de datos por Jaramillo-Legorreta y colaboradores (2017). La mayoría de los sitios de muestreo con los valores más altos de las predicciones de las detecciones de vaquita presentaron un claro patrón de distribución. La mayor actividad acústica ocurrió en la porción suroeste del Refugio de Vaquita (Jaramillo-Legorreta *et al.* 2017).

A pesar de que en el periodo del monitoreo 2011 a 2016, el declive anual promedio estimado en la actividad acústica fue de 39%, el patrón de distribución espacial de las tasas de chasquidos estimadas es muy similar entre años, con el área del suroeste siendo el área de mayor actividad acústica (Thomas *et al.* 2017). Otro estudio con datos de 2011 a 2018 del monitoreo acústico, se documentó una tasa de decline anual de 48 % de la población de vaquita en 2017 y de 47% en 2018. A pesar de esta disminución el patrón de la distribución de la mayor actividad acústica se predijo en los sitios de muestreo del suroeste del Refugio de la Vaquita (Jaramillo-Legorreta *et al.*, 2019). Las observaciones anteriores apoyan los resultados de nuestro modelo final, ya que las variables sitio y temporada de muestreo y su interacción resultaron predictoras de la ocurrencia acústica de vaquita. En el caso particular de temporada se infiere que debido a la disminución anual tan drástica en la tasa de detección acústica que se ha presentado de 2011 a 2015, se esperaba que la temporada de muestreo fuera una variable predictora de nuestro modelo.

De acuerdo a Jaramillo-Legorreta (2008), la distribución de la mayor actividad acústica de vaquita coincide con la Provincia Sedimentaria de Baja California (Carriquiry y Sánchez, 1999). El sedimento fino, junto con otras características oceanográficas, favorece la agregación de las presas demersales que son parte de la dieta principal de la vaquita (Pérez-Cortés-Moreno, 1996). Estas características hacen que la actividad de ecolocalización de la vaquita para buscar alimento sea mayor que en otras partes del Refugio. El Refugio coincide con dos zonas de sedimentos finos, una de mayor tamaño del vértice G del Refugio hacia el norte y una zona de menor tamaño de la altura del vértice G hacia el sur del Refugio (Figura 1). La zona con sedimentos más fino coincide con los sitios de muestreo del Programa de Monitoreo Acústico donde se ha documentado las tasas de detección acústica más alta para la vaquita.

Independientemente de la falta de evidencia científica robusta, como el muestreo de las presas existentes en el Refugio, la porción suroeste del Refugio de la Vaquita es un hábitat importante para su sobrevivencia. Debido a la alta preferencia de uso de hábitat de las vaquitas en esa zona y al traslape del uso de redes para la pesca ilegal de totoaba, el Comité Internacional para la Recuperación de la Vaquita sugirió establecer una “zona de tolerancia cero” donde de manera inmediata no se permita las actividades ilegales, se eliminen cualquier red ilegal y se mantenga la vigilancia las 24 horas con el objetivo de evitar la mortalidad de la vaquita (CIRVA, 2019).

4.5.3. Distribución de la vaquita relacionada a la interacción con delfines

La distribución espacial de vaquita ha sido discutida ampliamente debido a que el patrón de distribución espacial tanto visual como acústica de la vaquita ha sido similar. En los estudios de distribución de la vaquita no se había analizado a la presencia de los delfines como una variable que pudiera estar relacionada con la actividad acústica de vaquita en los datos del Programa de Monitorización Acústica.

Nuestro modelo final de la ocurrencia acústica de vaquita incluyó, además de la interacción sitio y temporada de muestreo, a la presencia acústica de delfines. La mayor actividad acústica de delfines ocurrió en los sitios de muestreo en la porción oriental del Refugio. También hubo un traslape con la distribución de la vaquita principalmente en los sitios del sur. En el análisis de los datos de 2011 a 2015 se documentó que el traslape espacial solamente ocurrió en 18 sitios de muestreo durante 46 ocasiones. El traslape espacial de vaquitas y de delfines ocurrió principalmente durante la noche (82.6%). Tanto las vaquitas como los delfines emiten series de chasquidos de ecolocalización principalmente para conocer su entorno y buscar alimento. Es posible que en los sitios de muestreo donde coincidieron espacialmente comparten las mismas presas.

En algunos estudios se ha documentado que los tursiones tienen una dieta amplia de peces pelágicos y demersales (Walter, Potter y Macko, 1999; Santos *et al.*, 2007; Hernández-Milian *et al.*, 2015). Los calamares del género *Lolliguncula* también se han reportado como presas frecuentes en el contenido estomacal de los tursiones (Barros y Odell, 1990; Pate y McFee, 2012). Las presas de los delfines comunes incluyen principalmente cardúmenes de anchovetas y sardinas (Young y Cockcroft, 1994; Pusineri *et al.*, 2007; García-Gobos *et al.*, 2007, Santos *et al.*, 2013). Se sabe que los delfines comunes y los tursiones se alimentan de diferentes especies dependiendo de la disponibilidad de la presa (Evans, 1982; Blanco *et al.*, 2001). En el caso de la vaquita marina también es una especie que se alimenta de manera oportunista y que su dieta incluye principalmente pequeños peces demersales y calamares (Pérez-Cortez *et al.*, 1996; Vidal, Brownell y Findley, 1999). Por lo tanto la vaquita coincide con la dieta de los delfines, ya que en su contenido estomacal se han registrado especies de anchovetas, calamar dedal y corvinas, entre otras especies (Pérez-Cortez *et al.*, 1996; Vidal, Brownell y Findley, 1999).

Se ha documentado que los delfines usan la ecolocalización para encontrar a su presa principalmente durante las horas de la noche que el día (Elliot, Dawson y Henderson, 2011; Castellote *et al.*, 2015; Tregenza *et al.*, 2016; Temple *et al.*, 2016). Este comportamiento aumentó las probabilidades de competencia por la presa durante la noche y que se dieran las coincidencias temporales.

