



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

## **Variación ecológica de los mamíferos marinos del Golfo de California**

**T E S I S**

que para optar por el grado de:

**Maestro en Ciencias del Mar y Limnología  
(Biología Marina)**

P r e s e n t a

**Emiliano Rodrigo Arroyo Sánchez**

**TUTOR PRINCIPAL**

Dr. Luis Medrano González  
Faculta de Ciencias UNAM

**Comité Tutorial:**

Dra. Livia Socorro León Paniagua  
Facultad de Ciencias UNAM

Dr. David Alberto Salas de León  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología UNAM

Dr. Carlos Jorge Robinson Mendoza  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología UNAM

Dr. Jaime Gómez Gutiérrez  
Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas IPN

**MÉXICO, CD. MX., mayo de 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Las Ballenas**

*“Los más notables peces de uno y otro mar son las ballenas, que dieron motivo a los antiguos cosmógrafos a llamar Punta de ballenas a la California, y las cuales hoy día dan su nombre a un canal en el golfo y a una ensenada en el mar del sur, por las muchas que frecuentan ambos parajes. Los marineros comúnmente las llaman ballenatos; acaso que, aunque hay muy grandes, no lo son tanto, como las que dice haber en otros mares. Los tiburones y los delfines, o toninas, son demasiadamente frecuentes en el golfo.”*

**Historia natural y crónica de la antigua California.  
Miguel del Barco**

## Agradecimientos

Agradezco al del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas al posgrado de Maestría y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de maestría durante 2017-2019 (CVU 863691) para realizar mis estudios y esta investigación. Agradezco profundamente al Dr. Luis Medrano González por seguir siendo guía, mentor, ejemplo y amigo en este camino de la mastozoología marina. Este es el segundo capítulo.

A la Dra. María de Jesús Vázquez Cuevas por seguir confiando y alentando mi formación humana, profesional y abrirme más horizontes en la ciencia.

Al Dr. Carlos Jorge Robinson Mendoza por la confianza y apoyo, nada de esto hubiera sido posible sin ti permitiéndonos hacer el trabajo de mastozoología marina a los cruceros CAPEGOLCA y su continuo apoyo.

A la Dra. Livia Socorro León Paniagua por el compromiso académico, los comentarios y el apoyo en el análisis y redacción de la tesis.

Al Dr. Jaime Gómez Gutiérrez (CICIMAR-IPN), por la confianza, disponibilidad y amistad, por ser siempre parte de esto, y por su detallada y positiva lectura a esta tesis.

Al Dr. David Alberto Salas Ponce de León, por abrir un gusto más en la ciencia, por sus comentarios y apoyo.

Al M. en C. Margarito Álvarez Tapia por su tutoría dentro y fuera de la tesis.

A la Dra. Vivette García Deister, por el apoyo económico en la logística para la campaña oceanográfica en el verano 2016.

A Iván Canek Díaz Gamboa, Elizabeth Briones, Arturo Misael Reyes Colín y Alfonso Corona Torres por su esfuerzo de observación en las campañas que participaron.

A la UNAM por permitirme permanecer en la institución y seguir preparándome para ser un mejor profesional y Ser humano.

A toda la tripulación del B/O El Puma (UNAM) por sus apoyos y su brillante trabajo en cada una de las campañas que participé.

A las tripulaciones científicas del B/O El Puma, estudiantes e investigadores del Laboratorio de Ecología de Pesquerías del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología–Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas–Instituto Politécnico Nacional, por el registro de información ambiental. Particularmente agradezco a todos los “Capegolcos”, los que sólo pasaron y los que siempre estuvieron: Jesús Abraham Ortiz Othón, Miriam Barrientos, Metzli Robles y Erick Robledo por la camaradería a bordo.

A todos los trabajadores académicos y administrativos del Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología por hacer de esto una experiencia única. Gracias por los espacios, tiempo y atención.

A los proyectos que apoyaron la realización de los cruceros CAPEGOLCA incluyendo los fondos de investigación de la Dirección de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Politécnico Nacional (2005–2019), CONACYT Ciencia Básica (FOSEMARNAT-2004-01-C01-144; 2012–178615–C01; 2016–01–284201) administrados por el Dr. Jaime Gómez Gutiérrez., e Instituto de Ciencias del Mar y Limnología–Universidad Nacional Autónoma de México (CONACYT Ciencia Básica 2010–152580–C01,A1-S-21459, y Beca Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT–UNAM IN20066610–3, IN210622, IN202319, IN20066610–3) e ICMyL–UNAM y CABO (PAPIIT, UNAM IN200610) otorgados al Dr. Carlos Jorge Robinson como apoyo del uso del B/O El Puma durante los cruceros oceanográficos de 2012–2019.

## **Dedicatoria**

A los que siempre han estado y estarán: Adriana, Joel, Montse y Julia. Gracias por sólo ser.

A Jesica Itzel de la Barrera Castañeda, por su cuidado, soporte, motivación y amor.

A familiares, amigos y compañeros que siguen hasta hoy pendientes del quehacer que me apasiona. A Eugenia Hernández por seguir siendo ejemplo de integridad, responsabilidad y fortaleza.

A Tuza y Nacho

“No se fracasa si existe un comienzo”

“PUMA ANTES DE LA CUNA”

“Estudia, aprende y enseña”

## Contenido

<b>1. Sumarios.....</b>	6
1.1. Resumen.....	6
1.2. Abstract.....	8
<b>2. Introducción.....</b>	10
2.1 El Golfo de California.....	12
2.2 Mamíferos marinos del Golfo de California.....	17
<b>3. Hipótesis y objetivos.....</b>	21
3.1. Hipótesis.....	21
3.2. Objetivo general.....	21
3.3. Objetivos particulares.....	21
<b>4. Método y materiales.....</b>	22
4.1. Trabajo de mar.....	22
4.2. Distribución del esfuerzo.....	24
4.3. Procesamiento de datos.....	24
4.3.1. <i>General</i> .....	24
4.3.2. <i>Variables ambientales/oceanográficas: Temperatura superficial del mar y concentración de clorofila a</i> .....	25
4.3.3. <i>Ocurrencia</i> .....	27
4.3.4. <i>Diversidad</i> .....	28
4.3.5. <i>Heterogeneidades en las curvas de acumulación de especies</i> .....	29
4.3.6. <i>Variación por gremios tróficos</i> .....	31
<b>5. Resultados.....</b>	32
5.1. Variación de las condiciones ambientales: Temperatura superficial del mar y concentración de clorofila.....	32
5.2. Diversidad de la mastofauna marina en el Golfo de California.....	33
5.3. Variación de la riqueza anual de los mamíferos marinos en el Golfo de California.....	36
5.4. Asociaciones y secciones de acumulación de la mastofauna marina.....	39
5.5. Variación de la ocurrencia y riqueza de especies.....	43
5.6. Variación por gremios tróficos.....	46
<b>6. Discusión.....</b>	51
<b>7. Conclusión.....</b>	57
7.1. Comentarios finales.....	59
<b>8. Referencias.....</b>	61

# 1. Sumarios

## 1.1. Resumen

Los mamíferos marinos poseen altas capacidades de regulación fisiológica y dispersión, su distribución es compleja y dinámica, y una comprensión de esos aspectos de su biología es indispensable para desarrollar estrategias legales adecuadas para su conservación. Aquí analizo la variación en la diversidad y ocurrencia de los mamíferos marinos del Golfo de California, así como de algunos de sus atributos faunísticos en relación con la variación ambiental en los veranos 2012, 2013, 2016, 2017 y 2018. Se navegó el Golfo de California a bordo del B/O El Puma con un esfuerzo total de 743 horas y 13 026 km en 74 días con el cual se compilaron 722 registros de 25 especies de mamíferos marinos. En agosto de 2012 se registró el mayor promedio de temperatura superficial del mar (TSM) y más baja concentración superficial de clorofila *a* (Chl-*a*). El verano 2013 tuvo el mayor promedio de concentración superficial de Chl-*a*. El verano 2016 no mostró mayor TSM promedio, pero correspondió a un fuerte evento de El Niño y tuvo bajo promedio de concentración superficial de Chl-*a*. El verano 2017 presentó valores medios de TSM y concentración superficial de Chl-*a*, y verano 2018 fue el verano con mayor variación en TSM y mayor promedio de la concentración superficial de Chl-*a*, posiblemente en relación con el paso de un huracán previo a las observaciones. Las curvas de acumulación de especies fueron diferentes entre veranos habiendo una aparente periodicidad tetranual. Las curvas de los veranos 2012, 2016 y 2018 mostraron saltos de diversidad lo cual sugiere que la comunidad de mamíferos marinos es heterogénea en el Golfo de California. Un análisis de clasificación de la ocurrencia de las especies (registros/h) mostró tres conjuntos o asociaciones de especies: I) especies abundantes y comunes en el golfo con poblaciones locales (11 spp), II) especies teutofágicas menos comunes y abundantes (6 spp), y III) especies tropicales menos comunes y abundantes (5 spp). Una especie teutofágica con distribución única en el centro del golfo y una especie tropical y rara conformaron grupos aparte. La parte inicial de las curvas de acumulación en general correspondió al ensamble I y los saltos de acumulación en 2012, 2016 y 2018 correspondieron a los ensambles II y III. La riqueza de especies en general aumentó con el promedio de TSM y la disminución relacionada del promedio de la concentración superficial de Chl-*a* anual. Si un alto valor de TSM y un bajo valor de



concentración superficial de Chl-a son indicadores de baja producción marina, entonces la mayor diversidad observada de mamíferos marinos en estas condiciones parece asociada a una mayor dispersión de estos animales por buscar alimento. La ocurrencia general de todas las especies fue casi constante lo que sugiere resiliencia de la mastofauna marina ante la variación ambiental del Golfo de California y el Océano Pacífico adyacente, pero con cambios interanuales en su distribución. Los veranos 2012, 2016 y 2018 que fueron los de menor concentración superficial de Chl-a promedio, mostraron baja ocurrencia y mayor diversidad de mamíferos planctófagos mientras que los veranos 2013 y 2017 que presentaron mayor promedio de concentración superficial de Chl-a, tuvieron menos diversidad y más ocurrencia de este gremio, especialmente de *Balaenoptera physalus*. En los mamíferos mayormente ictiófagos, *Zalophus californianus* fue más abundante en 2018 (el verano con mayor variabilidad ambiental), *Tursiops truncatus* fue más abundante en 2016 (el segundo verano con menor concentración superficial de Chl-a) y *Delphinus delphis* fue más abundante en 2013 (el verano con mayor concentración superficial de Chl-a). Las variaciones de ocurrencia entre los ictiófagos parecen asociadas a sus distintas afinidades tróficas en las que *Z. californianus* tiene una alta plasticidad, *T. truncatus* es más afín a la zona de termoclina somera y *D. delphis* es más afín a las zonas con surgencias costeras. Los mamíferos teutófagos mostraron mayor ocurrencia y diversidad en 2012 y 2016 (los que tuvieron menor concentración superficial de Chl-a). La diversidad y la ocurrencia de las especies planctófagas e ictiófagas variaron de manera inversa entre sí lo que también sugiere dispersión en condiciones de baja concentración superficial de Chl-a. La diversidad y la ocurrencia de las especies teutófagas variaron de manera paralela indicando una dinámica diferente de su distribución y abundancia. La ocurrencia de los planctófagos e ictiófagos en conjunto mostró una relación paralela a la ocurrencia de los sarcófagos, y una relación inversa con los teutófagos. Estos resultados indican que las variaciones de ocurrencia y diversidad de mamíferos marinos ante la variación ambiental del Golfo de California se deben a cambios de distribución de las especies provocados por su dispersión. Se observan dinámicas diferentes entre las especies de ecosistemas superficiales relacionados directamente con la producción fotosintética (planctófagos, ictiófagos y sarcófagos), y los ecosistemas de aguas profundas (teutófagos) los cuales no tienen una relación directa con la fotosíntesis y forman parte de una red trófica diferente.

## 1.2. Abstract

Marine mammals exhibit high capacities of physiological regulation and dispersion, their distribution is complex and dynamic, for a minimal understanding of these aspects of their biology to be indispensable in developing adequate policies for their conservation. Here I investigate the ecological variation of marine mammal fauna in the Gulf of California, this is, the variation in species diversity and occurrence as well as of some faunal attributes in relation to environmental variation in the summer seasons 2012, 2013, 2016, 2017, and 2018. The Gulf of California was navigated on board the R/V EL PUMA with a total effort of 743 hours and 13 026 km during 74 days from which 722 records of 25 marine mammal species were compiled. The highest mean of sea surface temperature (SST) and a low chlorophyll-*a* (Chl-*a*) concentration was recorded in August 2012, whilst the highest mean of Chl-*a* concentration in summer 2013. During summer 2016 did not have the highest SST mean but corresponded to a strong El Niño event and showed a low mean of Chl-*a* concentration. During summer 2017 showed medium SST and Chl-*a* concentration, whereas summer 2018 was the year with greater variation of SST and larger mean of Chl-*a* concentration, possibly related to a hurricane previous to the observations. The species accumulation plots were different among years showing an apparent four-year periodicity. The plots for summers 2012, 2016, and 2018 exhibited diversity jumps suggesting that the marine mammal community in the Gulf of California is heterogeneous. A classification of species based on their occurrence (records/h) showed three association sets: I) abundant and common species in the gulf (11 spp), II) less abundant and common teutophagic species (6 spp), and III) less abundant and common tropical species (5 spp). A teutophagic species distributed uniquely in the gulf center, and one tropical species rare worldwide, constituted other two separate groups. In general, the initial part of accumulation plots corresponded to assemblage I and accumulation jumps in years 2012, 2016, and 2018 corresponded to assemblages II and III. Species richness in general increased with annual SST average and the related decrease of mean Chl-*a* concentration. If a high average of SST and a low mean of Chl-*a* concentration indicate low marine productivity, then the higher diversity of marine mammals in these conditions seems associated with a higher dispersion of these animals in search of food. The general occurrence of all species was nearly constant suggesting resilience of marine mammal fauna to environmental variation in the Gulf of California and the adjacent Pacific

Ocean, although with changes in their distribution. During summers 2012, 2016 and 2018 showed low Chl-*a* concentrations as well as lower occurrence and higher diversity of planktophagous mammals, whilst years 2013 and 2017 showed a higher mean of Chl-*a* concentration together with lower diversity and higher occurrence of this guild, especially of *Balaenoptera physalus*. As for ichthyophagic mammals, *Zalophus californianus* was the most abundant in summer 2018 (the year with higher environmental variability), *Tursiops truncatus* was the most abundant species in summer 2016 (the second year with lower Chl-*a* concentration), and *Delphinus delphis* was the most abundant in summer 2013 (the year with higher surface Chl-*a* concentration). Occurrence variation among ichthyophagic mammals seems associated to different trophic affinities in which *Z. californianus* is highly plastic, *T. truncatus* is related to the thermocline zone and *D. delphis* is related to coastal upwells. Teutophagic mammals showed higher occurrence and diversity in summers 2012 and 2016 (the years with lower Chl-*a* concentration). The diversity and the occurrence of planktophagous and ichthyophagous species varied inversely among them also indicating dispersion in conditions of low Chl-*a* concentration. The diversity and occurrence of teutophagic species varied in parallel indicating different dynamics of their distribution and abundance. The occurrence of planktophagous and ichthyophagous species together showed a parallel relationship with the occurrence of sarcophagic species as well as an inverse relationship with the occurrence of teutophagic species. These results indicate that variations in the occurrence and diversity of marine mammals associated to the environmental variation in the Gulf of California are owed to changes in their distribution provoked by their dispersion. Different dynamics are observed for the species of superficial ecosystems, directly related with photosynthetic productivity (planktophagous, ichthyophagous, and sarcophagous), and the ecosystems in deep waters (teutophagous) that are not directly related with photosynthesis and are part of a higher trophic web.