Estos resultados no indican que durante el día las vaquitas no estén expuestas a la interacción con delfines por competencia de recursos. Los delfines también pueden emitir otras vocalizaciones que no pueden ser registradas por el C-POD o no vocalizar al nadar en el rango de detección de los C-PODs. Por ejemplo, en el análisis detallado que se hizo a los datos de 2013, se pudo obtener que cuando se registró un encuentro acústico de delfines, un encuentro de vaquita ocurrió después en un promedio de 52.9 horas (> 2 días). Las vaquitas probablemente no se acercaron al sitio de muestreo por la presencia de un grupo de delfines o estos animales pueden cambiar el comportamiento acústico de vaquita.

También en el Alto Golfo de California, en el estudio de Campos (2008), se documentaron coincidencias espaciales entre vaquitas y delfines en el Alto Golfo de California. En este estudio sólo hubo una coincidencia temporal.

Esto puede ser el resultado del tamaño de grupo promedio registrado en esta investigación de tursiones, nueve, como de delfines comunes, 246, es más grande que el de vaquitas con un promedio de 2 individuos. Debemos considerar que los delfines son animales más grandes que la vaquita (al menos en promedio un metro más de longitud). Esto aumenta la probabilidad de que los delfines hayan desplazado a las vaquitas durante la competencia por recursos.

Los resultados no son sorprendentes. Se ha documentado que los tursiones (*Tursiops truncatus*) agreden físicamente a las marsopas de puerto (*Phocoena phocoena*), probablemente compitiendo por presas, por conductas de juego para practicar peleas o por conductas infanticidas, logrando desplazarlas temporalmente de su hábitat u ocasionando la muerte de las marsopas. Estos comportamientos han sido documentados en el Fiordo de Moray, Escocia (Ross y Wilson, 1996), en Bahía Cardigan, Gales (Jepson y Baker, 1998) y en la Bahía de Monterey, California (Cotter *et al.*, 2012). En un estudio realizado con detectores acústicos en la costa entre Punta Concepción a Bahía de San Francisco, California, se calculó la presencia acústica relativa de marsopas de puerto y se evidenció que esta disminuyó o que las marsopas se desplazaron a otra área por la presencia acústica de los tursiones (Jacobson *et al.*, 2015). Con métodos acústicos también se ha documentado la coocurrencia de vocalizaciones e interacción de toninas y delfines comunes (*Delphinus spp.*) con *P. sinus* (Campos, 2012). Este estudio, basado en los datos colectados de 2001 a 2007 para el monitoreo de vaquita de Jaramillo-Legorreta (2008), concluye que la distribución espacial de vaquita pudiera estar negativamente correlacionada con la presencia de delfines. Pierce y colaboradores (2010) también encontraron una interacción negativa al realizar monitoreos de *P. phocoena*, *T. truncatus* y *D. delphis*; cuando se registró la presencia de delfines, las señales acústicas de la marsopa común disminuyeron.

Nuestro estudio confirma, al igual que otros estudios con marsopas y delfines, que la presencia de grupos de delfines tiene una interacción negativa con el comportamiento acústico o desplazamiento espacial y temporal de la vaquita. Esto tal vez fue el reflejo de que los patrones de distribución espacio temporales de vaquitas y delfines mostraron poco traslape y fueron constantes en las temporadas de muestreo. De igual manera, los resultados del modelo final del conteo de chasquidos de vaquita mostraron un nivel de interacción muy bajo entre estos dos cetáceos. Por lo tanto, no es importante considerar a los delfines como una covariable para el análisis de los posibles sesgos que pueden ocasionar en las tasas de detección de vaquita usada para estimar la tendencia y abundancia de la población.

Capítulo 5. Conclusiones

El monitoreo acústico pasivo a largo plazo de delfines o marsopas con C-POD es un método efectivo para describir patrones temporales y espaciales de la distribución de estos cetáceos. El muestreo sistemático y la base de datos del programa de monitoreo acústico de la vaquita brindaron una oportunidad única para establecer un conocimiento robusto de línea base para la ocurrencia temporal y distribución espacial de delfines en el Refugio de Vaquita, que es parte de la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y del Delta del Río Colorado.

Se conoció con más detalle la interacción espacial y temporal entre delfines y vaquitas durante el periodo de estudio. Dada la función de los chasquidos de ecolocalización en los delfines y vaquitas, las explicaciones más probables de la actividad acústica de ecolocalización encontradas en los patrones temporales y espaciales de estos cetáceos parecen estar relacionadas con la disponibilidad de presas y que los delfines cambian el comportamiento acústico de vaquita o las alejan del sitio de muestreo. Se determinó que la actividad acústica de vaquita fue afectada por otras variables como sitio y temporada de muestreo. En este estudio la temporada fue una variable predictora en el modelo final debido a la disminución tan drástica de la población de vaquita durante el período de estudio. Se concluye también que la variable presencia/ausencia de delfines no debe incluirse como covariable para disminuir el sesgo potencial en la estimación de la tendencia y abundancia de la población de la vaquita. Ambos parámetros poblacionales han sido muy importantes en la historia de la conservación de la vaquita para conocer si los esfuerzos de preservación y vigilancia implementados por el Gobierno de México han sido efectivos. Es importante contribuir con insumos que permitan confirmar que la estimación de estos parámetros se ha realizado de la manera más certera posible. Finalmente, es importante mencionar que los resultados también pueden contribuir al manejo y protección de las poblaciones de delfines en el Refugio de la Vaquita y en la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, ya que los delfines se encuentran clasificados en la NOM-059 como “protección especial” y se ha documentado su mortalidad de manera incidental en redes usadas principalmente para pescar totoaba en el Alto Golfo de California.

Literatura citada

- Álvarez, L.G. y Jones, S.E. 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. DOI: 10.2112/1551-5036(2004)20[645:SOOSPM]2.0.CO;2
- Álvarez-Borrego, S., Flores-Báez, B.P. y Galindo-Bect, L.A. 1975. Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante invierno, primavera y verano. *Ciencias Marinas* 2. 21–36.
- Argote, M. L., Amador, A., Lavín, M. F., y Hunter, J. R., 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California: *Journal of Geophysical Research*, 100, 16103–16118. DOI: 10.1029/95JC01500.
- Arizmendi-Rodríguez, D.I., Salinas-Zavala, C.A., Quiñonez-Velázquez, C., y Mejía-Rebollo, A. 2012. Abundance and distribution of the Panama brief squid, *Lolliguncula panamensis* (Teuthida: Loliginidae), in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 38:3145. DOI: 10.7773/cm.v38i1A.1880.
- Au, W.W.L. 1993. *The Sonar of Dolphins*. Springer-Verlag, New York. 292 pp.
- Barros, N.B., y Odell, D.K. 1990. Food habits of bottlenose dolphins in the southeastern United States. *En: Leatherwood, S., Reeves, R.R. (Eds.), The bottlenose dolphin*. San Diego: Academic Press, 309-328.
- Blanco, C., Salomón, O., y Raga, J.A. 2001. Diet of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) in the western Mediterranean Sea. *Journal of Marine Biological Association of United Kingdom*, 81:1053-1058. DOI 10.1017/S0025315401005057.
- Brownell Jr., R.L., Findley, L.T., Vidal, O., Robles, A y Manzanilla-N., S. 1987. External morphology and pigmentation of the vaquita, *Phocoena sinus* (Cetacea: Mammalia). *Marine Mammal Science*, 3:22-30. DOI: 10.1111/j.1748-7692.1987.tb00149.x
- Brusca, R.C., Álvarez-Borrego, S., Hastings, P.A., y Findley, L.T. 2017. Colorado river flow and biological productivity in the northern gulf of California, Mexico. *Earth-Science Reviews*, 164:1-30. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.10.012.
- Buckland, S.T., Anderson, D.R., Burnham, K.P. y Laake, J.L. 1993. *Distance sampling: Estimating abundance of biological populations*. Chapman and Hall, New York and London. 446 pp.
- Campos, A.M. 2012. Interacción acústica de cetáceos menores en el Alto Golfo de California, México. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE. 99p.
- Cárdenas-Hinojosa, G., de la Cueva H., Gerrodette, T., y Jaramillo-Legorreta, A.M. 2020. Distribution of the acoustic occurrence of dolphins during the summers 2011 to 2015 in the Upper Gulf of California, Mexico. *PeerJ*. 8:e9121. DOI: 10.7717/peerj.9121
- Carlén, I., Thomas, L., Carlström, J., Amundin, M., Teilmann, J., Tregenza, N., Tougaard, J., Koblitz, J.C., Sveegaard, S., Wennerberg, D., Loisa, O., Dähne, M., Brundiers, K., Kosecka, M., Kyhn, L.A., Ljungqvist, C.T., Pawliczka, I., Koza, R., Arciszewski, B., Galatius, A., Jabbusch, M., Laaksonlaita, J., Niemi, J., Lytinen, S., Gallus, A., Benke, H., Blankett, P., Skóra, K.E., y Acevedo-Gutiérrez, A. 2018. Basin-scale distribution of harbour porpoises in the Baltic Sea provides basis for effective conservation actions. *Biological Conservation*, 226: 42-53. DOI: 10.1016/j.biocon.2018.06.031.

- Carriquiry, J.D. y Sánchez. A. 1999. Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Marine Geology*, 158:125-145. DOI: 10.1016/S0025-3227(98)00189-3
- Castellote, M., Brotons, J.M., Chicote, C., Gazo, M., y Cerdà, M. 2015. Long-term acoustic monitoring of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in marine protected areas in the Spanish Mediterranean Sea. *Ocean & Coastal Management*, 113:54-66. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2015.05.017
- Chambers, J.M. y Hastie, T.J. (Eds.) 1992. *Statistical Models in S*. Chapman & Hall, London
- CIRVA. 2012. Fourth Meeting of the International Committee for the Recovery of the Vaquita. Report. Ensenada, Baja California, February 20–23, 2012.
- CIRVA. 2014. Fifth Meeting of the International Committee for the Recovery of the Vaquita. Report. Ensenada, Baja California, July 08–10, 2014.
- CIRVA. 2016. Seventh Meeting of the International Committee for the Recovery of the Vaquita. Report. Ensenada, Baja California, May 10–13, 2016.
- CIRVA. 2019. Eleventh Meeting of the International Committee for the Recovery of the Vaquita. Report. Ensenada, Baja California, February 19–21, 2019.
- Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES). 1997. CITES-listed species database.
- Cotter, M.P., Maldini, D., y Jefferson, T.A. 2012. “Porpoicide” in California: Killing of harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) by coastal bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). *Marine Mammal Science*, 28:E1-E15. DOI: 10.1111/j.1748-7692.2011.00474.x
- Cudney Bueno, R. y Turk Boyer, P.J. 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.
- D'Agrosa, C., Lennert-Cody, C.E, y Vidal, O. 2000. Vaquita bycatch in Mexico's artisanal gillnet fisheries: driving a small population to extinction. *Conservation Biology*, 14:1110-1119. DOI: 10.1046/j.1523-1739.2000.98191.x
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 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. 10 de junio de 1993.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2005. SEMARNAT: Acuerdo mediante el cual se establece el área de refugio para la protección de la vaquita (*Phocoena sinus*). 8 de septiembre de 2005.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2010. NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental, especies nativas de flora y fauna silvestres de México, categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio, y lista de especies en riesgo. 30 de diciembre de 2010.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2015. SEMARNAT: Acuerdo por el que se suspende temporalmente la pesca comercial mediante el uso de redes de enmalle, cimbras y/o palangres operadas con embarcaciones menores, en el Norte del Golfo de California. 10 de abril de 2015.

- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2017. SEMARNAT-SAGARPA: Acuerdo por el que se prohíben artes, sistemas, métodos, técnicas y horarios para la realización de actividades de pesca con embarcaciones menores en aguas marinas de jurisdicción federal de los Estados Unidos Mexicanos en el Norte del Golfo de California, y se establecen sitios de desembarque, así como el uso de sistemas de monitoreo para dichas embarcaciones. 30 de junio de 2017.
- Elliott, R.G., Dawson, S.M., y Henderson, S. 2011. Acoustic monitoring of habitat use by bottlenose dolphins in Doubtful Sound, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 45(4):637-649. DOI: 10.1080/00288330.2011.570351.
- Elliot, R.G., Dawson, S.M., y Rayment, W.J. 2012. Optimizing Tpod settings and testing range of detection for bottlenose dolphins in Doubtful Sound, New Zealand. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 92:1901-1907. DOI: 10.1017/S002531541100035X
- Endangered Species Act (ESA). 1985. The Endangered Species Act of 1985. Fish and Wildlife Service. Government of the United States of America.
- Evans, W.E. 1982. Distribution and differentiation of stock of *Delphinus delphis* Linnaeus in the northeastern Pacific. *Mammals in the sea 4: small cetaceans, seals, sirenians, and otters*. FAO Fisheries Series, 5(4):45-66.
- Fox, J., y Weisberg, S. 2019. An R companion to applied regression. Third edition. Sage Publications.
- García-Gobos, I., Van Waerebeek, K., Reyes, J.C., Alfaro-Shigueto, J., y Arias-Schreiber, M. 2007. Prey occurrence in the stomach contents of four small cetacean species in Peru. *The Latin American Journal of Aquatic Mammals*, 6(2):171-183. DOI: 10.5597/lajam00122.
- Gerrodette, T., Fleischer, L.A., Pérez-Cortés, H. y Villa-Ramírez, B. 1995. Distribution of the vaquita, *Phocoena sinus*, based on sightings from systematic surveys. Pp. 273-281 *En: Bjørge, A., Donovan, G.P. (Eds.), Biology of the Phocoenids*. Reports of the International Whaling Commission (Special Issue 16). Cambridge, U.K. 552 pp.
- Gerrodette, T., Taylor, B., Swift, R., Rankin, S., Jaramillo-Legorreta, A.M., y Rojas-Bracho, L. 2011. A combined visual and acoustic estimate of 2008 abundance, and change in abundance since 1997, for the vaquita, *Phocoena sinus*. *Marine Mammal Science*, 27(2):E79-E100. DOI: 10.1111/j.1748-7692.2010.00438.x
- Henderson, E.E., Hildebrand, J.A., Smith, M.H., y Falcone, E.A. 2012. The behavioral context of common dolphin (*Delphinus* sp.) vocalizations. *Marine Mammal Science* 28:439-460 DOI: 10.1111/j.1748-7692.2011.00498.x
- Henry, A., Taylor, B.L., Rojas-Bracho, L., Rankin, S., Jaramillo-Legorreta, A., Akamatsu, T., Barlow, J., Gerrodette, T., Hall, C., Jackson, A., Redfern, J., Swift, R., y Tregenza, N. 2012. Cruise report for the Vaquita Expedition in 2008 conducted aboard NOAA Ship David Starr Jordan, R/V Koipai Yu-Xa, and the Vaquita Express. Technical memorandum. NOAA-TM-NMFS-SWFSC-495. 41p.
- Hernandez-Milian, G., Berrow, S., Santos, M.B., Reid, D., y Rogan E. 2015. Insights into the trophic ecology of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in Irish Waters. *Aquatic Mammals*, 41(2):226-239. DOI: 10.1578/AM.41.2.2015.226.

- Hohn, A.A., Read, A.J., Fernandez, S., Vidal, O., y Findley, L.T. 1996. Life history of the vaquita, *Phocoena sinus* (Phocoenidae, Cetacea). *Journal of Zoology*, 239(2): 235–251. DOI: 10.1111/j.1469-7998.1996.tb05450.x
- Isojunno, S., Matthiopoulos, J. y Evans, P. G. H. 2012. Harbour porpoise habitat preferences: robust spatio-temporal inferences from opportunistic data. *Marine Ecology-Progress Series*, 448:155-242. DOI: 10.3354/MEPS09415
- IUCN. 1996. IUCN Red List of Threatened Animals. IUCN (The World Conservation Union). Gland, Switzerland.
- Jacobson, E.K., Forney, K.A., y Harvey, J.T. 2015. Acoustic evidence that harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) avoid bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). *Marine Mammal Science*. DOI: 10.1111/mms.12154
- Jaramillo-Legorreta, A.M. 2008. Estatus actual de una especie en peligro de extinción, la vaquita (*Phocoena sinus*): una aproximación poblacional con métodos acústicos y bayesianos. Tesis de Doctorado. UABC. 129p.
- Jaramillo-Legorreta, A.M., Rojas-Bracho, L., y Gerrodette, T. 1999. A new abundance estimate for vaquitas: first step for recovery. *Marine Mammal Science*, 15:957-973. DOI: 10.1111/j.1748-7692.1999.tb00872.x
- Jaramillo-Legorreta, A.M., Rojas-Bracho, L., Taylor, B., Barlow, J., y Tregenza, N. 2011. Implementation of an acoustic monitoring scheme for vaquita, design and pilot test phases and a review of the Recovery Plan. Paper SC/63/SM22 presented presented to the International Whaling Commission Scientific Committee. Tromsø, Norway. May 27-June 7, 2011. 6p.
- Jaramillo-Legorreta, A.M., Cárdenas-Hinojosa, G., Nieto-García, E., y Rojas-Bracho, L. 2012. First sampling period of the acoustic monitoring scheme of vaquita (*Phocoena sinus*) population trend. Paper SC/64/SM19 presented to the International Whaling Commission Scientific Committee. Panama. June 11-24, 2012. 9p.
- Jaramillo-Legorreta, A.M., Cárdenas-Hinojosa, G., Nieto-García, E., y Rojas-Bracho, L. 2013. Status of the acoustic monitoring scheme for population trend of vaquita (*Phocoena sinus*) after two sampling periods. Paper SC/65a/SM13 presented to the International Whaling Commission Scientific Committee. Jeju, Korea. June 3-15. 10p.
- Jaramillo-Legorreta, A., Rojas-Bracho, L., Cárdenas-Hinojosa, G., Nieto-García, E., Valverde, F., Arozamena, R., Tregenza, N., Gerrodette, T., Taylor, B., Barlow, J., Ragen, T., Henry, A., y Jacobsen, E. 2014. Acoustic Steering Committee Workshop. Report. April 24-25, Ensenada, B.C. 30p.
- Jaramillo-Legorreta, A., Cárdenas-Hinojosa, G., Nieto-García, E., Rojas-Bracho, L., Ver Hoef, J., Moore, J., Tregenza, N., Barlow, J., Gerrodette, T., Thomas, L., y Taylor, B. 2017. Passive acoustic monitoring of the decline of Mexico's critically endangered vaquita. *Conservation Biology*, 31(1):183-191. DOI: 10.1111/cobi.12789
- Jaramillo-Legorreta, A., Cárdenas-Hinojosa, G., Nieto-García, E., Rojas-Bracho, L., Thomas, L., Ver Hoef, J., Moore, J., Taylor, B., Barlow, J., y Tregenza, N. 2019. Decline towards extinction of Mexico's vaquita porpoise (*Phocoena sinus*). *Royal Society Open Science*, 6:190598 DOI: 10.1098/rsos.190598.