## 2. Introducción

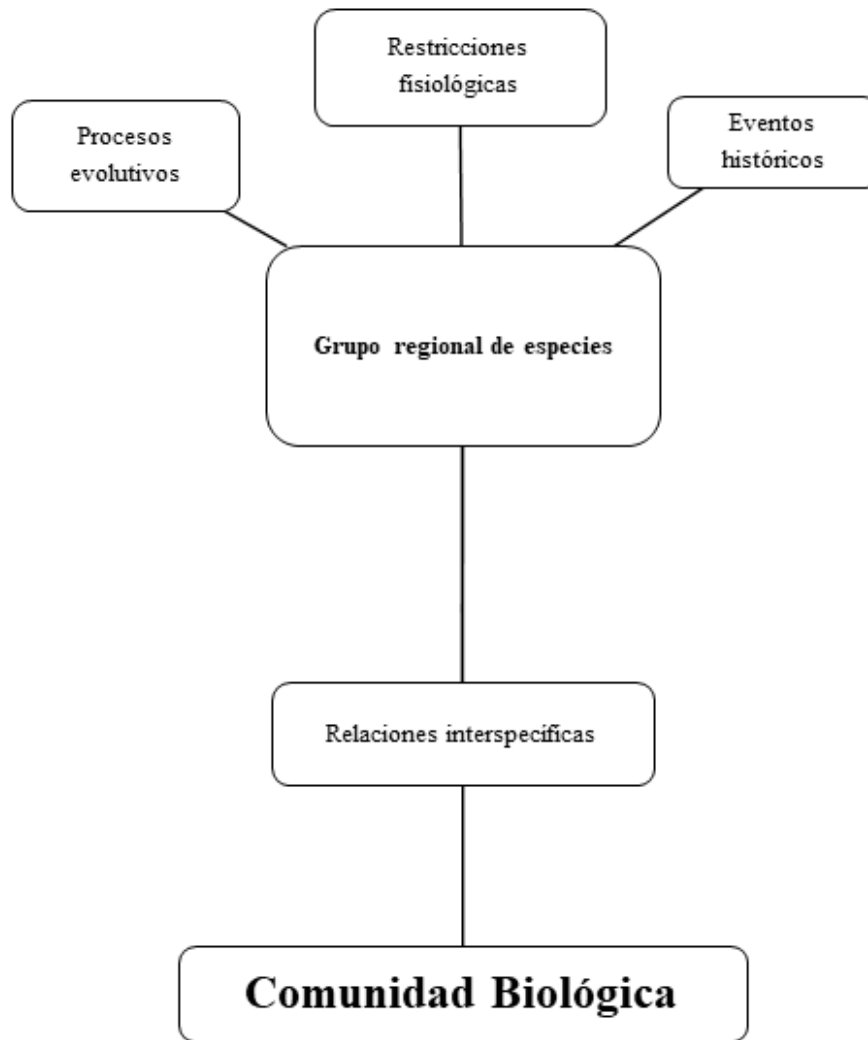
El 65% del territorio mexicano tiene línea de costa con una extensión litoral de 11 122 km, una plataforma continental con un área de 388 000 km<sup>2</sup> y la Zona Económica Exclusiva tiene un área de 3 149 920 km<sup>2</sup> (Arriaga *et al.* 1998; Contreras & Castañeda 2004; De la Lanza 2004; INEGI 2010). Los mares mexicanos están regionalizados en cinco zonas; en el Océano Atlántico, 1) Golfo de México y 2) Mar Caribe, y en el Océano Pacífico, 3) Pacífico Norte, 4) Golfo de California y 5) Pacífico Tropical. La topografía del fondo oceánico y la circulación de las masas de agua hacen un mosaico de ambientes dinámico y heterogéneo en donde se desarrollan diferentes comunidades biológicas (Wyrski 1965; De la Lanza 1991; Fig. 1) y masas de agua (Portela *et al.* 2016).



**Fig. 1.** Regiones oceanográficas de la zona económica exclusiva de México. PN, Pacífico Norte; GC, Golfo de California; PT, Pacífico Tropical; GM, Golfo de México; MC, Mar Caribe.

Una comunidad biológica es un grupo de especies distintas que interactúan entre ellas mediante relaciones numerosas relaciones simbióticas horizontales como competencia, comensalismo, mutualismo, y verticales como depredación, parasitismo, parasitoidismo (Whittaker 1970; Southwood 1987). Una de las principales metas en la investigación de las comunidades biológicas es identificar los procesos que determinan su diversidad,

distribución y dinámica, así como caracterizar las relaciones y asociaciones entre las especies. Sin embargo, la relación de estos procesos es complicada y logísticamente difícil de observar por sesgos metodológicos para registrar la ocurrencia y distribución de las especies de manera precisa. Estas interacciones son aún más complicadas por la influencia del ambiente físico y químico el cual es variable y exhibe variaciones complejas, esto es, no analizables como mecanismos deterministas, ni como leyes de grandes números (Gee & Gille 1987; Fig. 2).



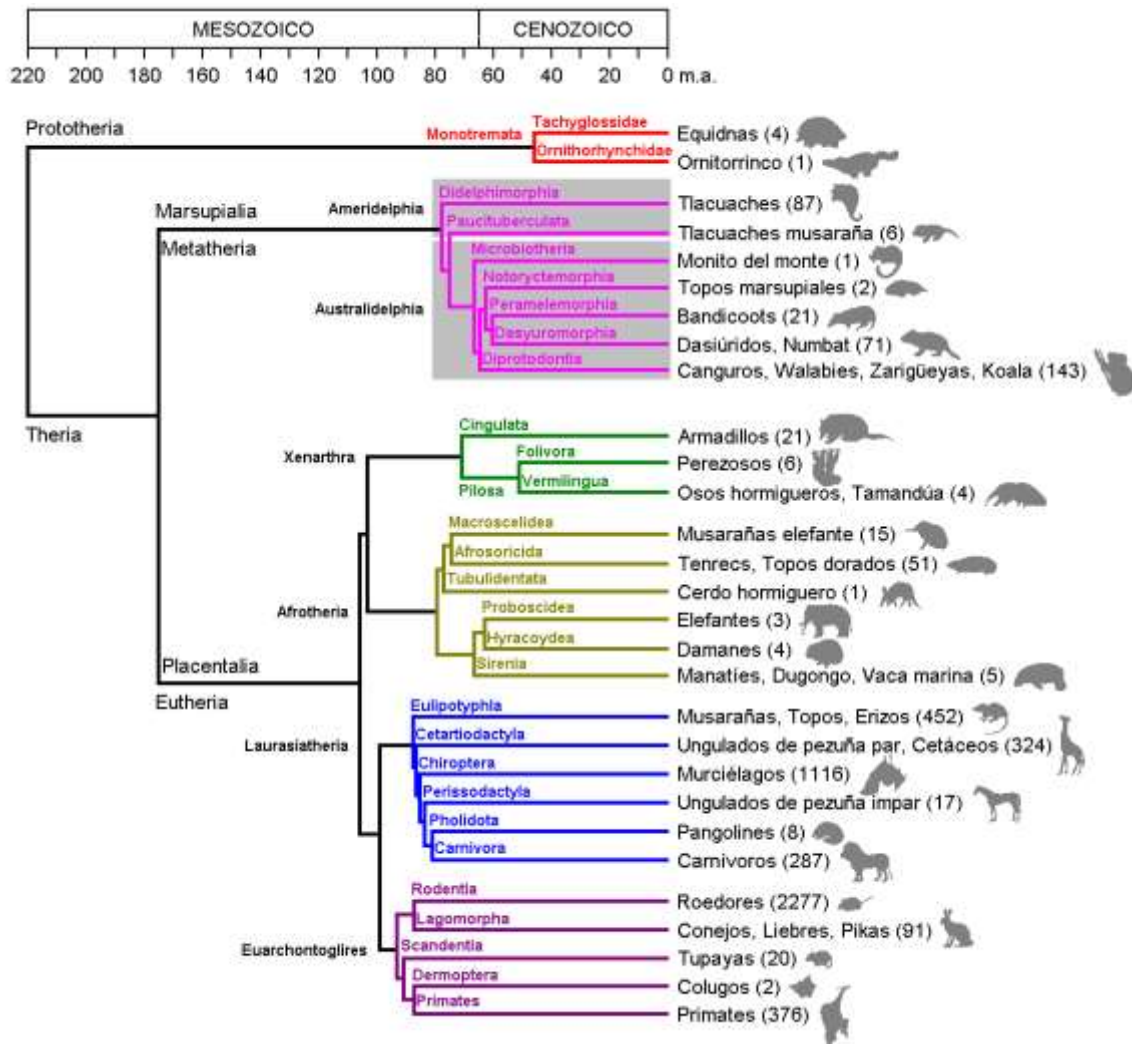
**Fig. 2.** La composición de especies en una comunidad biológica depende de diversos factores que varían en el espacio y en el tiempo. Modificado de Morin (2011).

Los mamíferos marinos forman parte de diversas comunidades biológicas en diferentes regiones del mundo, siendo especies con distintos orígenes filogenéticos (Hausler *et al.* 2009) como los cetáceos (ballenas, cachalotes, zífidos, delfines de río, delfines oceánicos, belugas, narvales y marsopas), sirenios (manatíes y dugongos), varias especies de carnívoros (lobos marinos, focas, morsas, nutrias, el oso polar y el zorro ártico), y un quiróptero (murciélago pescador del Golfo de California; Berta *et al.* 2015; Davis 2019; Fig. 3). Todos los mamíferos marinos tienen algún atributo por el cual se les puede llamar como tales. En la perspectiva del hábitat, los mamíferos marinos pasan gran parte o totalmente su ciclo de vida en el mar. Desde un punto de vista ecológico, los mamíferos marinos típicamente forman parte de las redes tróficas marinas en niveles tróficos superiores. Desde un punto de vista evolutivo, los mamíferos marinos tienen adaptaciones para vivir en el mar (Medrano González & Urbán Ramírez 2019).

Los mamíferos marinos son animales con altas capacidades de regulación fisiológica, aprendizaje y dispersión geográfica por migración y expansión de sus poblaciones. Es por ello, que su distribución es dinámica y por ende compleja. Esto significa que los mamíferos marinos ocupan el espacio con preferencias ambientales que no pueden describirse de manera determinista ni tampoco por leyes de grandes números. La comprensión de la ecología de los mamíferos marinos, esto es, de su diversidad, distribución y abundancia, constituye el primer paso para conocer su vulnerabilidad a las actividades humanas y a partir de ello, desarrollar políticas de conservación o manejo ambientalmente responsables. (Arellano-Peralta & Medrano González 2015).

## **2.1. El Golfo de California**

El Golfo de California es un mar marginal se ubica entre la Península de Baja California y la costa occidental de México (Van Andel & Shor 1964; Brinton *et al.* 1986). El golfo está delimitado por los estados de Baja California Sur y Baja California al oeste, y por los estados de Sonora, Sinaloa, Nayarit y Jalisco en su costa este. Hacia el norte, el límite es la desembocadura del Río Colorado y en el sur de Cabo San Lucas, Baja California Sur, al Cabo Corrientes, Jalisco.



**Fig. 3.** Filogenia de los mamíferos según el proyecto Genoma 10K (Haussler *et al.* 2009).

Las coordenadas de latitud y longitud que forman el polígono del golfo son: al norte en el delta del Río Colorado, 31°37', -114°38', en el límite peninsular en Cabo San Lucas 22°53', -109°55', en el límite sur continental en Cabo Corrientes 20°24', -105°42' (Fig. 4).

El Golfo de California tiene una forma alargada con orientación noroeste a sureste y una longitud de 1531 km; en la región de las Grandes Islas presenta su anchura mínima con longitud de 116 km mientras que entre Cabo San Lucas y la costa de Sinaloa está su anchura máxima con longitud de 394 km (Argote *et al.* 1995). Su volumen aproximado es de 123 000 km<sup>3</sup> considerando una superficie de 150 000 km<sup>2</sup> (De la Lanza 1991). Es una cuenca compleja con numerosos accidentes topográficos, desde los abanicos sedimentarios de pendientes muy suaves en el Alto Golfo, hasta escarpes con pendientes casi verticales en

Canal de Ballenas y Salsipuedes (De la Lanza 1991). Los rasgos topográficos y batimétricos del golfo son el resultado de varios procesos geomorfológicos desde hace 12 Ma. En el Golfo de California existen 898 áreas que comprenden islas, islotes, rocas e isletas y representan aproximadamente 50% del territorio insular mexicano. Sus islas más grandes son Tiburón, Ángel de la Guarda y Espíritu Santo (CONANP 2000). Todas las islas se formaron por procesos geológicos diferentes como hundimiento, levantamiento, erosión y vulcanismo (Rojas Bracho 1984; Bourillón *et al.* 1988; DeMets 1995; Calmus *et al.* 2017).

Las características hidrográficas del golfo varían latitudinalmente y de costa a costa. La región norte o Alto Golfo se extiende desde el delta del Río Colorado hasta la Isla Tiburón. Los fondos son someros (< 200 m de profundidad) con una ligera pendiente al suroeste que contiene una gran cantidad de sedimentos gruesos de origen continental que se extienden un poco al sur de la Región de las Grandes Islas. El golfo presenta alta evaporación y baja precipitación, las temperaturas promedio van de 10°C en invierno a 32°C en el verano; la salinidad superficial es típicamente cerca de 35.5 ppm y se caracteriza por una dinámica de giros ciclónicos en veranos y anticiclónicos en invierno. (De la Lanza 1991; Beier 1997; Lavín *et al.* 1997ab; Beier & Ripa 1999; Martínez-Díaz-de-León 2001; Carrillo *et al.* 2002; Palacios-Hernández *et al.* 2002).

La Región de las Grandes Islas se extiende desde el norte de la Isla Ángel de la Guarda 29°34'N, hasta la Isla San Pedro Mártir 28°23'N. La topografía de esta zona se caracteriza por cinco cuencas en forma de “V” desde los 900 m de profundidad en la Cuenca Delfín al norte hasta 1400 m en la Cuenca Salsipuedes. Estas cuencas funcionan como embudos que restringen la circulación entre el golfo norte y el golfo central y además generan una mezcla de masas de aguas superficiales y de profundidad por fuertes corrientes de marea. Esta es una zona de surgencias forzadas por abruptos cambios en la batimetría y corrientes de marea que ocurren durante todo el verano y cuyo movimiento ascendente lleva consigo alto contenido de nutrientes y bajas temperaturas favoreciendo la proliferación de fitoplancton (De la Lanza 1991; Argote *et al.* 1995; Beier 1997; Lluch-Cota *et al.* 2007; López *et al.* 2006, 2008; Mateos *et al.* 2006; Marinone 2007, 2008).

El Golfo Central va del sur de las Grandes Islas hasta la Bahía de Topolobampo y de la costa oriental hasta la Bahía de La Paz en la costa occidental. Las cuencas aquí presentes son profundas con una longitud máxima de 220 km y hasta 2000 m de profundidad en la



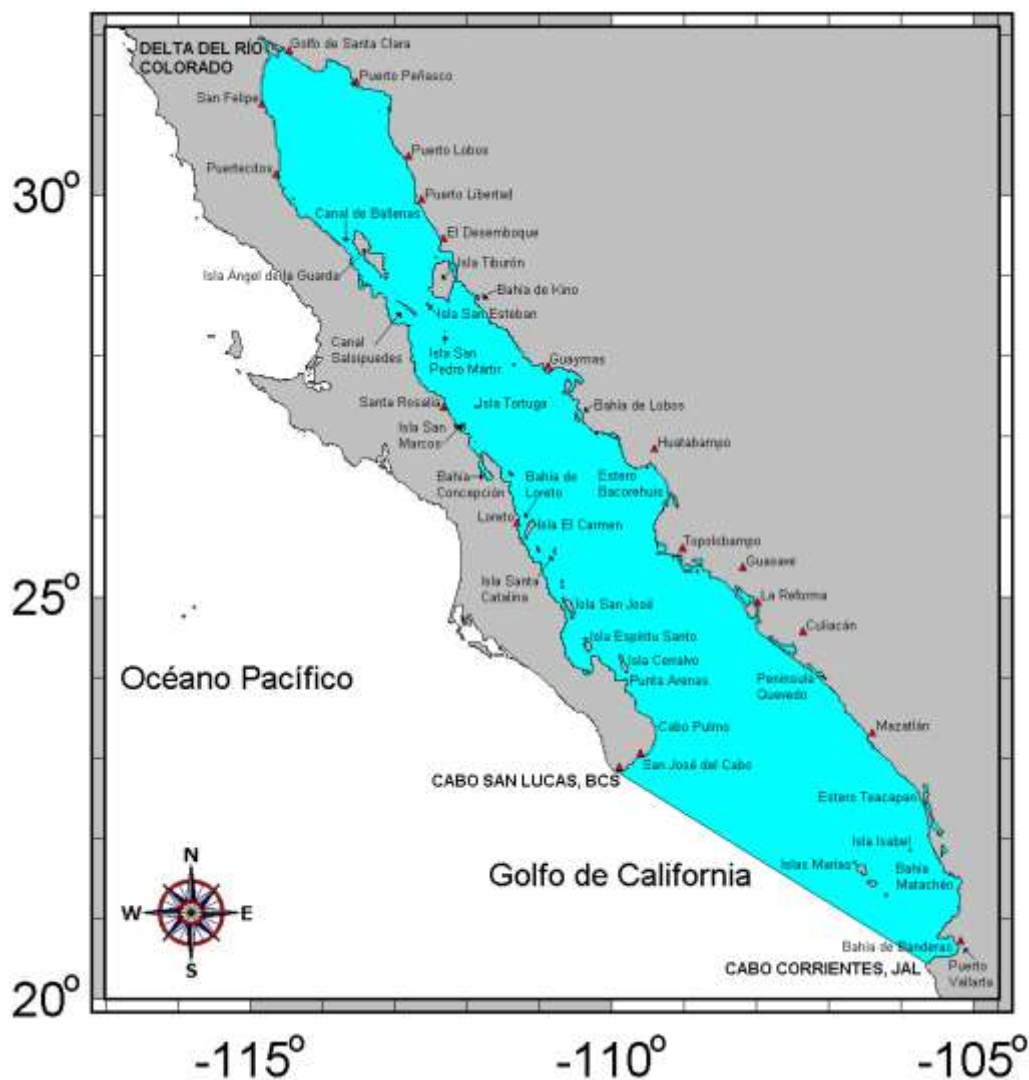
Cuenca de Guaymas. Esta zona presenta una fuerte estacionalidad en la temperatura superficial con valores de 16°C en invierno y de 31°C en verano. En la zona de Guaymas y Santa Rosalía hay una circulación geostrófica superficial que se revierte de manera estacional (Roden 1964; Robles & Marinone 1987; Bray 1988 Ripa & Marinone 1989; De la Lanza 1991; Ripa 1997; Álvarez-Molina *et al.* 2013).