- Jepson, P.D. y Baker, J.R. 1998. Bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) as a possible cause of acute traumatic injuries in porpoises (*Phocoena phocoena*). *Veterinary Record*, 143:614-615.
- Kamminga, C., Stuart, A.C., y Silber, G.K. 1996. Investigations on cetacean sonar XI: Intrinsic comparison of the wave shapes of some members of the Phocoenidae family. *Aquatic Mammals*, 22:45-55.
- Kyhn, L.A., Tougaard, J., Thomas, L., Duve, L.R., Stenback, J., Amundin, M., y Teilmann, J. 2012. From echolocation clicks to animal density acoustic sampling of harbor porpoises with static data loggers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131:550-560. DOI: 10.1121/1.3662070.
- Lavín, M.F., y Sánchez S. 1999. On how the Colorado River affected the hydrography of the upper Gulf California. *Continental Shelf Research*, 19: 1545-1560.
- Lavín, M.F. y S.G. Marinone. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California, 173-204. *En: Velasco-Fuentes et al. (Eds.), Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 376p.
- Lavín, M.F., Godinez, S.V.M. y Sánchez, L.G.A. 1998. Inverse-estuarine features of the upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47: 769-795. DOI: 10.1006/ecss.1998.0387
- Lusseau, D. 2014. Ecological constraints can affect the propensity for population consequences of whalewatching disturbances. *En: Higham J.E.S., Bejder, L. (Eds), Whale watching and sustainable tourism*. Cambridge University Press, 229-241. DOI: 10.1017/CBO9781139018166.019.
- Madsen, P.T., Carder, D.A., Bedholm, K., y Ridgway, S.H. 2005. Porpoise clicks from a sperm whale nose—convergent evolution of 130 kHz pulses in toothed whale sonars? *Bioacoustics* 15:195–206. DOI: 10.1080/09524622.2005.9753547
- Malme, C.I., Miles, P.R., Miller, G.W., Richardson, W.J., Roseneau, D.G., Thomson, D.H. y Greene Jr, C.R. 1989. Analysis and ranking of the acoustic disturbance potential of petroleum industry activities and other sources of noise in the environment of marine mammals in Alaska. BBN Rep. 6945, OCS Study MMS 89-0006. Cambridge, Massachusetts: BBN Systems & Technology Corporation.
- Mellinger, D.K., Stafford, K.M., Moore, S., Dziak, R.P. y Matsumoto, H. 2007. An Overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20(4): 36-45. DOI: 10.5670/oceanog.2007.03
- Norris, K.S. y McFarland, W.N. 1958. A new harbor porpoise of the genus *Phocoena* from the Gulf of California. *Journal of Mammalogy*, 39(1): 291–340. DOI: 10.2307/1376606
- Norris, K.S. y Prescott, J.H. 1961. *Observation on Pacific Cetaceans of California and Mexican Waters*. University of California Publications in Zoology, 63: 291-401.
- Nuuttila, H.K., Thomas, L., Hiddink, J.G., Meier, R., Turner, J.R., Bennell, J.D., Tregenza, N., y Evans, P.G.H. 2013. Acoustic detection probability of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, with static acoustic dataloggers in Cardigan Bay, Wales. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134: 2596–2609. DOI: 10.1121/1.4816586
- Palmer, K.J., Brookes, K., y Rendell, L. 2017. Categorizing click trains to increase taxonomic precision in echolocation click loggers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142:863 DOI: 10.1121/1.4996000.

- Pate, S.M., y McFee, W.E. 2012. Prey species of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) from South Carolina Waters. *Southeastern Naturalist* 11(1):1-22. DOI: 10.1656/058.011.0101.
- 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.
- Pérez-Cortés, H., Silber, G.K., y Villa-Ramírez, B. 1996. Contribución al conocimiento de la alimentación de la vaquita, *Phocoena sinus*. *Ciencia Pesquera*, 66-71.
- Pirotta, E., Merchant, N.D., Thompson, P.M. Barton, T.R., y Lusseau, D. 2015. Quantifying the effect of boat disturbance on bottlenose dolphin foraging activity. *Biological Conservation*, 181: 82-89. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.11.003
- Philpott, E., Englund, A., Ingram, S., y Rogan, E. 2007. Using TPODs to investigate the echolocation of coastal bottlenose dolphins. *Journal of Marine Biological Association of United Kingdom*, 87:11-17. DOI: 10.1017/S002531540705494X.
- Pierce, G. J., Caldas, M., Cedeira, J., Santos, M. B., Llavona, A., Covelo, P., Martinez, G., Torres, J., Sacau, M. y López, A. 2010. Trends in cetacean sightings along the Galician coast, north-west Spain, 2003-2007, and inferences about cetacean habitat preferences. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 90:1547-1560
- Pusineri, C., Magnin, V., Meynier, L., Spitz, J., Hassani, S., y Ridoux, V. 2007. Food and feeding ecology of the common dolphin (*Delphinus delphis*) in the oceanic northeast Atlantic and comparison with diet in neritic areas. *Marine Mammal Science*, 23(1):30-47. DOI: 10.1111/j.1748-7692.2006.00088.x.
- R Core Team. 2018. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Available at <https://www.R-project.org/> .
- Rayment, W., Dawson, S., y Slooten, E. 2009. Trialing an automated passive acoustic detector (T-POD) with Hector's dolphins (*Cephalorhynchus hectori*). *Journal of Marine Biological Association of United Kingdom*, 89:1015-1022. DOI: 10.1017/S0025315409003129.
- Roberts, B.L., y Read, A.J. 2015. Field assessment of C-POD performance in detecting echolocation click trains of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). *Marine Mammal Science*, 31:169-190. DOI: 10.1111/mms.12146.
- Robbins, J.R., Brandecker, A., Cronin, M., Jessopp, M., McAllen, R., y Culloch, R. 2015. Handling dolphin detections from C-PODs, with the development of acoustic parameters for verification and the exploration of species identification possibilities. *Bioacoustics*, 1-12. DOI: 10.1080/09524622.2015.1125789
- Rodríguez-Quiroz, G., Aragón-Noriega, E.A., Valenzuela-Quiñonez, W., y Esparza-Leal, H.M. 2010. Artisanal fisheries in the conservation zones of the Upper Gulf of California. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 45:89-98. DOI: 10.4067/S0718-19572010000100008.
- Rodríguez-Quiroz, G., Aragón-Noriega, E.A., Cisneros-Mata, M.A., y Ortega-Rubio, A. 2012. Fisheries and biodiversity in the in the upper gulf of California. *En: Marcelli, M., ed. Oceanography*, 281-296. Croatia: InTech Publishers, 348 pp. DOI: 10.5772/23064.