La Región Sur o Boca del Golfo tiene una dinámica de interacción con masas de agua del Océano Pacífico Oriental Tropical a través de una boca de casi 400 km de ancho con cuencas que exceden los 2000 m de profundidad. Hidrográficamente la zona es compleja por la confluencia de distintas masas de agua: una corriente fría proveniente del norte de la Corriente de California, las masas de agua del propio golfo, y una corriente superficial proveniente del Pacífico Tropical (Roden & Groves 1959; Roden 1964, 1972; Wyrski 1965; Álvarez-Borrego & Schwartzlose 1979; Bray & Robles 1991; Portela *et al.* 2016).

El Golfo de California está rodeado por una zona predominantemente árida (Salinas Zavala *et al.* 1998) donde se encuentra bajo la influencia de la faja subtropical de alta presión localizada en las proximidades del paralelo 30°; posee un régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno. La precipitación anual es escasa (<400 mm) y los meses más secos son abril y mayo. A lo largo de la Península de Baja California existen cordilleras mayores a 3000 m de altitud que aíslan al Golfo de California del Océano Pacífico de la humedad proveniente del Pacífico la cual es retenida por las laderas occidentales provocando un clima más continental que oceánico.

La temperatura media anual de las costas que rodean el golfo va de 24 a 26°C en Mazatlán, Culiacán habiendo dos estaciones: secas y lluvias. En verano se presentan tormentas tropicales, mientras que en invierno y primavera predominan los vientos del noroeste que provocan heladas o hasta precipitaciones con nieve. En el resto del verano predominan los vientos alisios que vienen del sureste y son cálidos-húmedos trayendo consigo tormentas tropicales de verano que afectan a las costas de Sonora, Sinaloa y la parte sur de la Península de Baja California. El Golfo de California presenta tasas de producción primaria muy altas debido a la combinación de su topografía y latitud que genera surgencias. Estas surgencias se forman por al menos tres procesos a lo largo del Golfo: 1) forzamiento por vientos predominantes del noroeste en la temporada fría en la costa oeste y vientos del sureste con surgencias de la temporada cálida en la costa peninsular, 2) Giros ciclónicos y

anticiclónicos de las masas de agua (Beier 1997; Lavín *et al.* 1997a,b; Beier & Ripa 1999; Martínez-Díaz-de-León 2001; Carrillo *et al.* 2002; Palacios-Hernández *et al.* 2002) y 3) por el ciclo mareal en la Región de las Grandes Islas durante el otoño en el cual la fuerza del viento rompe la termoclina permitiendo que los nutrientes asciendan (Álvarez-Borrego *et al.* 1978; Gaxiola-Castro *et al.* 1978; Hernández-Ayón *et al.* 2007a, b; Lavín *et al.* 1995; Torres-Valdés 2000). En las estaciones de invierno y primavera la productividad alcanza sus valores máximos específicamente en el Canal de Ballenas y la Región de las Grandes Islas. En general, los valores de productividad primaria decrecen de la costa hacia le región pelágica.



**Fig. 4.** Mapa del Golfo de California con la delimitación de la línea de Cabo San Lucas, B.C.S. a Cabo Corrientes, Jalisco. Tomado de Arellano Peralta (2010).

## 2.2. Mamíferos marinos del Golfo de California

El Golfo de California alberga de 32 a 34 especies de mamíferos marinos (Auriolles Gamboa 1993; Urbán 1997; Arellano-Peralta & Medrano González 2015), los cuales han sido ampliamente estudiados, aunque típicamente con el enfoque de grupos taxonómicos reducidos o en escala geográfica pequeña; son pocos los trabajos que se han enfocado en la comunidad mastofaunística marina completa en todo el golfo.

El trabajo pionero sobre la comunidad de mamíferos marinos en el Golfo de California fue publicado por Mangels & Gerrodette (1994) en el reporte NOAA- TM- NMFS- SWFSC. Esta investigación se realizó del 28 de julio al 6 de noviembre de 1993 a bordo del R/V McArthur y R/V David Starr Jordan. La investigación tuvo el objetivo principal de inspeccionar el hábitat norteño del delfín común (*Delphinus delphis*) y estimar su abundancia absoluta y los objetivos específicos de 1) recopilar datos para estimar la densidad, el tamaño y la composición de especies de las agregaciones de delfines y ballenas para estimaciones del tamaño de sus poblaciones, y 2) recopilar datos oceanográficos y biológicos sobre el hábitat de los mamíferos marinos para comprender los patrones de distribución de los cetáceos. No obstante, este trabajo incluye el registro de especies de pinnípedos. Las navegaciones se llevaron a cabo en el Pacífico Oeste y en el Golfo de California durante cuatro campañas que cubrieron más de 2 000 000 km<sup>2</sup>. Particularmente en el Golfo de California y a bordo de los dos barcos, se cubrieron 4388 km con un total de 508 registros de mamíferos marinos de los cuales se identificaron 22 especies siendo el delfín común y la tonina (*Tursiops truncatus*) las especies con más registros seguidos del delfín de Risso (*Grampus griseus*).

Moreno-Zúñiga (2008) comparó la composición de especies de cetáceos y la variación en la distribución y ocurrencia relativa de las especies más comunes en el Golfo de California a bordo del B/O El Puma durante dos campañas oceanográficas (nov-dic 2005 y ene 2007) midiendo *in situ* variables oceanográficas como temperatura superficial del mar (TSM), concentración de Clorofila a (Chl-*a*), concentración de oxígeno disuelto, biovolumen zooplanctónico, ocurrencia de eufáusidos y profundidad. Los cetáceos más comunes durante la temporada fría del verano fueron la ballena azul (*Balaenoptera musculus*), la ballena de aleta (*Balaenoptera physalus*), el delfín común y el cachalote (*Physeter macrocephalus*). Moreno-Zúñiga (2008) concluyó que 1) existe una segregación espacial en la distribución y

ocurrencia relativa de las especies comunes de cetáceos, 2) la variación de la estructura en noviembre está asociada primariamente a factores abióticos, mientras que en enero la variación es probablemente más consecuencia de factores bióticos, 3) la comunidad de cetáceos no presenta diferencias significativas entre los meses ni entre las regiones muestreadas, 4) existe una intersección de los hábitats de las especies y por último, 5) espera que existan mayores diferencias faunísticas si se compara la estructura de la comunidad de invierno (noviembre y enero) con la de verano por la presencia de especies migratorias invernales.

Paniagua-Mendoza (2009) realizó una campaña oceanográfica a bordo del B/O El Puma (jul-ago 2007) y caracterizó el hábitat de los cetáceos comunes del Golfo de California con base en un censo de algunos cetáceos y registro de variables ambientales tales como: TSM, concentración superficial de Chl-*a*, concentración de oxígeno disuelto, biovolumen de zooplancton y ocurrencia de eufáusidos. Esta autora registró a *B. physalus*, *D. delphis*, *P. macrocephalus*, *T. truncatus* y al calderón (*Globicephala macrorhynchus*) como las especies más comunes de cetáceos durante la temporada cálida, y observó que su distribución está altamente influenciada por factores biológicos asociados a la disponibilidad de alimento. Ella concluyó que existe una intersección entre las distribuciones, pero sin una competencia interespecífica evidente, y mencionó que existe variación estacional en diferentes regiones.

Salvadeo *et al.* (2009) describieron la comunidad de odontocetos en la Bahía de La Paz localizada en el suroeste del Golfo de California, su relación con las variables ambientales y la disponibilidad de alimento. En 21 navegaciones entre septiembre de 2003 y marzo de 2006, estos autores registraron 353 avistamientos de 10 especies nominales de odontocetos. Las variables ambientales/oceanográficas fueron analizadas a partir de datos generados por sistemas de percepción remota satelital. Estos autores clasificaron a la comunidad de odontocetos en cuatro categorías por su frecuencia en la zona: especies numéricamente dominantes *D. delphis* y *T. truncatus*; especies comunes *G. macrorhynchus*). Los cachalotes enano y pigmeo (*Kogia sima* y *Kogia breviceps*), *P. macrocephalus* y la orca (*Orcinus orca*) fueron especies observadas escasamente, y la orca falsa (*Pseudorca crassidens*) y el delfín de costados blancos (*Lagenorhynchus obliquidens*) fueron especies raramente observadas. Estos autores también observaron una diferencia entre los picos de productividad y una mayor presencia de odontocetos. Asimismo, determinaron que la

comunidad analizada es dinámica en función de la estacionalidad, misma que condiciona la presencia de presas potenciales, la ocurrencia de las especies dominantes y comunes, así como la ausencia o presencia de las especies escasas y raras que son las que confieren mayor variabilidad a la comunidad. En la estación templada y de mayor productividad (Dic-Jun) se registró un aumento de la presencia y ocurrencia de especies ictiófagas como *D. delphis*, mientras que en la estación cálida (Jul-Nov) y de menor productividad, se observó mayor diversidad de odontocetos y aumento de la presencia y ocurrencia de *T. truncatus* y *G. macrorhynchus*.

Gómez-Gallardo (2013) determinó las zonas prioritarias de distribución de grandes cetáceos en el Golfo de California a partir de los cambios en la estructura de comunidades y su relación con algunos parámetros ambientales. Este autor regionalizó el Golfo de California en cuatro zonas: Zona 1 Alto Golfo, Zona 2 Grandes Islas, Zona 3 Golfo Medio y Zona 4 Boca del Golfo. Sus análisis derivados de censos aéreos y a bordo de barcos resultaron en que los misticetos se concentraron en el Suroeste y en el Alto Golfo mientras que su ocurrencia en la zona de las grandes islas es escasa y relativamente homogénea a lo largo del golfo prevaleciendo en el canal de ballenas y cerca de las islas. Por otro lado, los odontocetos usualmente se distribuyeron ampliamente, pero son escasos en el Alto Golfo y su ocurrencia es más notoria en la zona de las grandes islas. A partir de la TSM, este autor separó el golfo en las estaciones fría y cálida siendo la zona 4 la de mayor riqueza y la 1 la de riqueza menor en ambas. Según Gómez-Gallardo (2013) la batimetría es una de las variables con mayor influencia para predecir el hábitat de las grandes ballenas. Gómez-Gallardo (2013) concluyó que la zona sur del golfo es una zona de transición que varía constantemente por lo que las especies transitan de manera migratoria anual o bien para entrada y salida del golfo mientras que la zona norte se caracteriza por una composición de especies más homogénea y estable. Los datos de presencia-ausencia fueron en los análisis de este autor más poderosos que los de sólo presencia proporcionando una mejor capacidad predictiva y el mejor entendimiento de la distribución de las especies en relación con variables eco-geográficas.

Arellano-Peralta & Medrano-González (2015) analizaron la vulnerabilidad de las especies de mamíferos marinos y sus hábitats en el Golfo de California ante el impacto de las actividades humanas. Este es un trabajo macroecológico con un contexto histórico humano que atiende los atributos de la mastofauna marina tales como riqueza, distribución,

ocurrencia, consumo de energía y crianza. Este trabajo encontró que la mayor diversidad de mamíferos marinos se encuentra en el extremo peninsular y la Región de las Grandes Islas (Lat. 23° – 29°), y que la riqueza disminuye hacia los extremos: Alto Golfo y Boca del Golfo. Estos autores observaron zonas aisladas de mayor riqueza: oriente de las Islas Marías y la zona entre San Felipe, Baja California y Puerto Peñasco, Sonora. Los autores sugieren que en la mastofauna marina del Golfo de California no están diferenciados los conjuntos de especies en zonas separadas, sino que más bien, las distribuciones geográficas de las especies son subconjuntos particulares de toda la zona, ocupando algunas especies casi toda la extensión del golfo. Por lo tanto, la composición es heterogénea espacialmente y no puede considerarse trivialmente como un solo conjunto. Estos autores reportaron a *T. truncatus* como la especie más abundante y con mayor cobertura espacial (50%), al delfín común de rostro corto *D. d. delphis*, al delfín moteado pantropical (*Stenella attenuata*), a *B. physalus* y al lobo marino de California (*Zalophus californianus*) como especies de amplia cobertura y ocurrencia; a *P. macrocephalus* y *B. musculus* con cobertura media, y por último a la vaquita (*Phocoena sinus*) y al zifio pigmeo (*Mesoplodon peruvianus*) con cobertura espacial restringida. Arellano-Peralta & Medrano-González (2015) consideraron que la ocurrencia de las especies se puede deber a diferentes necesidades de hábitats que cubren transitando a diferentes regiones del golfo con patrones espaciales y temporales propios.

García-Morales (2017) analizó la influencia de la variabilidad ambiental en la distribución de los misticetos en el Golfo de California por medio de censos en avioneta durante las estaciones fría y cálida de 2005 y 2006. Este autor cubrió una trayectoria de 16 935 km en 179 horas (h) registrando siete especies de misticetos, y comparó las estaciones del verano con base en la concentración superficial de Chl-a y TSM obtenidas por sistemas de percepción remota satelital. Este estudio concluyó que la estación fría de 2006 presentó temperaturas más bajas y mayor concentración superficial de Chl-a así como más zonas de surgencias hacia las costas en comparación con 2005. La estación cálida presentó una leve diferencia en la concentración superficial de Chl-a. Altos valores de concentración superficial de Chl-a en ambos veranos se encontraron en el Canal de Ballenas, valores bajos se presentaron en la zona norte y los valores menores ocurrieron en el centro y sur del golfo. Durante 2006 se presentó la TSM más alta y una mayor heterogeneidad hacia la zona central y sur del golfo. *B. musculus* fue la especie con mayor número de avistamientos (48.5%),

seguida de *B. physalus* con 27.3%, la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) 5.4%, la ballena de Bryde (*Balaenoptera edeni*) 4.9%, la ballena gris (*Eschrichtius robustus*) 1.7%, y la ballena de Sei (*Balaenoptera borealis*) con 0.2%. De acuerdo con este estudio, los mysticetos se distribuyeron por todo el golfo en la estación fría del 2006 disminuyendo en número de la zona norte a la zona sur y no presentaron agregación. En la estación cálida del 2005, los mysticetos se distribuyeron hacia el norte haciendo agregaciones hacia la costa continental. García-Morales (2017) concluyó que existe una marcada diferencia entre la estación fría y cálida, que la concentración superficial de Chl-a en la estación fría influye directamente en la distribución de las ballenas y que las agrupaciones que llegan a formar están relacionadas con la TSM.

### **3. Hipótesis y objetivos**

#### **3.1. Hipótesis**

Los mamíferos marinos tienen grandes capacidades de regulación fisiológica y dispersión que les permiten buscar condiciones adecuadas para su alimentación y reproducción en grandes áreas ante distintas condiciones oceanográficas. Se espera entonces encontrar menor abundancia y diversidad de mamíferos marinos en condiciones de baja productividad marina la cual estaría asociada a mayor temperatura superficial del mar y menor ocurrencia de surgencias en el Golfo de California, especialmente durante el evento El Niño de 2016.

#### **3.2. Objetivo general**

Determinar cómo varía la diversidad y la ocurrencia de la mastofauna marina en el Golfo de California en función de la variación ambiental durante la temporada cálida durante el periodo 2012–2018, bajo la influencia del intenso evento El Niño de 2015–2016.

#### **3.3. Objetivos particulares**

- 1) Determinar la variación de los atributos mastofaunísticos de composición de especies, diversidad y su ocurrencia en función de la variación de la TSM y la concentración superficial de Chl-a.

- 2) Identificar las condiciones bióticas y abióticas que determinan el uso del espacio para los mamíferos marinos en el Golfo de California durante la temporada cálida del verano (verano 2012, 2013, 2016, 2017 y 2018).
- 3) Identificar algunas consecuencias de las variaciones mastofaunísticas en tiempo y espacio para la conservación de los ecosistemas del Golfo de California.

## **4. Método y materiales**

### **4.1. Trabajo de mar**

Los registros de mamíferos marinos y variables ambientales de la presente tesis se obtuvieron en cinco campañas oceanográficas durante la temporada cálida de los veranos 2012 (agosto, CAPEGOLCA VII), 2013 (junio, CAPEGOLCA VIII), 2016 (junio, CAPEGOLCA XI), 2017 (junio, CAPEGOLCA XII) y 2018 (junio, CAPEGOLCA XIII) en el Golfo de California a bordo del B/O El Puma a través de la colaboración del Grupo de Mastozoología Marina de la Facultad de Ciencias UNAM (GMM-FC-UNAM) con el Laboratorio de Ecología de Pesquerías del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología UNAM (LEP-ICMyL-UNAM).

Los derroteros de las cinco campañas fueron diseñados por el LEP-ICMyL-UNAM con los objetivos del monitoreo de las condiciones oceanográficas y la ocurrencia del calamar gigante (*Dosidicus gigas*) en el Golfo de California. El GMM-FC-UNAM se encargó del registro de los mamíferos marinos a lo largo del trayecto diurno de los cinco cruceros, especialmente de las especies teutofágicas, la navegación asociada a este esfuerzo de observación, y las condiciones ambientales en la superficie.

Diariamente, el esfuerzo de observación inició a las 07:00 h o antes si había luz adecuada, y finalizó a las 20:00 h o después dependiendo de la hora de la puesta de sol. Con base en el tiempo atmosférico, se ocuparon diferentes puntos de observación: desde la proa al inicio y al final de cada día, desde la cofa la mayor parte del día y mientras el viento se mantuviera debajo de cuatro en la escala de Beaufort, y desde el puente de mando si había lluvia o viento que causara grandes salpicaduras en la cubierta. La observación se detenía sólo con niebla espesa o condiciones de Beaufort mayores a cinco. Las observaciones se hicieron casi siempre con dos o tres observadores que ocuparon distintos puestos de observación. Para cada movimiento de los observadores entre las posiciones o la suspensión



del esfuerzo, se hacia la nota respectiva para estimar correctamente el esfuerzo efectivo de observación. En las campañas de los veranos 2012 y 2016 la observación a bordo estuvo a cargo de tres personas, para 2017 y 2018 hubo dos observadores, y para la campaña de 2013 hubo sólo un observador (Tabla 1).

La historia de la navegación se registró con datos de fecha, hora y coordenada de cada evento los cuales fueron: un punto al menos cada 30 minutos, inicio y fin de una estación de la campaña, cambio de rumbo, un avistamiento o un evento oceanográfico. Cada nota se acompañó de las condiciones ambientales que se percibieron visualmente tales como: nubosidad (%), visibilidad (mn) y estado del mar en la escala de Beaufort. Cada observador mantuvo su vista hacia un punto cardinal para la detección de los animales y/o eventos asociados. Cuando se avistaba algún mamífero marino o había algún otro evento de interés, los observadores tomaban roles específicos: un anotador, un camarógrafo y un observador con binoculares. Cuando se detecta a un mamífero marino o grupo de ellos, la identificación al momento depende de la distancia del buque al animal y la experiencia del observador por lo que el registro fotográfico y la observación con binoculares fue fundamental para la corroboración de la identificación taxonómica.

Un avistamiento de mamíferos marinos se define como cualquier indicio inequívoco de la presencia de cualquier mamífero marino; esto puede ser la salpicadura por salto, un soplo, cualquier parte del cuerpo o incluso un espejo de agua o huella. En la medida de lo posible, se registró la especie o especies que formaban el avistamiento, el tamaño aproximado de los grupos y la composición aproximada de clases de sexo y edad con particular atención a la presencia de crías. Se hicieron anotaciones generales de la conducta y asociaciones con otras especies tales como aves, peces y tortugas marinas haciendo énfasis en asociaciones masivas como son los comederos de cardumenes de peces depredados por varias especies.

**Tabla 1.** Esfuerzo de observación por año/campaña y su desviación estándar (DE) interanual a bordo del B/O El Puma en el Golfo de California.

	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
Intervalo de fecha Juliana	227–247	163–179	168–186	158–176	167–180
DE fecha	5	5	6	5	4
Hora promedio	14:15	14:34	13:07	13:01	13:01
Número de registros	696	505	830	601	407
Horas de observación	224	184	228	238	153
Registros / hora de observación	3.10	2.74	3.64	2.53	2.65
Número de observadores	3	1	3	2	2
Profundidad promedio (m)	508	410	699	430	611
DE profundidad promedio (m)	524	348	492	364	441

## 4.2. Distribución del esfuerzo

La distribución del esfuerzo en este estudio dependió del diseño de cada derrotero realizado por el LEP-ICMyL-UNAM existiendo mayor tiempo de muestreo en la región entre la cuenca de Guaymas en Sonora, Santa Rosalía en Baja California y la Región de las Grandes Islas (Fig. 5). Para describir la distribución del esfuerzo se utilizaron datos batimétricos del Golfo de California de Smith & Sandwell (1997). Durante la campaña de 2012 se navegó irregularmente dentro del golfo e incluso en el lado Pacífico de la península llegando hasta la Bahía Magdalena. En las campañas de 2013 y 2017 se navegó solamente dentro del golfo con una cobertura más amplia; en los veranos 2016 y 2018 se navegaron zonas de mayor profundidad siendo 2016 el verano con el promedio más alto, 699 m (Fig. 6; Tabla 1).

El esfuerzo total de observación de mamíferos marinos sumó 88 días (d) de navegación, 1033 h de observación y 10 285 mn (5494 km) recorridas con esfuerzo de observación que generó 797 registros de mamíferos marinos de los cuales 660 fueron identificados hasta el nivel de especie (Fig. 7). Casi todas las especies registradas tienen un registro fotográfico el cual está depositado en el acervo que resguarda el GMM-FC-UNAM.

## 4.3. Procesamiento de datos

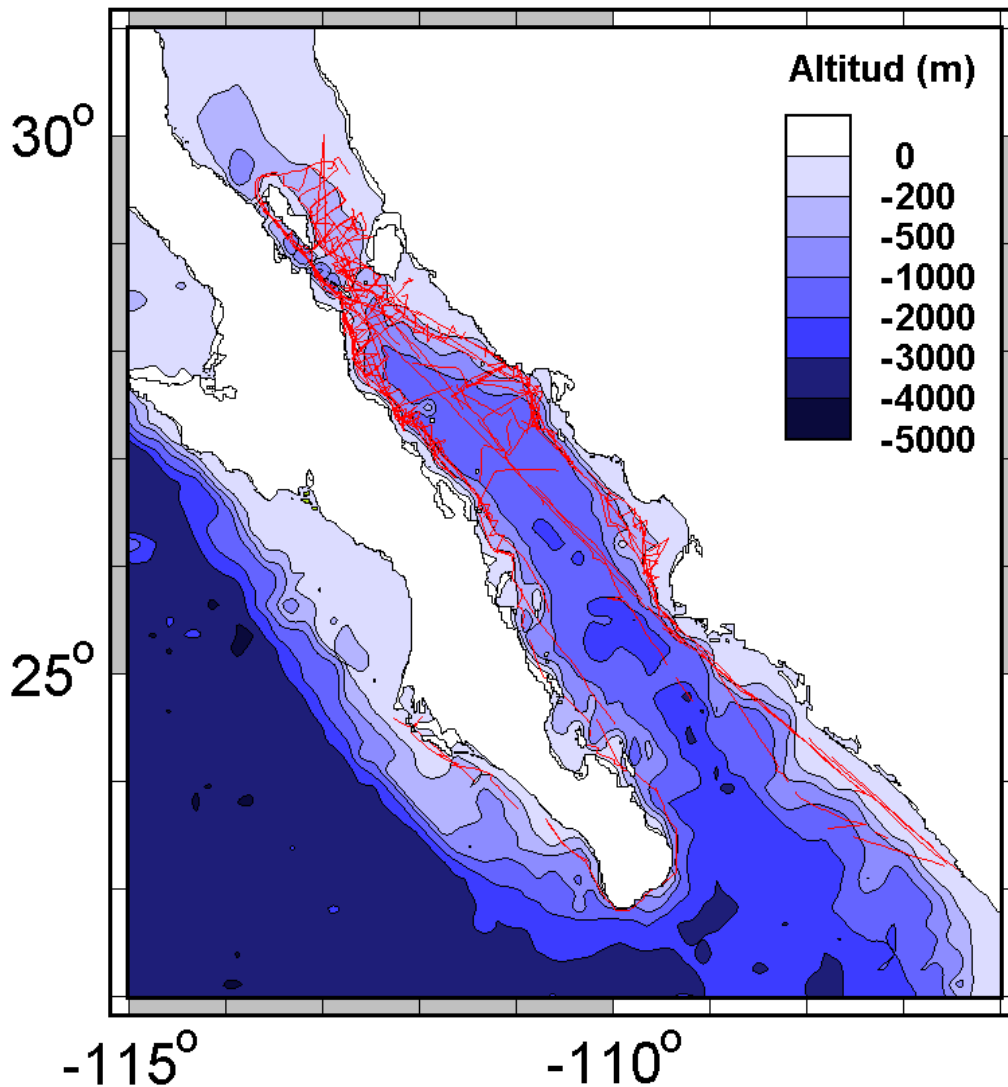
### 4.3.1. General

Los datos se organizaron y capturaron en el sitio de trabajo y están resguardados en diarios de campo, formas impresas y bases de datos lo cual permite respaldar y corregir la información. Con los datos documentados y ordenados de cada crucero oceanográfico, por

cada día con esfuerzo de observación se contó el número de horas de navegación-embarcación. Igualmente, para cada especie, se contó el número de avistamientos y número aproximado de individuos. La fecha se registró como el día juliano (días transcurridos a partir del 1 de enero).

#### *4.3.2. Variables ambientales/oceanográficas: Temperatura superficial del mar y concentración superficial de clorofila a*

En el presente estudio se utilizó la TSM que es una característica física que depende de la circulación de las masas de agua y la región geográfica, y la concentración superficial de Chl-*a* que es una característica biológica que depende en relación general inversa de la TSM y del movimiento de la columna de agua el cual a su vez depende del régimen de vientos regionales y concentración de nutrientes e irradiancia. Ambas variables ambientales se han sido ampliamente reconocidas como determinantes para comprender la distribución y movimientos de la mastofauna marina (Garrison 2013).

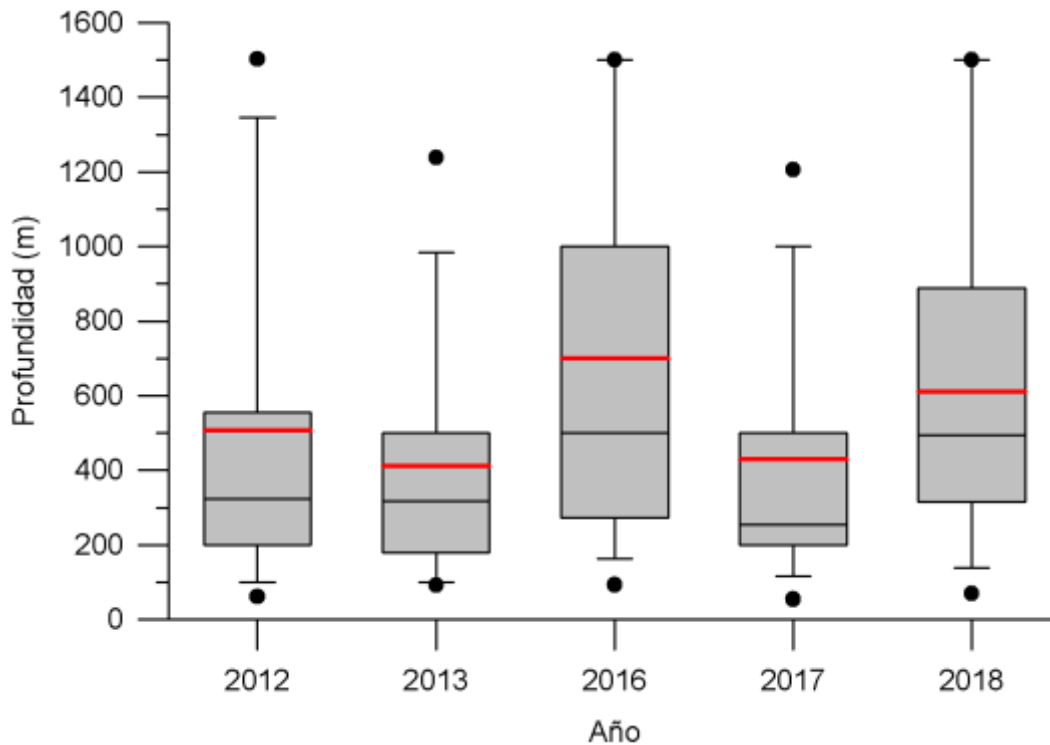


**Fig. 5.** Transectos de observación de mamíferos marinos de las campañas oceanográficas CAPEGOLCA agosto 2012, y junio 2013, 2016, 2017 y 2018.

Se obtuvieron los datos satelitales en escala semanal y con resolución de 4 km de la TSM y concentración superficial de Chl-*a* desde la página web Ocean Color View/NASA-Modis Aqua; el formato de los archivos que genera esta página es visible sólo con el programa SeaDas el cual permite proyectar los datos en un mapa y filtrar la zona que se quiere analizar. Posteriormente las imágenes satelitales se pueden transformar a valores georreferenciados, generando un archivo de texto.

De manera similar, se obtuvieron los datos de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en Inglés de Pacific Decadal Oscillation) desde la página web de la

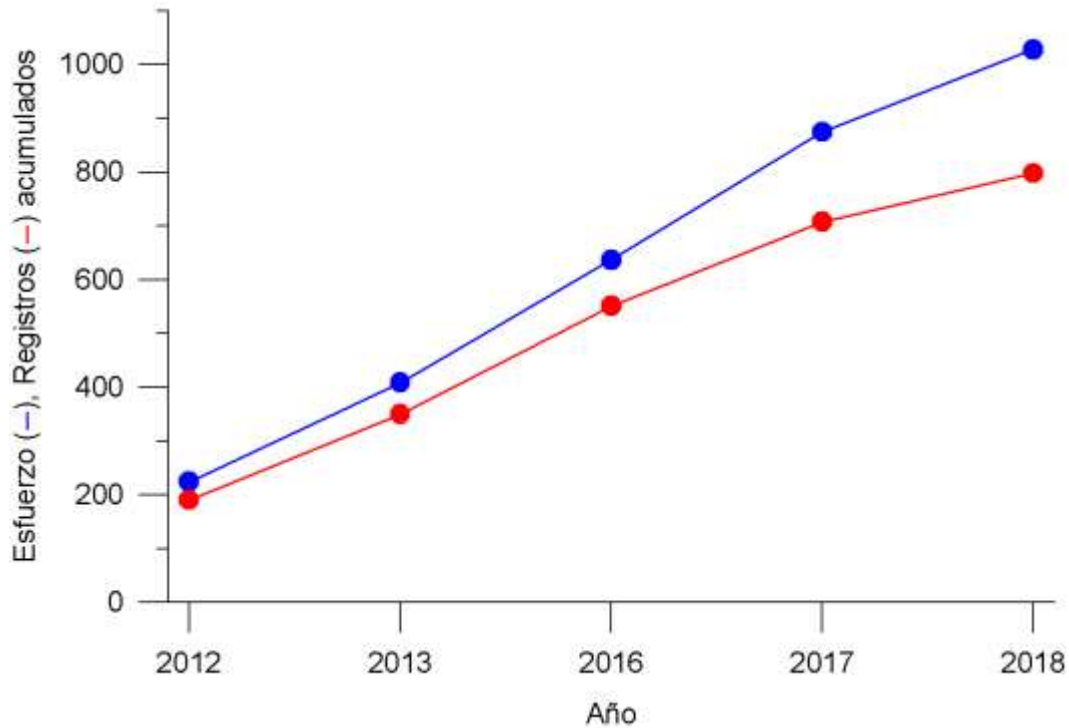
NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration). El PDO es una oscilación climática de mesoescala que varía con periodos más largos que el fenómeno de El Niño y se origina en el Pacífico Norte afectando a las aguas del Pacífico Mexicano y al parecer al Golfo de California (Zhang *et al.* 1997; Mantua & Hare 2002; Kuball 2007). Este índice es indicador de variación ambiental regional a escala decadal.



**Fig. 6.** Variación de la profundidad del fondo marino a lo largo del trayecto del B/O El Puma en las cinco campañas oceanográficas.

#### 4.3.3. Ocurrencia

La ocurrencia de las especies se definió como el número de registros (avistamientos) de cada especie por unidad de tiempo de observación. Se definió la composición de especies como el conjunto del número de avistamientos de cada especie con respecto al total de todas las especies en un periodo definido por la duración de cada crucero.



**Fig. 7.** Acumulación del esfuerzo de observación (h) y registro de mamíferos marinos obtenidos en cinco campañas oceanográficas durante la estación de verano en el Golfo de California a bordo del B/O El Puma.