- Rojas-Bracho, L. y Jaramillo-Legorreta, A.M. 2002. Vaquita *Phocoena sinus*. 1277-1280 En: Perrin, W.F., Würsig, B., Thewissen, J.G.M. (Eds.), Encyclopedia of Marine Mammals. Academic Press, San Diego, California, USA. 1414pp.
- Rojas-Bracho, L., Reeves, R.R. y Jaramillo-Legorreta, A.M. 2006. Conservation of the vaquita *Phocoena sinus*. Mammal Review, 36:179-216. DOI: 10.1111/j.1365-2907.2006.00088.x
- Rojas-Bracho, L., Jaramillo-Legorreta, A.M., Cárdenas-Hinojosa, G., Nieto-García, E., Ladrón de Guevara, P., Taylor, B., Barlow, J., Gerrodette, T., Henry, A., Tregenza, N., Swift, R., y Akamatsu, T. 2010. Assessing trends in abundance for vaquita using acoustic monitoring: Within refuge plan and outside refuge research needs. NOAA Technical Memorandum NMFS. NOAA-TM-NMFS-SWFSC-459. 39p.
- Rojas-Bracho, L., Jaramillo-Legorreta, A.M., Cárdenas-Hinojosa, G., Nieto-García, E., Valverde, F., Arozamena, R., Taylor, B., Barlow, J., Henry, A., y Tregenza, N. 2011. Assessing trends in abundance for vaquita using acoustic monitoring: Steering Committee Report on pilot testing phase and recommendations for full deployment. Report. San Felipe, B.C. 27p.
- Rojas-Bracho, L. y Reeves, R.R. 2013. Vaquitas and gillnets: Mexico's ultimate cetacean conservation challenge. Endangered Species Research, 21: 77-87. DOI: 10.3354/esr00501
- Rojas-Bracho, L., Gulland, F. M. D., Smith, C., Taylor, B., Wells, R.S., Thomas, P.O., Bauer, B., Heide-Jørgensen, M.P., Teilmann, J., Dietz, R., Balle, J.D., Jensen, M.V., Sinding, M.H.S., Jaramillo-Legorreta, A., Abel, G., Read, A., Westgate, A.J., Colegrove, K., Gomez, F., Martz, K., Rebolledo, R., Ridgway, S., Rowles, T., Van Elk, C., Boehm, J., Cárdenas-Hinojosa, G., Constandse, R., Nieto-García, E., Phillips, W., Sabio, D., Sánchez, R., Sweeney, J., Townsend, F., Vivanco, J., Vivanco, J.C., y Walker, S. 2019. A field effort to capture critically endangered vaquitas (*Phocoena sinus*) for protection from entanglement in illegal gillnets. Endangered Species Research, 36:11–27.
- Ross, H.M. y Wilson, B. 1996. Violent interactions between bottlenose dolphins and harbour porpoises. Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences, 263:283-286. DOI: 10.1098/rspb.1996.0043
- Sánchez-Velasco, L., Lavín, M.F., Jiménez-Rosenberg, S.P.A., Montes, J.M., y Turk-Boyer, P.J. 2012. Larval fish habitats and hydrography in the Biosphere Reserve of the Upper Gulf of California. 2008. Continental Shelf Research, 33:89-99. DOI: 10.1016/j.csr.2011.11.009.
- Santos, M.B., Fernández, R., López, A., Martínez, J.A., y Pierce, G.J. 2007. Variability in the diet of bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus*, in Galician waters, north-western Spain, 1990-2005. Journal of Marine Biological Association of the United Kingdom, 87:231-241. DOI: 10.1017/S0025315407055233.
- Santos, M.B., German, I., Correia, D., Read, F.L., Martinez, C.J., Caldas, M., López, A., Velasco, F., y Pierce, G.J. 2013. Long-term variation in common dolphin diet in relation to prey abundance. Marine Ecology Progress Series, 481:249-268. DOI: 10.3354/meps10233.
- SEMARNAT. 2008. Programa de Acción para la Conservación de la Especie: Vaquita. 106p. Recuperado el 08/02/2020 de: <https://www.gob.mx/conanp/documentos/programa-de-accion-para-la-conservacion-de-la-especie-vaquita-phocoena-sinus>
- Silber, G.K. 1990. Occurrence and distribution of the Vaquita *Phocoena sinus* in the Northern Gulf of California. Fishery Bulletin, 88:339-346.