#### 4.3.4. Diversidad

Para distintas etapas en el registro de las especies, estimamos su riqueza a partir de curvas de acumulación utilizando el modelo de cinética de orden n de Hill el cual se describe con la siguiente ecuación:

$$R_N = R_{max} \frac{N^n}{k + N^n}$$

donde  $R_N$  es la riqueza acumulada en el registro  $N$ ,  $R_{max}$  es la riqueza máxima a estimar,  $k$  es una constante relacionada con la rapidez en la acumulación de especies en función del número de muestras y  $n$  es el orden de reacción el cual indica si hay o no efectos de cooperación que en este caso se interpretan como la facilitación ( $n > 1$ ) o inhibición ( $n < 1$ ) de la ocurrencia de algunas especies a partir de la ocurrencia de otras. Para considerar la distinta abundancia relativa de las especies, se estimó el número efectivo de especies ( $ne$ ) el cual es

el equivalente a un conjunto con todas las especies teniendo la misma frecuencia. El número efectivo de especies se calculó como sigue:

$$ne = \frac{1}{\sum_{i=1}^R f_i^2}$$

donde  $f_i$  es la frecuencia de cada especie y para lo cual se cumple que  $\sum_{i=1}^R f_i = 1$ , y  $R$  es la riqueza observada de especies. Para diferentes composiciones de especies ocurrencias determinamos asimismo la diversidad informática o de Shannon (S) como sigue:

$$S_f = - \sum_{i=1}^R f_i \log_2(f_i)$$

El uso del logaritmo con base 2 provee el resultado en bits/especie. La diversidad máxima posible es  $S_{max} = \log_2(R)$  y por lo tanto la igualdad en la composición de especies es  $I = S/S_{max}$ . Ante la variación faunística observada anualmente, se examinó la relación de la riqueza,  $R$ , de las especies respecto a la concentración superficial de Chl-*a* y la oscilación decadal del Pacífico (PDO) haciendo una regresión *ad hoc* al siguiente polinomio de segundo orden:

$$R_x = y_0 + y_1x + y_2x^2$$

donde  $x$  es el valor de concentración superficial de Chl-*a* o PDO. La TSM se ajustó también *ad hoc* a la siguiente ecuación de saturación exponencial:

$$R_{TSM} = a(1 - \exp(-b(TSM - c)))$$

#### 4.3.5. Heterogeneidades en las curvas de acumulación de especies

Las curvas de acumulación de especies de diferentes veranos mostraron de uno a tres saltos de acumulación para un total de 10 conjuntos o etapas de acumulación en los cinco

veranos (cruceos): 2012a, 2012b, 2012c, 2013, 2016a, 2016b, 2016c, 2017, 2018a y 2018b. Se identificaron asociaciones entre las especies entre estos 10 conjuntos de acumulación mediante un análisis métrico de escalamiento multidimensional a partir de una medida de intersección de la presencia de las especies. Dada la matriz de presencia (1) y ausencia (0) de las especies en los 10 conjuntos de acumulación, se definió la disimilitud en la ocurrencia de las especies  $i$  e  $j$  ( $D_{ij}$ ) como la fracción de conjuntos de acumulación que contiene sólo a una especie de entre el total que contiene a ambas especies, esto es:

$$D_{ij} = 1 - \frac{C_i \cap C_j}{C_i \cup C_j}$$

donde  $C_i$  y  $C_j$  son los conjuntos de acumulación que contienen a la especie  $i$  y a la especie  $j$  respectivamente, el signo  $\cup$  es la unión de ambos conjuntos, el total entre ambos conjuntos, y el signo  $\cap$  es su intersección, las especies compartidas. Nótese que esta distancia considera solamente aquellos conjuntos en que ocurre una o la otra especie o ambas, y no a los conjuntos en donde ambas especies están ausentes, es decir, la ausencia de ambas especies no significa similitud pero la presencia de ambas sí. Igualmente, la disimilitud entre dos conjuntos de acumulación  $x$  e  $y$  ( $D_{xy}$ ) se define como la fracción de especies no compartidas entre el total de especies registradas en ambos conjuntos, esto es:

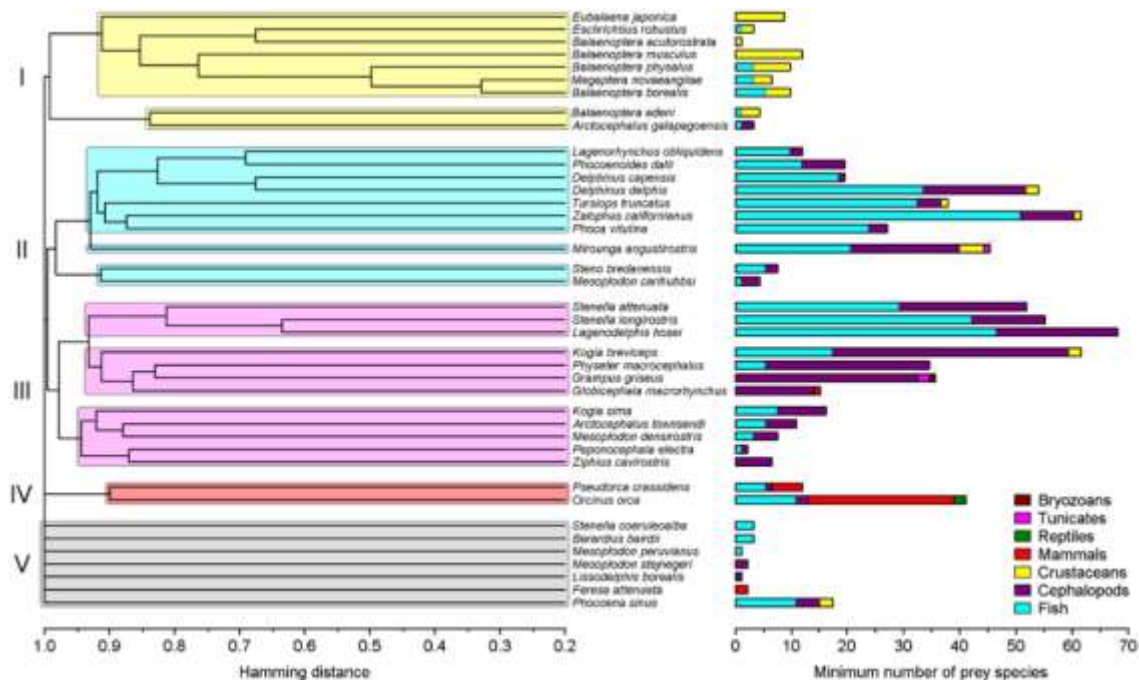
$$D_{xy} = 1 - \frac{S_x \cap S_y}{S_x \cup S_y}$$

donde  $S_x$  y  $S_y$  son las especies contenidas en los conjuntos de acumulación  $x$  e  $y$  respectivamente. Las matrices de distancias entre las 24 especies y entre los 10 conjuntos de acumulación se calcularon con el programa Disintersec desarrollado *ad hoc* por Luis Medrano González en la plataforma Lazarus, y luego se visualizaron en un espacio bidimensional mediante un escalamiento multidimensional lineal, así como en un dendrograma hecho por análisis de cúmulos con promedios ponderados (WPGMA), ambos con el uso de Statistica 13.3.



#### 4.3.6. Variación por gremios tróficos

Utilizamos la clasificación de los mamíferos marinos en gremios tróficos de Benavidez-Gómez (2016) basada en la revisión de las presas de las que se alimenta cada especie de mamífero marino en el Pacífico Mexicano. Esta autora agrupó a los mamíferos marinos en cinco gremios tróficos: I) Primariamente planctófagos; la alimentación de estas especies es en su mayoría de zooplancton y en cierto grado de peces de cardumen, II) Primariamente ictiófagos; estas especies se alimentan principalmente de peces y de cefalópodos en menor medida, III) Teutófagos; su alimentación se basa fundamentalmente en cefalópodos y en menor medida de peces, principalmente demersales, IV) Sarcófagos; son los mamíferos marinos que se alimentan de otros mamíferos marinos, así como de aves y reptiles marinos, y V) *Sui generis*; este gremio lleva ese nombre porque la información sobre alimentación de las especies que lo componen aún está incompleta aunque es claro que la vaquita sí forma un grupo aparte (Fig. 8). La variación en riqueza, diversidad informática y ocurrencia de los mamíferos marinos se analizó anualmente por gremios y se hizo también un examen inicial de la distribución geográfica de los gremios.

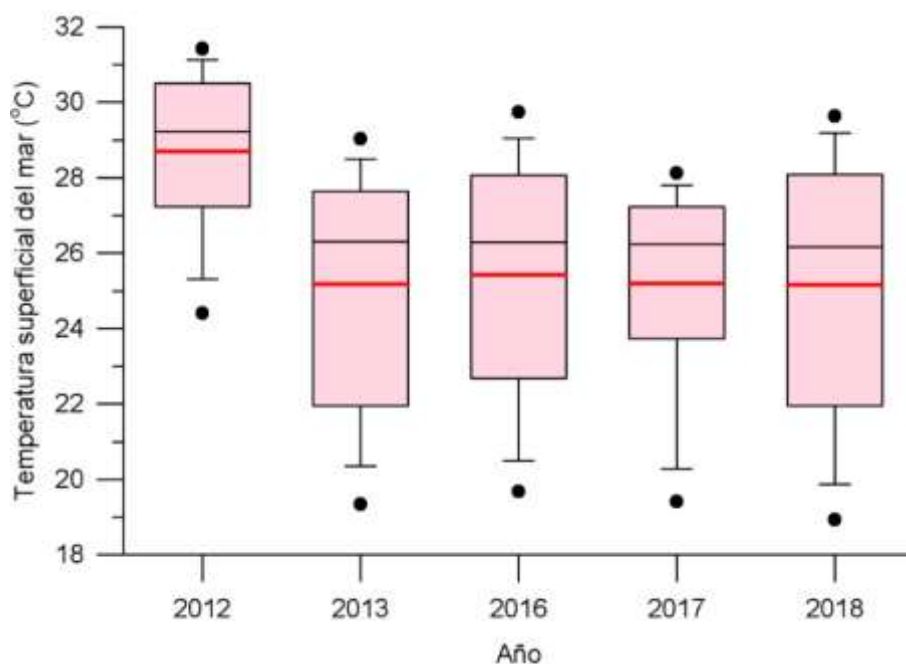


**Fig. 8.** Clasificación de los mamíferos marinos del Océano Pacífico Mexicano por gremios tróficos obtenida de Benavidez-Gómez (2016). I) Primeramente planctófagos. II) Primeramente ictiófagos. III) Teutófagos. IV) Sarcófagos. V) *Sui generis*.

## 5. Resultados

### 5.1. Variación de las condiciones ambientales: Temperatura superficial del mar y concentración superficial de clorofila a

Los veranos examinados presentaron valores de TSM característicos, aunque variables, del verano en el Golfo de California. El verano 2012 fue el verano más cálido con TSM que alcanzó los  $31\pm 4^{\circ}\text{C}$ . Esta campaña se llevó al cabo durante el mes de agosto hacia el término de la estación de verano. Los veranos 2013, 2016 y 2018 son parecidos entre sí con valores de TSM que oscilaron entre 22 y  $28^{\circ}\text{C}$ . El verano 2017 presentó el menor promedio y la menor variación de TSM con valores entre 25 y  $27^{\circ}\text{C}$  (Fig. 9; Tabla 2). Las variaciones de TSM reflejan la ocurrencia de diferentes procesos atmosféricos y oceanográficos de escala mediana que regionalizan el Golfo de California (Mirábal-Gómez *et al.* 2018; Ortiz-Ahumada *et al.* 2018; Gómez Toledo 2019).



**Fig. 9.** TSM registradas satelitalmente en el Golfo de California para la estación de verano durante las cinco campañas oceanográficas CAPEGOLCA agosto 2012, y junio 2013, 2016, 2017 y 2018.

La concentración superficial de Chl-*a* en el verano 2012 fue la más baja con un valor máximo de  $0.39 \text{ mg/m}^3$  seguida del 2016 con una máxima concentración de  $0.47 \text{ mg/m}^3$ , ambos con

poca variación. El verano 2017 mostró valores 0.83 mg/m<sup>3</sup>, el 2018 tuvo 1.00 mg/m<sup>3</sup> y el 2013 tuvo 1.21 mg/m<sup>3</sup>, así como una mayor variación (Fig. 10; Tabla 2). La concentración superficial de Chl-a se relaciona en general de la TSM de manera inversa. El verano 2012 fue el de temperaturas más altas y menores concentraciones de clorofila con similitud al verano 2016 que corresponde a un fuerte evento de El Niño. Los veranos 2013, 2017 y 2018 presentaron mayores concentraciones de clorofila y menores valores de TSM (Figs. 9, 10; Tabla 2).

**Tabla 2.** Valores de las condiciones oceanográficas TSM, ENSO y PDO y la variable biológica concentración superficial de Chl-a.

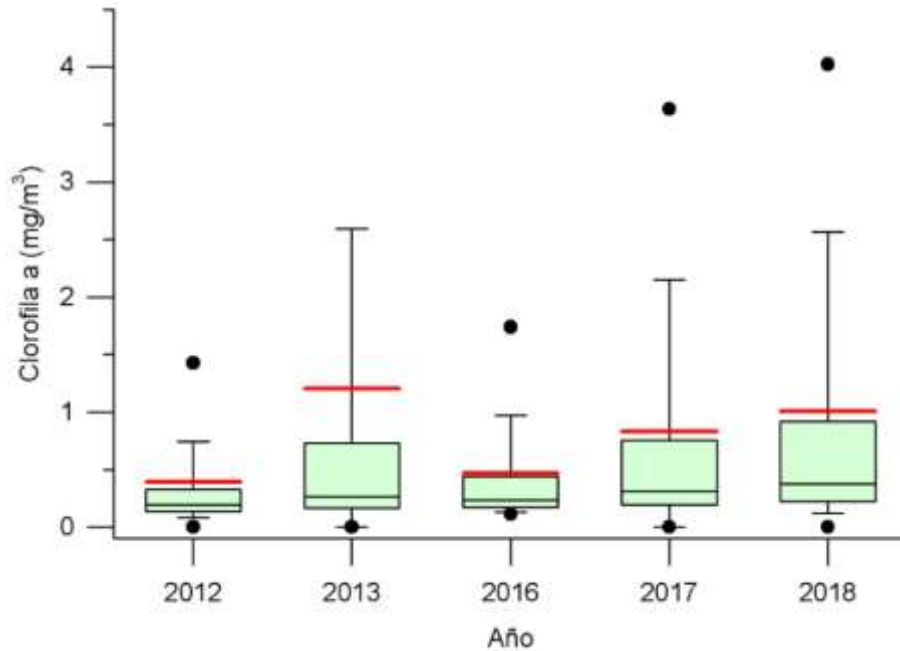
	2012	2013	2016	2017	2018
TSM (grados C)	28.7	25.2	25.4	25.2	25.2
DE TSM	2.20	3.21	2.63	2.84	3.55
concentración superficial de Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	0.39	1.21	0.47	0.83	1.00
DE concentración superficial de Chl-a	0.95	3.35	0.74	1.56	1.94
Anomalía ENSO	0.33	-0.34	0.00	0.38	0.10
PDO	-2.51	-1.26	0.81	0.20	-0.85

## 5.2. Diversidad de la mastofauna marina en el Golfo de California

La diversidad es un atributo faunístico que se refiere al número de especies y su abundancia relativa en una comunidad biológica y sirve para evaluar la complejidad específica y de interacciones de especies en los ecosistemas. La diversidad de mamíferos marinos registrada durante 2002–2018 fue de 25 especies nominales que representan el 63% de la diversidad previamente reportada para el Golfo de California y el 48% de la diversidad reportada de mamíferos marinos en México. La diversidad registrada en este estudio está conformada por seis especies de misticetos, 14 especies de odontocetos, dos especies de pinnípedos y una especie quiróptero. Hay especies costeras, pelágicas y de aguas profundas, así como de afinidades biogeográficas de aguas templadas y de aguas tropicales. (Tabla 3).

Durante los muestreos del presente trabajo se actualizó la taxonomía de dos especies registradas: el primer caso es el del delfín común de rostro largo, *Delphinus capensis* que

cambio a *Delphinus delphis bairdii* y el segundo es del lobo fino de Guadalupe, *Arctocephalus townsendi* que por ahora se denomina *Arctocephalus philippi townsendi*.



**Fig. 10.** Concentración de clorofila a en el Golfo de California registrada satelitalmente para la estación de verano en las cinco campañas oceanográficas CAPEGOLCA VII, VIII, XI, XII y XIII.

Dentro de la diversidad registrada cabe resaltar a la ballena jorobada, *M. novaeangliae*, en la estación de verano dentro del Golfo de California dado que es una especie migratoria y su presencia en todas las aguas del Océano Pacífico Mexicano y Golfo de California es principalmente en el invierno. Si bien los registros de esta especie son mayoritariamente parejas de adultos o individuos solos, en junio de 2018 se registraron hembras con sus crías.

Otra especie a distinguir en nuestros registros fue el lobo fino de Guadalupe (*Arctocephalus philippi townsendi*) debido a que su distribución está identificada principalmente para la Isla Guadalupe y sus alrededores, a 241 km frente a la costa occidental de Baja California al norte de Punta Eugenia. Los registros que obtuvimos son en su mayoría en la región del centro del golfo donde se encuentra un cañón submarino con más de 1000 m de profundidad.

Por último, resalta un solo registro nocturno del murciélago pescador de las Grandes Islas del Golfo de California (*Myotis vivesi*). Esta especie se considera un mamífero marino

porque se alimenta de pequeños crustáceos y peces los cuales captura directo de la superficie del mar y mantiene una población estable en la Región de las Grandes Islas.

**Tabla 3.** Especies de mamíferos marinos registradas a bordo del B/O El Puma durante los veranos de 2012, 2013, 2016, 2017 y 2018 en el Golfo de California. G: Observación general, GF: Observación con registro fotográfico.