- Silber, G.K. 1991. Acoustic signals of the vaquita (*Phocoena sinus*). *Aquatic Mammals*, 17:130-133.
- Silber, G.K. y Norris, K.S. 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., Newcomer, M.W., Silber, P.C., Pérez-Cortés, M.H., y Ellis, G.M. 1994. Cetaceans of the northern Gulf of California: distribution, occurrence, and relative abundance. *Marine Mammal Science*, 10:283-298. DOI: 10.1111/j.1748-7692.1994.tb00483.x.
- Simon, M., Nuuttila, H., Reyes-Zamudio, M.M., Ugarte, F., Verfuß, U., y Evans, P.G.H. 2010. Passive acoustic monitoring of bottlenose dolphins and harbour porpoise, in Cardigan Bay, Wales, with implications for habitat use and partitioning. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 90(8):1539–1545. DOI: 10.1017/S0025315409991226
- Taylor, B.L., Rojas-Bracho, L., Moore, J., Jaramillo-Legorreta, A., Ver Hoef, J.M., Cárdenas-Hinojosa, G., Nieto-García, E., Barlow, J., Gerrodette, T., Tregenza, N., Thomas, L., y Hammond, P.S. 2017. Extinction is imminent for Mexico's endemic porpoise unless fishery bycatch is eliminated. *Conservation Letters*, 10:588-595. DOI: 10.1111/conl.12331.
- Taylor, B.L., Wells, R.S., Olson, P.A., Brownell, R.L., Jr., Gulland, F.M.D., Read, A.J., Valverde-Esparza, F.J., Ortiz-García, O.H., Ruiz-Sabio, D., Jaramillo-Legorreta, A.M., Nieto-García, E., Cardenas-Hinojosa, G. y Rojas-Bracho, L. 2019. Likely annual calving in the vaquita, *Phocoena sinus*: A new hope? *Marine Mammal Science*, 35: 1603-1612. DOI: 10.1111/mms.12595
- Temple, A.J., Tregenza, N., Amir, O.A., Jiddawi, N y Berggren, P. 2016. Spatial and temporal variations in the occurrence and foraging activity of coastal dolphins in Menai Bay, Zanzibar, Tanzania. *PLoS ONE* 11(3): e0148995. DOI: 10.1371/journal.pone.0148995
- Thomas, L., Jaramillo-Legorreta, A., Cárdenas-Hinojosa, G., Nieto-García, E., Rojas-Bracho, L., Ver Hoef, J.M., Moore, J., Taylor, B., Barlow, J., y Tregenza N. 2017. Last call: passive acoustic monitoring shows continued rapid decline of critically endangered vaquita. *The Journal of the Acoustical Society of America Express Letters*, 142: EL512-EL517. DOI: 10.1121/1.5011673.
- Torre, J., Vidal, O., y Brownell, R.L. 2014. Sexual dimorphism and developmental patterns in the external morphology of the vaquita, *Phocoena sinus*. *Marine Mammal Science*, 30(4): 1285–1296. DOI: 10.1111/mms.12106
- Tregenza, N. 2014. Manual for CPOD. Disponible en: www.chelonia.co.uk/downloads/CPOD.pdf.
- Tregenza, N., Dawson, S., Rayment, W., y Verfuss, U. 2016. Listening to echolocation clicks with PODs. *En: Au, W.W.L., Lammers, M.O. (Eds.), Listening in the Ocean. Modern acoustics and signal processing.* New York: Springer, 163-206. DOI: 10.1007/978-1-4939-3176-7_7.
- Turvey, S.T., Pitman, R.L., Taylor, B., Barlow, J., Akamatsu, T., Barrett, L.A., Zhao, X., Reeves, R.R., Stewart, B.S., Wang, K., Wei, Z., Zhang, X., Pusser, L.T., Richlen, M., Brandon, J.R. y Wang, D. 2007. First human-caused extinction of a cetacean species? *Biology Letters*. 3(5):537-540. DOI: 10.1098/rsbl.2007.0292
- Venables, W.N., y Ripley, B.D. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. 4th edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0. DOI: 10.1007/978-0-387-21706-2.

- Vidal, O. 1995. Population biology and incidental mortality of the Vaquita, *Phocoena sinus*. pp. 247-272. En: Bjørge, A., Donovan, G.P. (Eds.). Biology of the Phocoenids. International Whaling Commission, Cambridge, U.K. 552 pp.
- Vidal, O., Brownell, R.L., y Findley, L.T. 1999. Vaquita *Phocoena sinus* Norris and McFarland, 1958. En: Ridgway, S.H., Harrison, R. (Eds.), Handbook of marine mammals 6. San Diego, California: Academic Press, 357-378.
- Von Fersen, L., Kamminga, L.C., y Seidl, A. 2000. Estudios preliminares sobre el comportamiento de un ejemplar de Franciscana (*Pontoporia blainvillei*) en Mundo Marino, Argentina. En: Report of the Third Workshop for Coordinated Research and Conservation of the Franciscana Dolphin (*Pontoporia blainvillei*) in the Southwestern Atlantic (UNEP/CMS, ed), pp. 30–33.
- Walker, J.L., Potter, C.W., y Macko, S.A. 1999. The diets of modern and historic bottlenose dolphin populations reflected through stable isotopes. Marine Mammal Science, 15:335-350. DOI: 10.1111/j.1748-7692.1999.tb00805.x.
- Wiggins, S.M., Frasier, K.E., Henderson, E.E., y Hildebrand, J.A. 2013. Tracking dolphin whistles using an autonomous acoustic recorder array. Journal of Acoustic Society American, 133:3813-3818. DOI: 10.1121/1.4802645.
- Wisniewska, D.M., Johnson, M., Teilmann, J., Rojano-Doñate, L., Shearer, J., Sveegaard, S., Miller, L.A., Siebert, U., y Madsen, P.T. 2016. Ultra-high foraging rates of harbor porpoises make them vulnerable to anthropogenic disturbance. Current Biology, 26(11):1441-1446. DOI: 10.1016/j.cub.2016.03.069.
- Woodley, T.H., y Read, A.J. 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. DOI: 10.1139/f91-284
- Young, D.D., y Cockcroft, V.G. 1994. Diet of common dolphins (*Delphinus delphis*) off the south-east coast of southern Africa: opportunism or specialization. Journal of Zoology, 234:41-53. DOI: 10.1111/j.1469-7998.1994.tb06055.x.
- Zar, J.H. 1999. Biostatistical analysis, 4th edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
- Zein, B., Woelfing, B., Dähne, M., Schaffeld, T., Ludwig, S., Rye, J.H., Baltzer, J., Ruser, A., y Siebert, U. 2019. Time and tide: Seasonal, diel and tidal rhythms in Wadden Sea harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). Plos One. DOI: 10.1371/journal.pone.0213348

Anexos

Anexo A.