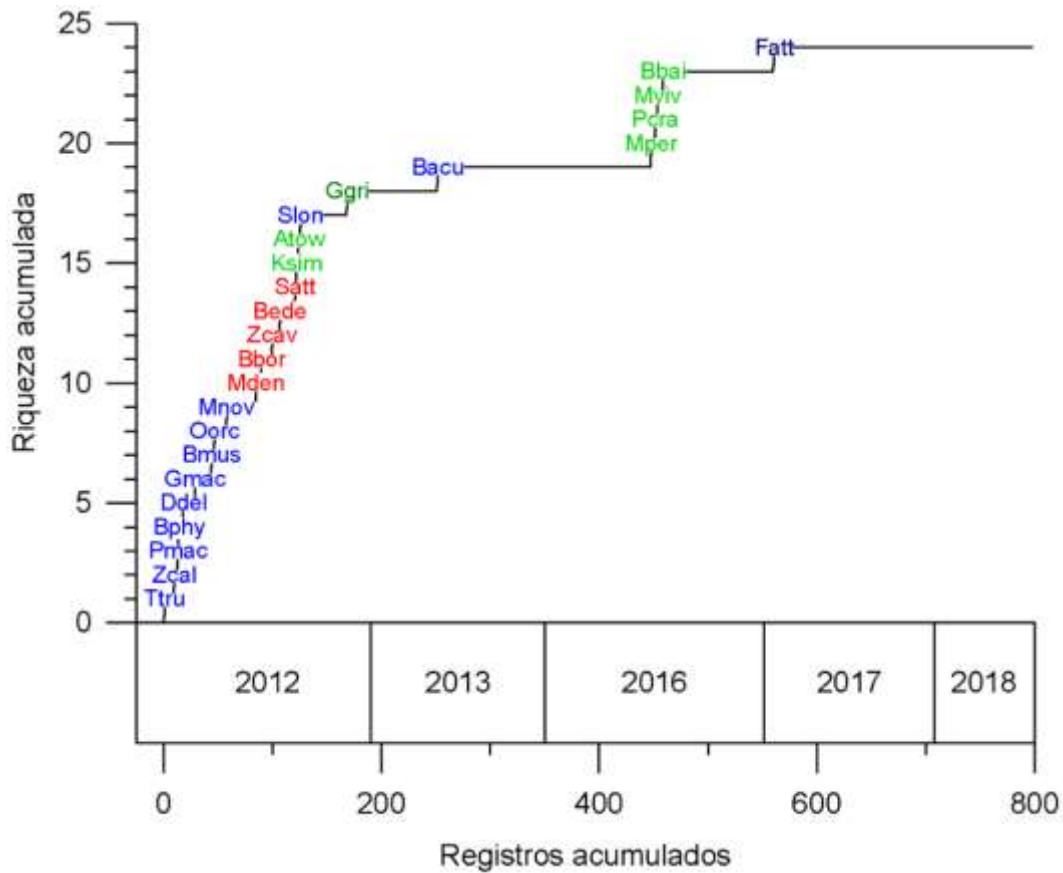
Nombre científico	Acrónimo	Nombre común	Registro
<b>Infraorden Cetacea</b>			
<b>Parvorden Mysticeti</b>			
<b>Familia Balaenopteridae</b>			
<i>Balaenoptera musculus</i>	Bmus	Ballena azul	GF
<i>Balaenoptera physalus</i>	Bphy	Ballena de aleta	GF
<i>Balaenoptera edeni</i>	Bede	Ballena de Bryde o sardinera	GF
<i>Balaenoptera acutorostrata</i>	Bacu	Ballena de Minke	GF
<i>Balaenoptera borealis</i>	Bbor	Ballena de Sei	G
<i>Megaptera novaeangliae</i>	Mnov	Ballena Jorobada	GF
<b>Parvorden Odontoceti</b>			
<b>Superfamilia Delphinoidea</b>			
<b>Familia Delphinidae</b>			
<i>Stenella attenuata</i>	Satt	Delfín moteado	G
<i>Stenella longirostris</i>	Slon	Delfín tornillo	GF
<i>Delphinus delphis delphis</i>	Ddel	Delfín común de rostro corto	GF
<i>Delphinus delphis bairdii</i>	Dcap	Delfín común de rostro largo	GF
<i>Tursiops truncatus</i>	Ttru	Tonina	GF
<i>Feresa attenuata</i>	Fatt	Orca pigmea	G
<i>Grampus griseus</i>	Ggri	Orca de Risso	GF
<i>Orcinus orca</i>	Oorc	Orca	GF
<i>Pseudorca crassidens</i>	Pcra	Orca falsa	G
<b>Superfamilia Ziphioidea</b>			
<b>Familia Ziphiidae</b>			
<i>Berardius bairdii</i>	Bbai	Zifio de Baird	GF
<i>Ziphius cavirostris</i>	Zcav	Zifio de Cuvier	GF
<i>Mesoplodon densirostris</i>	Mden	Zifio de Blainville	G
<i>Mesoplodon peruvianus</i>	Mper	Zifio pigmeo	G
<b>Superfamilia Physeteroidea</b>			
<b>Familia Physeteridae</b>			
<i>Physeter macrocephalus</i>	Pmac	Cachalote	GF
<b>Familia Kogiidae</b>			
<i>Kogia sima</i>	Ksim	Cachalote enano	GF
<b>Orden Carnivora</b>			
<b>Suborden Caniformia</b>			
<b>Familia Otariidae</b>			
<i>Zalophus californianus</i>	Zcal	Lobo marino de California	GF
<i>Arctocephalus philippii townsendi</i>	Aphi	Lobo fino de Guadalupe	GF
<b>Orden Quiroptera</b>			
<b>Familia Vespertilionidae</b>			
<i>Myotis vivesi</i>	Mviv	Murciélago pescador del Golfo de California	G

### 5.3. Variación de la riqueza anual de los mamíferos marinos en el Golfo de California

El ajuste de la curva de acumulación de especies a una hipérbola el tipo Hill muestra que la mayor parte de la riqueza de especies se obtuvo durante el primer verano con el orden de registro en general paralelo a la frecuencia de las especies. Las especies que se registraron primero fueron *T. truncatus* y *Z. californianus* las cuales fueron las especies con mayor número de registros. Se observaron diferencias faunísticas entre veranos, especialmente en 2016 en que se registraron cuatro especies nuevas luego de casi 500 registros previos. La riqueza total observada fue de 25 especies y la estimación con el modelo de Hill predice una riqueza estimada de 28 especies.

La curva de acumulación de especies mostró una separación de tres secciones: la primera sección es la riqueza del verano 2012 con las 18 especies más abundantes; la segunda sección va desde el 2013 hasta el 2015 con el registro de dos especies no previamente observadas en la presente investigación y una nueva estabilización de la riqueza registrada. Por último, se aprecia una tercera sección que va desde el 2016 hasta el 2018 donde se registraron cinco especies más (Fig. 11).

La curva de acumulación de especies por campaña muestra diferencias y patrones de similitud entre veranos. En 2012 registramos 18 especies donde la curva de acumulación resultante es casi de la misma forma que de la riqueza observada total, pero con tres secciones menores de acumulación. La primera sección se generó con 80 registros, la segunda sección va de los 80 a los 130 registros, y la tercera sección va de los 130 a los 190 registros. En 2013 la riqueza que registramos fue de 14 especies y muestra una curva de acumulación uniforme hasta los 140 registros con la estabilización de la curva en 70 registros. En 2016 registramos la mayor riqueza por crucero que es de 19 especies y esta riqueza también se acumuló en tres secciones: la primera sección con 70 registros, la segunda va de los 70 a los 90 registros, y la tercera va de los 110 a los 150 registros. En verano 2017 la riqueza registrada fue de 13 especies habiendo solamente una curva de acumulación casi estabilizada en los 40 registros y una última especie registrada después de 120 avistamientos. En verano 2018 registramos la menor riqueza que fue de 11 especies, pero con dos secciones de acumulación, la primera hasta los 70 registros y la segunda sección de los 80 a los 90 registros. (Fig. 12; Tabla 4).



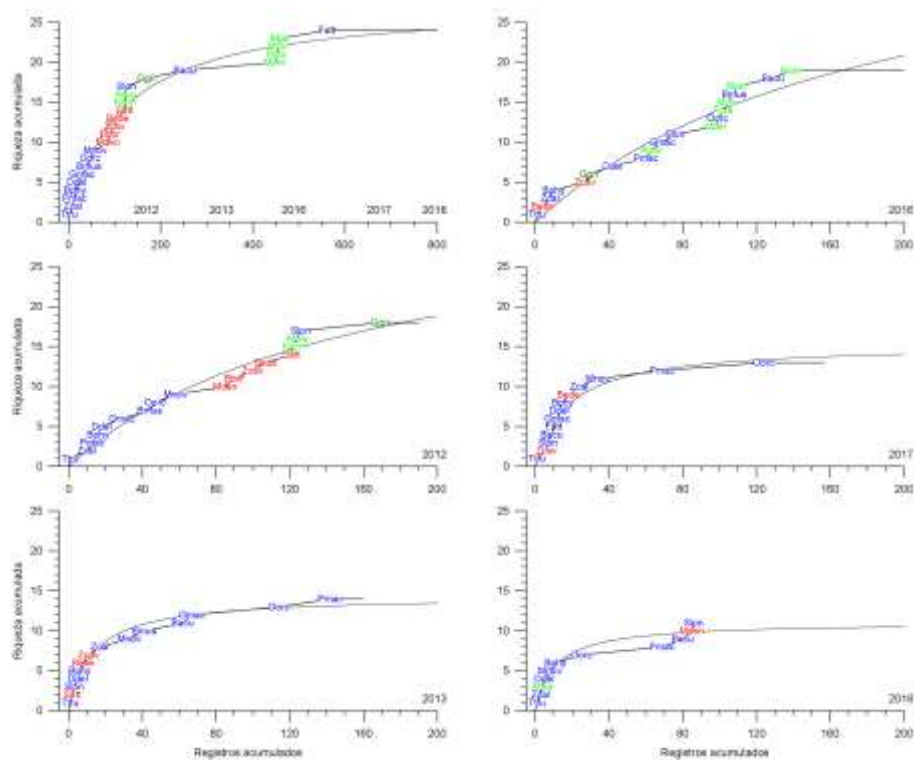
**Fig. 11.** Riqueza observada de mamíferos marinos en el Golfo de California durante los veranos 2012, 2013, 2016, 2017 y 2018. Los colores hacen referencia a la clasificación de las especies en las asociaciones de la sección 5.4.

Los veranos 2012 y 2016 fueron similares en cuanto a tres secciones de acumulación de especies mientras que los veranos 2013 y 2017 presentan una curva de acumulación sencilla. El verano 2018 tuvo un patrón único por la menor riqueza registrada en aparentemente dos secciones de acumulación diferentes y menor ocurrencia de las especies de mayor abundancia. Estos resultados nos permiten inferir que la composición de la mastofauna marina del Golfo de California varía interanualmente.

La concentración superficial de Chl-*a* muestra una relación en general inversa con la riqueza de mamíferos marinos. La mayor riqueza y menor concentración superficial de Chl-*a* se observó durante 2016 y 2012, los valores mas altos valores de concentración superficial de Chl-*a* y baja riqueza durante el 2017 y 2018. El verano 2013 tuvo una tendencia diferente con aumento de la riqueza y el mayor promedio de concentración superficial de Chl-*a* (Fig. 13; Tabla 5).

**Tabla 4.** Atributos de diversidad de mamíferos marinos observados en el Golfo de California.

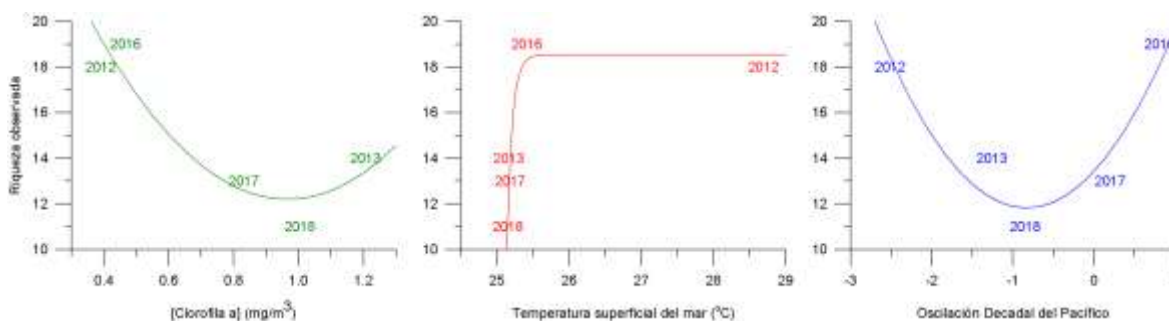
Variables/Veranos	2012	2013	2016	2017	2018
Avistamientos	190	160	201	156	90
Avistamientos / hora	0.85	0.87	0.88	0.66	0.59
Avistamientos identificados	169	142	139	124	86
Riqueza observada	18	14	19	13	11
Riqueza efectiva	7	6	5	5	3
S (bits)	6.15	4.67	6.26	3.92	4.41
R <sub>max</sub>	36	14	90	16	11
k	172	12	530	19	10
r <sup>2</sup>	0.97	0.98	0.96	0.95	0.96



**Fig. 12.** Curvas anuales de acumulación de especies de mamíferos marinos en el Golfo de California con el ajuste a la ecuación de Hill. Los colores indican las asociaciones de especies identificadas en la sección 5.4.



La riqueza de mamíferos marinos muestra una relación ante la TSM en donde los veranos de 2013, 2017 y 2018 presentan bajos valores de TSM y baja riqueza, mientras que 2012 muestra la mayor media de TSM y alta riqueza. La TSM fue apenas mayor y la riqueza mayor en verano 2016 en comparación con los veranos de 2013, 2017 y 2018 (Fig. 13; Tabla 4). El PDO tiene una relación tipo parabólica con la riqueza en la que 2018 tiene un valor medio de PDO y la menor riqueza mientras que 2013 y 2017 tienen valores medianamente negativos y positivos de PDO y riqueza intermedia. 2012 tuvo el menor valor de PDO y 2016 tuvo el valor mayor de PDO y ambos tienen los mayores valores de riqueza (Fig. 13, Tabla 4).



**Fig. 13.** Relación de la riqueza observada con las variables oceanográficas concentración superficial de Chl-*a* (verde), TSM (rojo) y PDO (azul) anuales.

**Tabla 5.** Parámetros ajustados de la riqueza observada a un polinomio de segundo orden para la concentración superficial de Chl-*a* y el PDO, y para una ecuación exponencial para la TSM (Fig. 13).

Parámetro	Concentración		Parámetro	
	superficial de Chl- <i>a</i>	PDO		TSM
y0	32.09	13.46	a	18.53
y1	-41.18	3.899	b	13.43
y2	21.31	2.342	c	25.07
r <sup>2</sup>	0.874	0.861	r <sup>2</sup>	0.923

#### 5.4. Asociaciones de especies y secciones de acumulación de la mastofauna marina

Se clasificó la ocurrencia de las especies registradas por medio de un análisis de escalamiento multidimensional lineal y como resultado se obtuvieron tres asociaciones de especies: I) la primera asociación (azul) es la más diversa de las tres y se formó con, *B.*

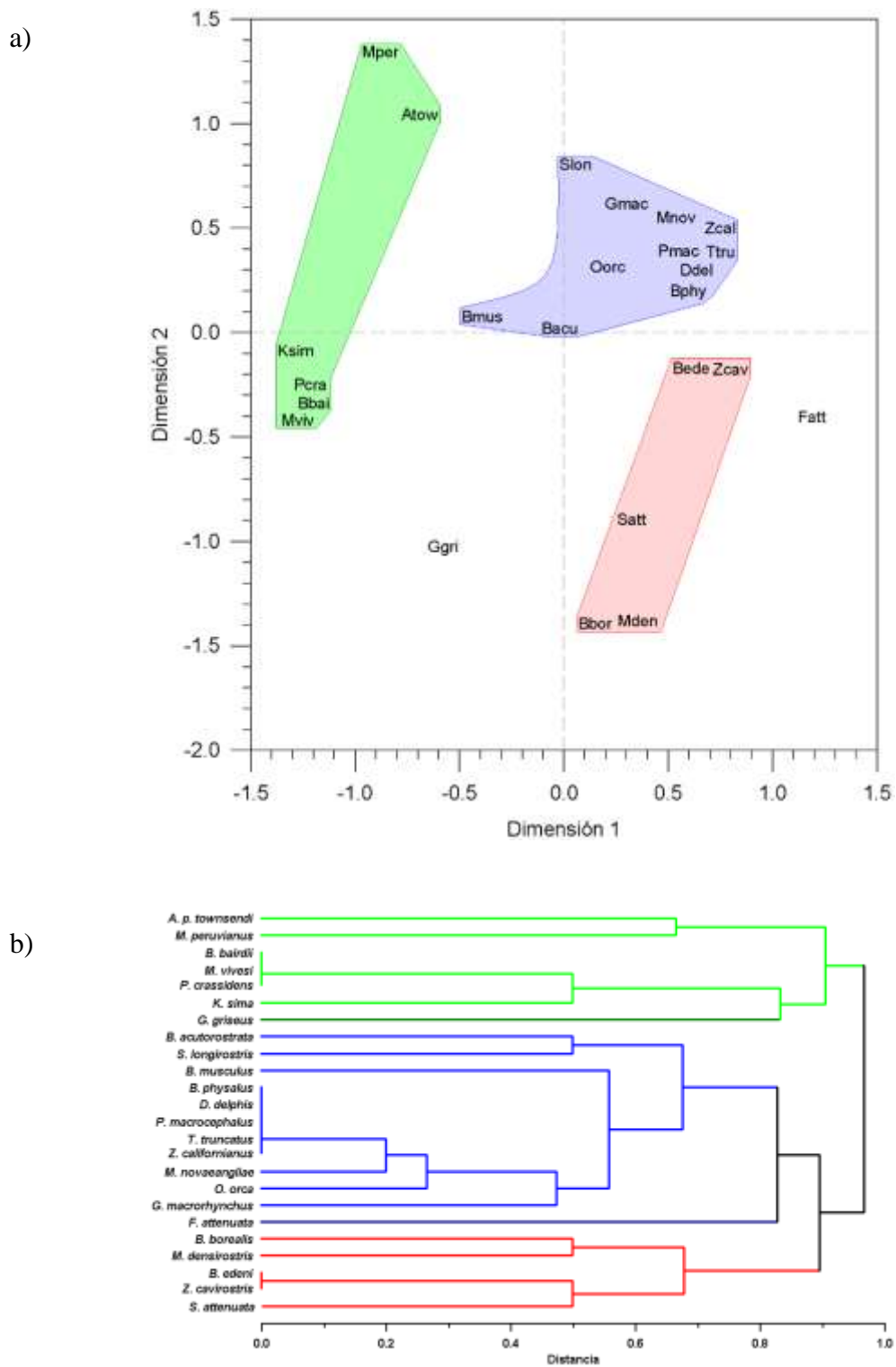
*physalus*, *D. delphis*, *T. truncatus*, *Z. californianus*, *G. macrorhynchus* *P. macrocephalus*, *M. novaeangliae*, *O. orca*, *B. musculus*, *B. acutorostrata* y *S. longirostris*. Estas especies se registraron los cinco veranos o al menos tres veranos. Es decir, son especies comunes y con poblaciones locales residentes en el Golfo de California; II) la segunda asociación (verde) contiene a *M. peruvianus*, *A. phillippi*, *K. sima*, *P. crassidens*, *B. bairdii* y *M. vivesi*. Esta asociación se compone en su mayoría por especies teutofágicas; III) la tercera asociación (rojo) se compone de *B. edeni*, *Z. cavirostris*, *S. attenuata*, *B. borealis* y *M. densirostris* los cuales tienen en común una afinidad a aguas tropicales. En el análisis de escalamiento no métrico multidimensional mostró que dos especies aparecen alejados de las tres asociaciones: la primera es *G. griseus* que es una especie teutofágica, pero con una distribución única en el centro del golfo, y la segunda es *F. attenuata* que es tropical pero que en todos los océanos del mundo es una especie rara (Fig. 14 a).

Con la misma matriz de distancias adicionalmente se construyó un dendrograma que muestra las tres asociaciones, así como un grado de cercanía diferencial entre ellas (Fig. 14 b). Estas asociaciones se distribuyeron en diferentes partes del golfo. La asociación I se distribuyó en casi todo el golfo con afinidad a las costas y a la Región de las Grandes Islas; la asociación II está presente cerca de las costas, y la asociación III ocurre principalmente en aguas profundas hacia la parte media del golfo. Las especies con ubicación lejana a las asociaciones tienen una distribución similar a la asociación II (Fig. 15).

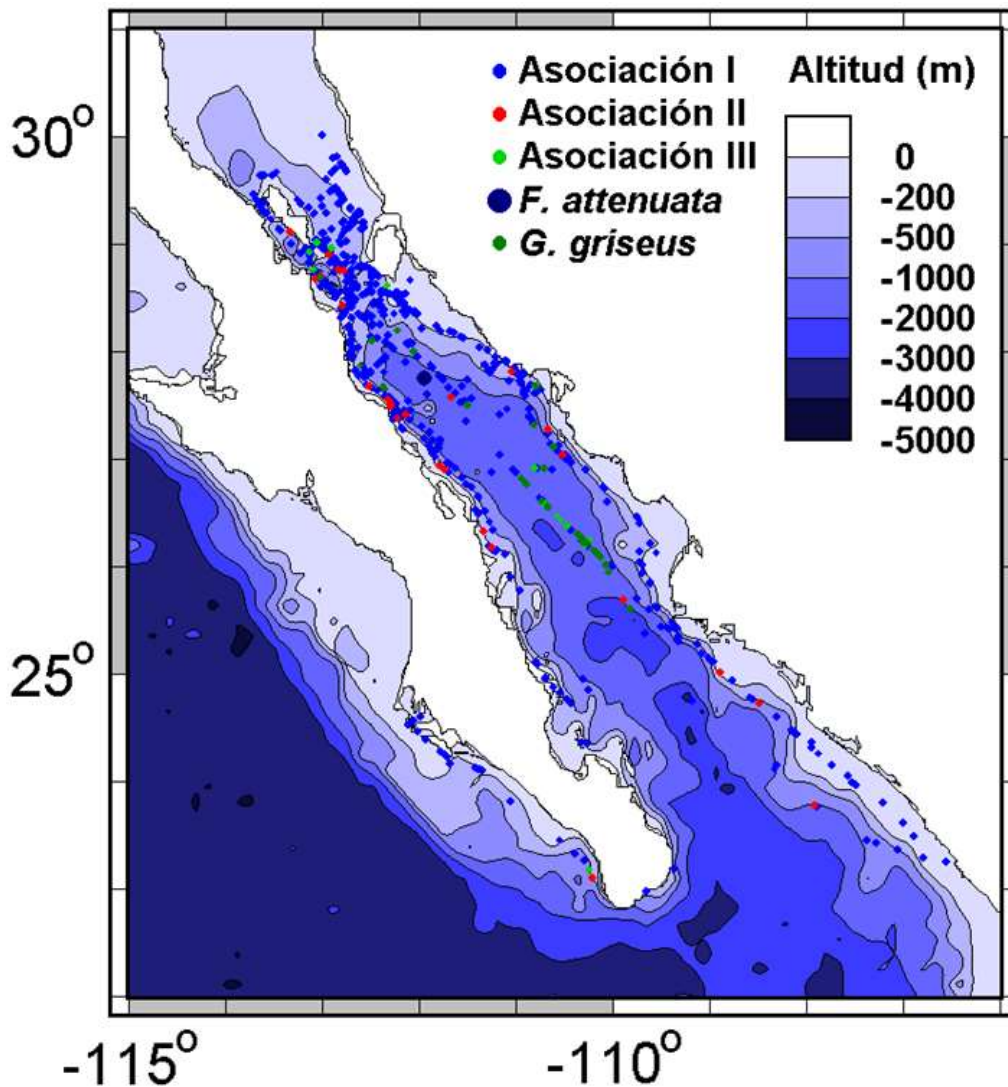
El análisis de escalamiento no métrico multidimensional también permitió clasificar las secciones de acumulación de especies. Esta clasificación resultó en dos grupos, el primero contiene sólo a las secciones “a” de los veranos 2012, 2013, 2016 y 2018, y el segundo grupo contiene a las secciones “c” del 2012 y a las secciones “b” de los veranos 2016 y 2018. Las secciones “b” del verano 2012 y “c” del verano 2016 aparecen aisladas (Fig. 16a). El dendrograma de las secciones de acumulación muestra la separación de la sección “b” de 2012 pero unida lejanamente al grupo “a”, mientras que la sección “c” de verano 2016 está unida a las secciones “b” y “c” (Fig. 16b).

Las secciones “a” de los veranos 2012 y 2018 se distribuyeron muy cerca de ambas costas y en la Región de las Grandes Islas. La sección “b” de 2012 se distribuyó principalmente junto a la costa de Baja California, la sección “c” de 2012 y las secciones “b” de los veranos 2016 y 2018 se distribuyeron en la zona central del golfo, la costa este de la

Baja California y por fuera del golfo hacia la costa Oeste de la Baja California. La sección “c” del verano 2016 se distribuyó en la zona central del golfo y la Región de las Grandes Islas (Fig. 17).



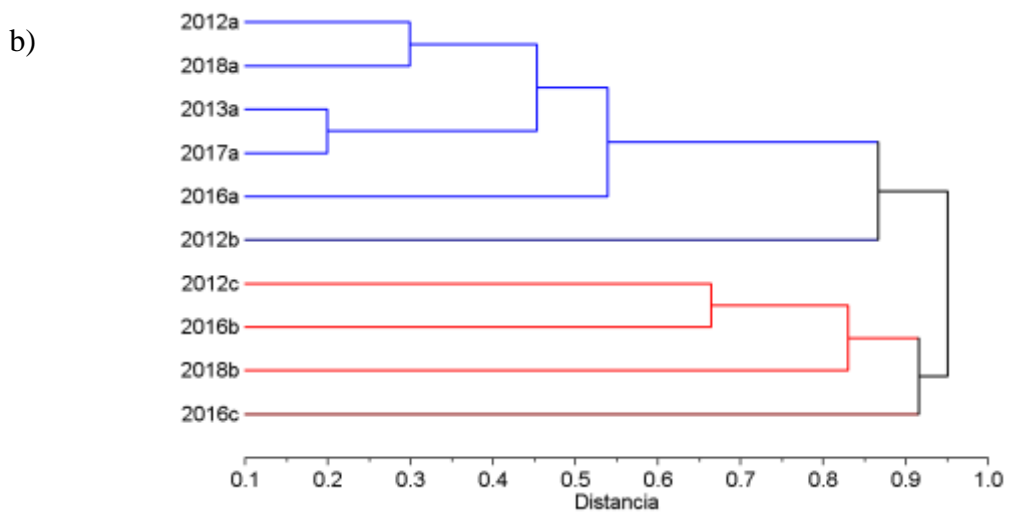
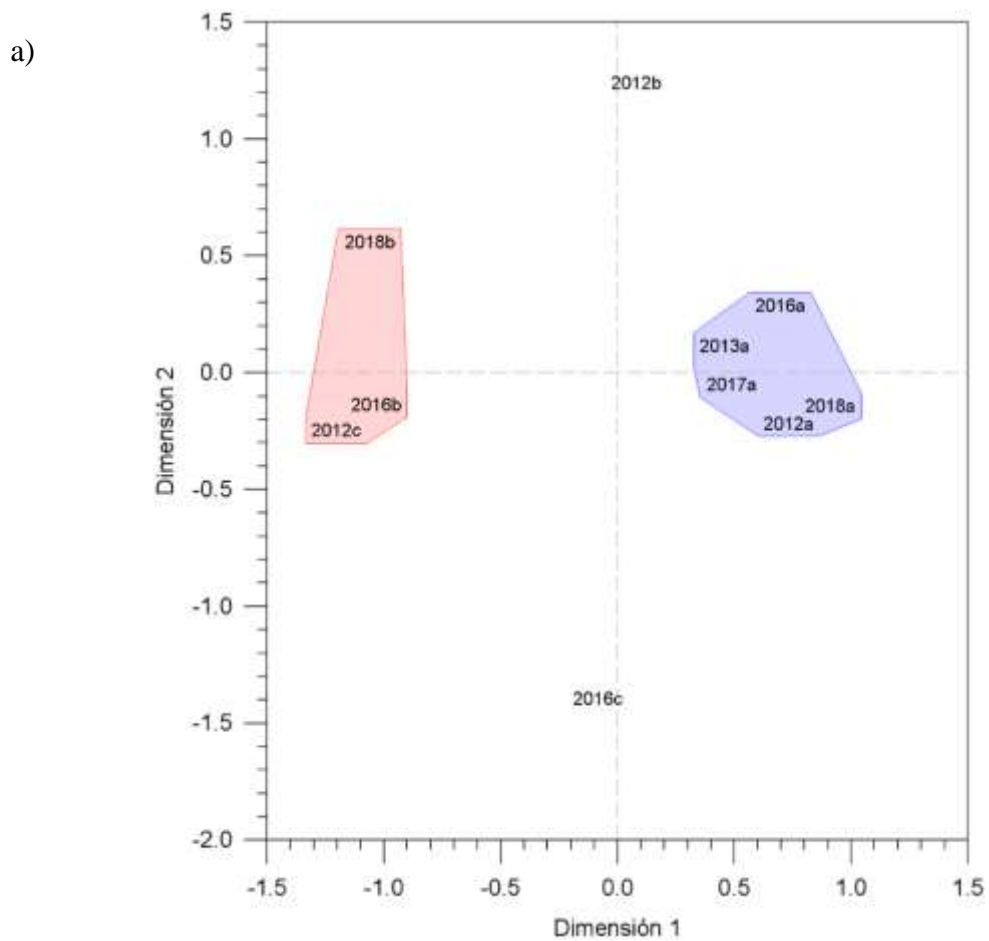
**Fig. 14.** Clasificación de especies por escalamiento no métrico multidimensional (a) y por análisis de cúmulos (b). Asociación I (azul), especies comunes. Asociación II (verde), especies teutofágicas. Asociación III (rojo), especies con afinidad a aguas tropicales. Especies satelitales *G. griseus* y *F. attenuata*. Abreviaturas de las especies en la Tabla 3.



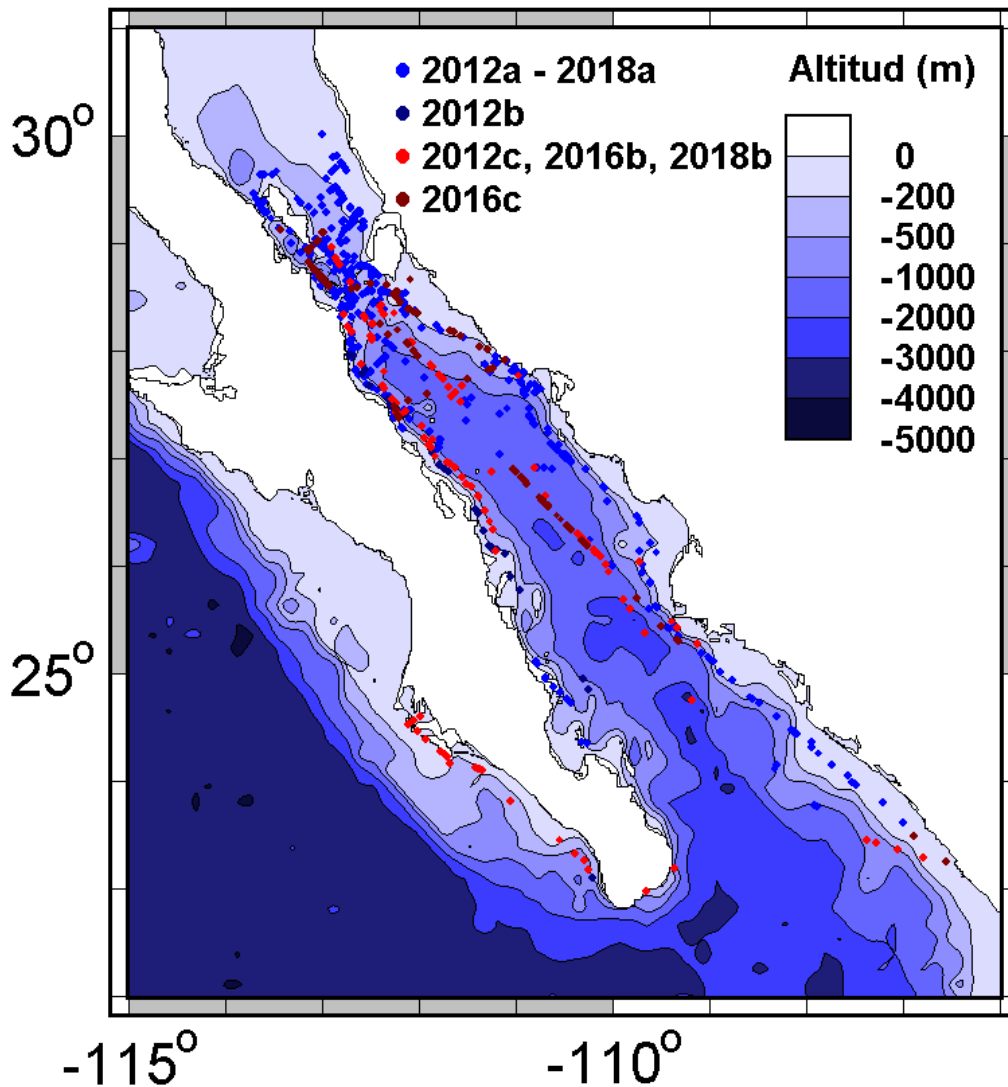
**Fig. 15.** Distribución geográfica de las asociaciones entre especies de mamíferos marinos en el Golfo de California.

### 5.5. Variación de la ocurrencia y riqueza de especies

La comparación de la riqueza observada y efectiva en función del número de avistamientos muestran similitud de los veranos 2012 y 2016 con la riqueza observada más alta y el mayor número de avistamientos. Los veranos 2017 y 2013 presentan riqueza efectiva baja y riqueza observada media con número de avistamientos medio. El 2018 fue el verano más diferente de los demás debido a que presenta los menores valores de riqueza observada, riqueza efectiva y número de avistamientos (Fig. 18; Tabla 5).



**Fig. 16.** Clasificación de las secciones de acumulación de las especies por escalamiento no métrico multidimensional (a) y por análisis de cúmulos (b). Secciones de acumulación inicial “a” (azules), secciones de acumulación posteriores “b” y “c” (rojos).