Tabla 10. Esfuerzo y chasquidos de delfines recolectados por sitio de muestreo durante los veranos de 2011 a 2015.

Sitio	Días de muestreo					Chasquidos de delfines				
	2011	2012	2013	2014	2015	2011	2012	2013	2014	2015
1	62	61	58	62	62	45,029	18,291	21,562	91,364	33,940
2	41	61	58	62	62	9,451	1,412	13,734	10,588	3,942
3	62	61	X	62	62	63,174	83	X	6,667	4,532
4	62	61	58	62	62	15,812	4,237	3,752	25,724	30,820
5	62	61	58	62	18	24,825	4,676	174	23,224	8
6	62	61	58	62	62	90,855	51	3,462	20,964	10,137
7	62	61	37	62	62	64,554	3,622	13,232	55,149	34,248
8	X	61	21	62	62	X	4,270	4,451	61,896	16,596
9	62	61	62	62	47	2,625	10,863	6,216	16,082	13,754
10	X	61	62	62	62	X	7,152	9,996	16,314	16,452
11	62	61	37	62	62	39,184	7,156	5,231	11,292	4,893
12	X	62	X	X	62	X	3,061	X	X	3,496
13	58	61	62	62	62	13,905	3,373	1,907	19,970	11,117
14	58	60	62	62	62	10,738	87	36,710	10,926	8,769
15	57	61	62	X	22	28,584	0	3,241	X	30
16	62	61	62	62	62	1,927	637	9,777	14,323	15,985
18	X	X	X	X	62	X	X	X	X	5,075
19	62	60	10	62	23	11	0	275	1,048	118
20	62	60	29	62	59	2,017	0	755	6,409	4,817
21	58	60	37	62	62	3,895	35	3,037	1,724	46
22	62	60	55	X	51	6,943	2,960	1,351	X	1,382
23	62	60	62	62	62	18,197	17,794	1,227	3,477	16,077
24	X	60	62	62	62	X	2,852	3,829	1,719	11,627
25	49	62	62	62	62	1,187	2,105	4,594	1,241	5,091
26	52	59	62	62	62	0	0	65,330	194	1,516
27	62	53	62	X	62	2,793	0	11,824	X	1,573
28	62	62	62	62	49	0	104	6,964	3,819	2,495
29	57	62	62	X	62	429	694	776	X	2,845
30	62	62	62	62	62	1,341	986	533	165	289

31	62	62	42	62	62	2,635	0	50	2,011	12,305
32	20	62	62	62	62	0	0	0	3,872	7,943
34	X	62	11	34	62	X	840	78	4,535	7,242
35	62	62	50	62	39	660	197	285	5,354	0
36	48	62	44	62	62	0	340	332	2,058	706
37	47	62	45	62	62	807	4,234	609	970	1,865
38	62	62	62	62	62	51	50	600	1,320	672
39	61	54	62	62	62	99	0	517	457	128
40	62	62	62	62	34	12	336	726	481	544
41	54	34	62	62	62	0	94	55	599	1,270
42	46	62	62	62	62	0	0	0	4,512	122
43	62	62	62	62	53	776	707	1,275	31,296	62,544
44	62	62	62	62	62	3,243	50	194	1,610	16
45	62	62	62	62	62	0	0	0	725	185
46	48	62	49	62	62	0	0	351	1,098	1,313
47	57	62	62	62	62	6,211	3,142	5,377	1,051	548
48	43	62	54	62	61	2,541	5,891	55	427	350
Totales	2,280	2,714	2,299	2,452	2,626	464,511	112,382	244,444	466,655	359,423

Anexo B.

Tabla 11. Combinación de las 26 fórmulas de las variables de los modelos lineales generalizados para el conteo de los chasquidos de ecolocación de delfines. Se muestra el valor AIC para cada modelo. Las interacciones entre las variables predictoras se representan con una “*”.

Combinación de variables	Varianza explicada	AIC	Notas
Todas las variables	14.90	73713	El algoritmo no convergió
Variables temporales	5.26	74381	
Variables espaciales	8.81	74255	El algoritmo no convergió
Variable antropogénica	0.07	74677	
Variables biológicas (vaquita) y oceanográficas (temperatura del mar, profundidad y velocidad marea)	2.69	74486	
Profundidad + sitio + día-noche + ecosonda + velocidad marea + vaquitas + temperatura del mar	12.94	74401	El algoritmo no convergió
Día-noche + mes + temporada de muestreo + velocidad marea + UTM norte + chasquidos de vaquita	5.34	75200	El algoritmo no convergió
Día-noche + mes + temporada de muestreo + velocidad marea + sitio muestreo + vaquita + temperatura	14.83	74567	El algoritmo no convergió
Sitio de muestreo + Día-noche + vaquita + temperatura	12.86	74697	El algoritmo no convergió
Sitio de muestreo	8.81	74225	
Temperatura del mar + sitio de muestreo + día-noche	12.74	74710	El algoritmo no convergió
Sitio de muestreo + día-noche	12.39	73982	
Día-noche	2.98	74540	
Sitio + día-noche + velocidad marea + vaquita + temperatura del mar	12.87	74698	El algoritmo no convergió
Sitio de muestreo * día-noche + velocidad marea + vaquita + temperatura del mar	15.16	74621	El algoritmo no convergió
Sitio de muestreo * Día noche + velocidad vertical de marea	14.78	73889	
Día-noche * velocidad vertical de marea	3.00	74531	
Sitio de muestreo * velocidad vertical de marea	9.59	75072	El algoritmo no convergió

Sitio de muestreo * velocidad vertical de marea + día-noche	13.77	74776	El algoritmo no convergió
Sitio de muestreo * día-noche + velocidad vertical de marea * profundidad	14.79	73891	
Día-noche + vaquita + velocidad vertical de marea + sitio de muestreo	12.51	73966	
Sitio de muestreo + día-noche + velocidad vertical de marea	14.78	74210	
Sitio de muestreo + velocidad vertical de la marea	8.93	74210	
Sitio de muestreo + hora del día + velocidad vertical de la marea	13.47	73952	
Sitio de muestreo + hora del día + profundidad	13.28	73964	
Sitio de muestreo + hora del día + profundidad + día-noche	13.28	73964	