**Fig. 17.** Distribución geográfica de las secciones de acumulación de especies en el Golfo de California.

La especie más frecuente durante verano 2012 fue *T. truncatus*, seguido de *Z. californianus*. En 2016 *T. truncatus* también fue la especie más frecuente seguida de *Z. californianus*, y se registró una frecuencia importante de *G. griseus*. En verano 2016 además se registraron *A. philippii townsendi* y *M. vivesi* (Fig. 18). En 2013 *B. physalus* fue ligeramente más frecuente que *Z. californianus*, seguido de *D. delphis* y *T. truncatus*. En verano 2017 *B. physalus* también fue la especie más frecuente seguida de *Z. californianus* y frecuencias similares de *T. truncatus* y *D. delphis* (Fig. 18). *Z. californianus* fue la especie más frecuente durante 2018, seguida de *D. delphis* y *M. novaeangliae*. En verano 2018 el muestreo se modificó en fechas y la cobertura geográfica por la presencia de un huracán en

la Boca del Golfo. Las condiciones del mar no permitieron siquiera el muestreo oceanográfico. Es posible que por estas condiciones los resultados del muestreo estén sesgados a una baja de diversidad y abundancia relativa (Fig. 18).

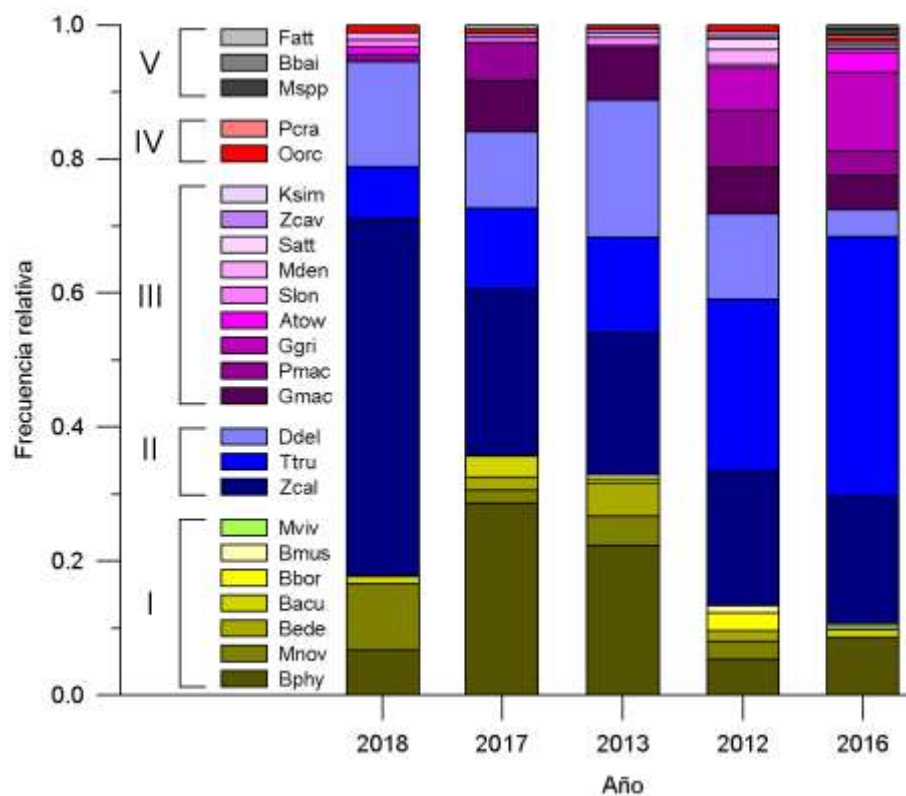
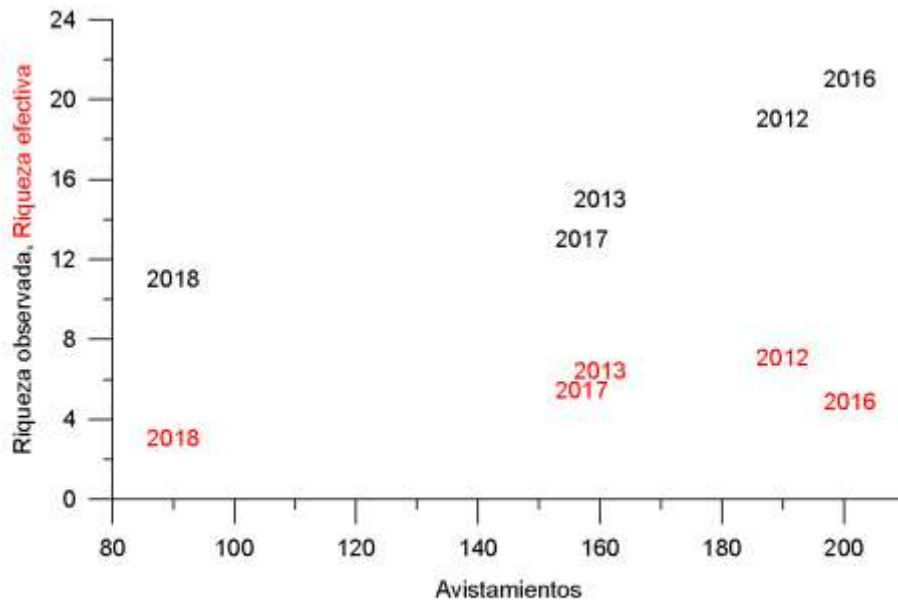
## 5.6. Variación por gremios tróficos

Para el caso de la mastofauna marina registrada en este estudio, los gremios se componen de la siguiente manera: Gremio I o primariamente planctófagos, se compone de *B. musculus*, *B. physalus*, *B. borealis*, *B. edeni*, *B. acutorostrata*, *M. novaeangliae* y *M. livesi*. El gremio II o primariamente ictiófagos está formado por *D. delphis*, *T. truncatus* y *Z. californianus*. El gremio III o teutófagos se compone por *G. griseus*, *G. macrorhynchus*, *Z. cavirostris*, *K. sima*, *P. macrocephalus*, *A. philippii townsendi*, *S. attenuata*, *S. longirostris* y *S. bredanensis*. El gremio (IV) o sarcófagos, se compone por *O. orca* y *P. crassidens*. El gremio (V) o *sui generis*, se compone de las especies *F. attenuata*, *B. bairdii* y *M. peruvianus* cuya dieta es aún poco conocida en el Pacífico Mexicano. El gremio más diverso durante 2012 y 2016 fue el de los teutófagos (7 spp) y fue seguido de los planctófagos (5 spp), los ictiófagos (3 spp), los sarcófagos y *sui generis* con una especie cada una. (Fig. 19). Los planctófagos y los teutófagos fueron los gremios más diversos en 2013 (5 spp) siendo seguidos de los ictiófagos (3 spp), los sarcófagos y el grupo *sui generis* con una especie cada uno.

Los planctófagos y teutófagos fueron también los gremios más diversos en 2017 (4 spp) seguidos de los ictiófagos (3 spp), los sarcófagos (1 sp) y el grupo *sui generis* con la especie *F. attenuata*. El gremio de los teutófagos fue el más diverso también en 2018 (4 spp) y el menos diverso fue el de los sarcófagos con una especie. El verano 2018 presentó una baja abundancia y diversidad de mamíferos marinos lo cual parece derivado de un huracán y condiciones poco propicias de observación de mamíferos marinos (Fig. 18).

La asociación I (especies con poblaciones locales) es la más diversa con 11 especies de los gremios I, II, III y IV. La asociación II (especies comunes continuas con el Pacífico adyacente) es la segunda más diversa y no existe presencia del gremio II. La asociación III es la menos diversa y sólo presenta especies de los gremios I y III. Entre las especies no asociadas, *F. attenuata* es del gremio V y *G. griseus* se ubica en el gremio III (Fig. 19).





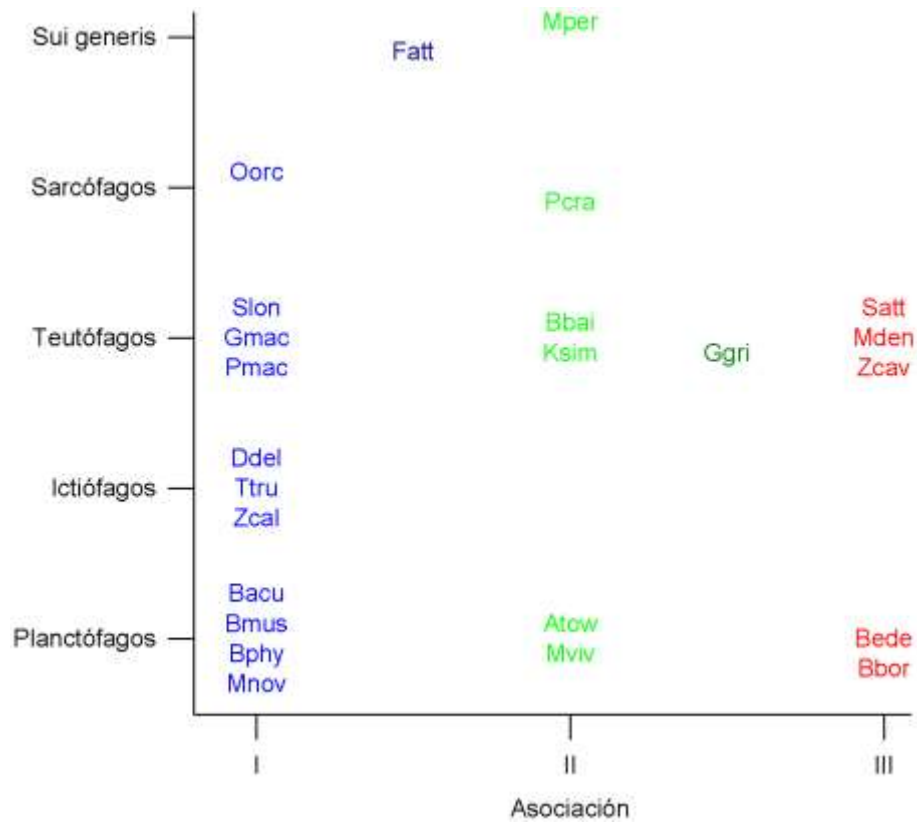
**Fig. 18.** Riqueza y ocurrencia de las especies de mamíferos marinos en el Golfo de California, ordenadas por gremio trófico. I (planctófagos) en tonos de amarillo; II (mayormente ictiófagos) en tonos de azul; III (teutófagos) en tonos de morado; IV (sarcófagos) en tonos de rojo y V (sui generis) en tonos de gris. Los veranos están ordenados en orden creciente de la desviación estándar de la TSM como indicador de variabilidad ambiental (Fig. 22).

La diversidad en términos del número efectivo de especies fue mayor en los veranos de 2012 y 2016, y menor en verano 2013. La mayor diversidad de 2012 se debió a más especies de teutófagos y planctófagos mientras que en verano 2016 se debió a más teutófagos, sarcófagos y el gremio *sui generis*. Todos los gremios fueron menos diversos en 2013 con excepción de los ictiófagos. El gremio *sui generis* solamente se observó en los veranos 2016 y 2017. A lo largo del tiempo, se observó una tendencia negativa en la riqueza efectiva del gremio I con una aparente recuperación en verano 2018 (Fig. 20).

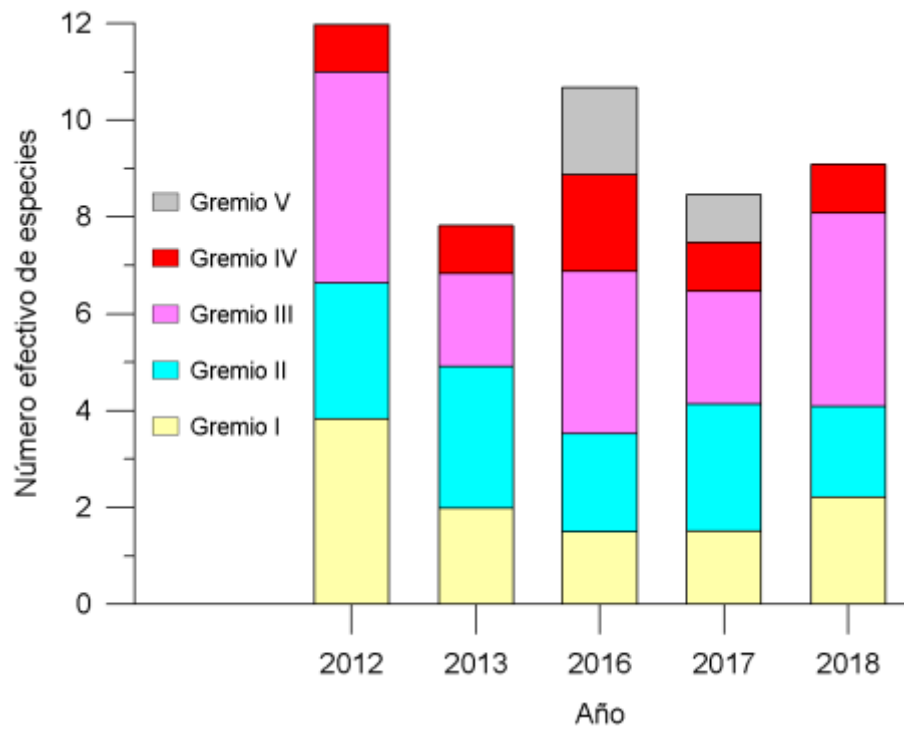
Al contrastar la ocurrencia de las especies por gremios a lo largo de los veranos se observa que no existe relación entre los gremios I y II mientras que sí existe una relación negativa entre las ocurrencias de los gremios III y I, II. Se observó una relación positiva débil entre los gremios IV y III, así como una relación positiva bien definida entre los gremios IV y I, II (Fig. 21).

Se examinó la diversidad y ocurrencia de la mastofauna marina en términos de gremios con respecto a la desviación estándar (DE) de la TSM la cual fue el indicador de variabilidad ambiental que mostró un patrón más simple y mejor definido (Fig. 22). Se observó una tendencia general de incremento de la abundancia relativa y la diversidad de mamíferos marinos con respecto a la DE-TSM con excepción del verano 2017 el cual tuvo un valor medio de DE-TSM y los valores más bajos de ocurrencia y diversidad de mamíferos marinos (Figs. 18, 22).

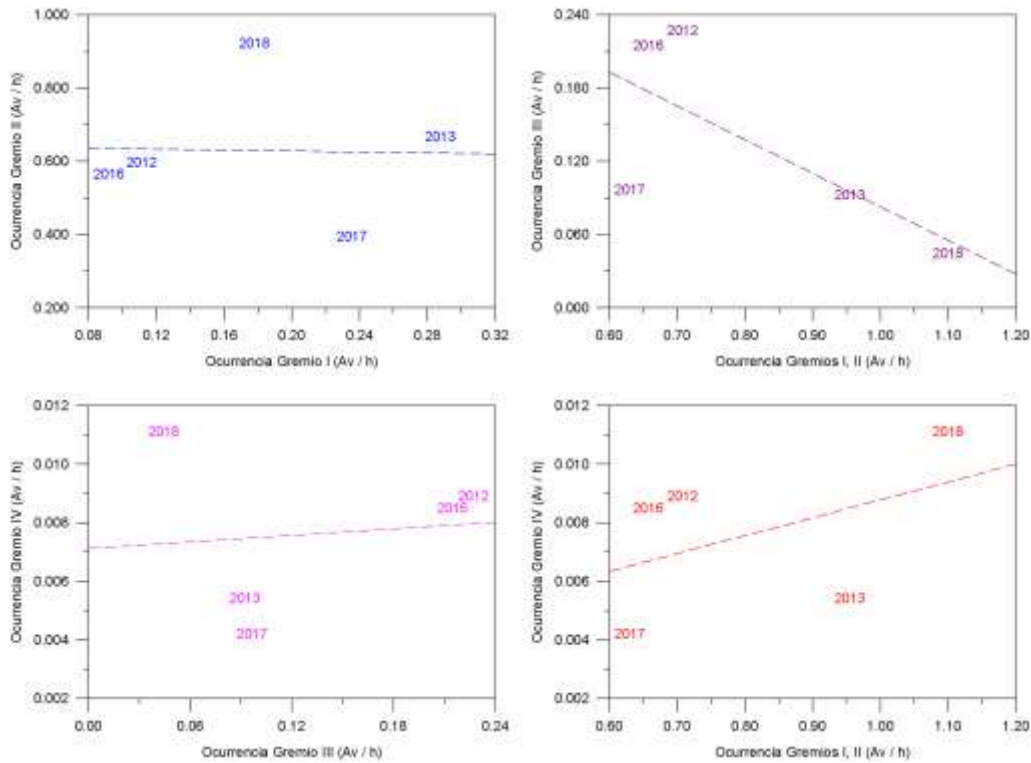
Este patrón es prácticamente el mismo que el de los gremios I y II juntos observándose que la diversidad y ocurrencia de ambos gremios alternaron aumentos y disminuciones de diversidad y ocurrencia sin aparente relación entre ellos habiendo mayor ocurrencia de planctófagos en los veranos 2013 y 2017 (con los segundos valores de menor TSM y mayor DE-TSM), y mayor ocurrencia de ictiófagos en verano 2018 (con la menor TSM promedio y el mayor valor de DE-TSM). Asimismo, existe un pequeño aumento de los sarcófagos en 2018 (Figs. 18, 21, 22). El gremio III mostró mayor diversidad y ocurrencia en los veranos 2012 y 2016 (los de alta TSM) y tuvo menores valores de estos atributos en los veranos menos cálidos y más variables de los veranos 2013, 2017 y 2018. Hay que resaltar la alta equidad de teutófagos y sarcófagos en los bajos valores de ocurrencia de estos gremios en verano 2018 (Figs. 18, 22).



**Fig. 19.** Diversidad de las asociaciones con relación a los gremios tróficos.

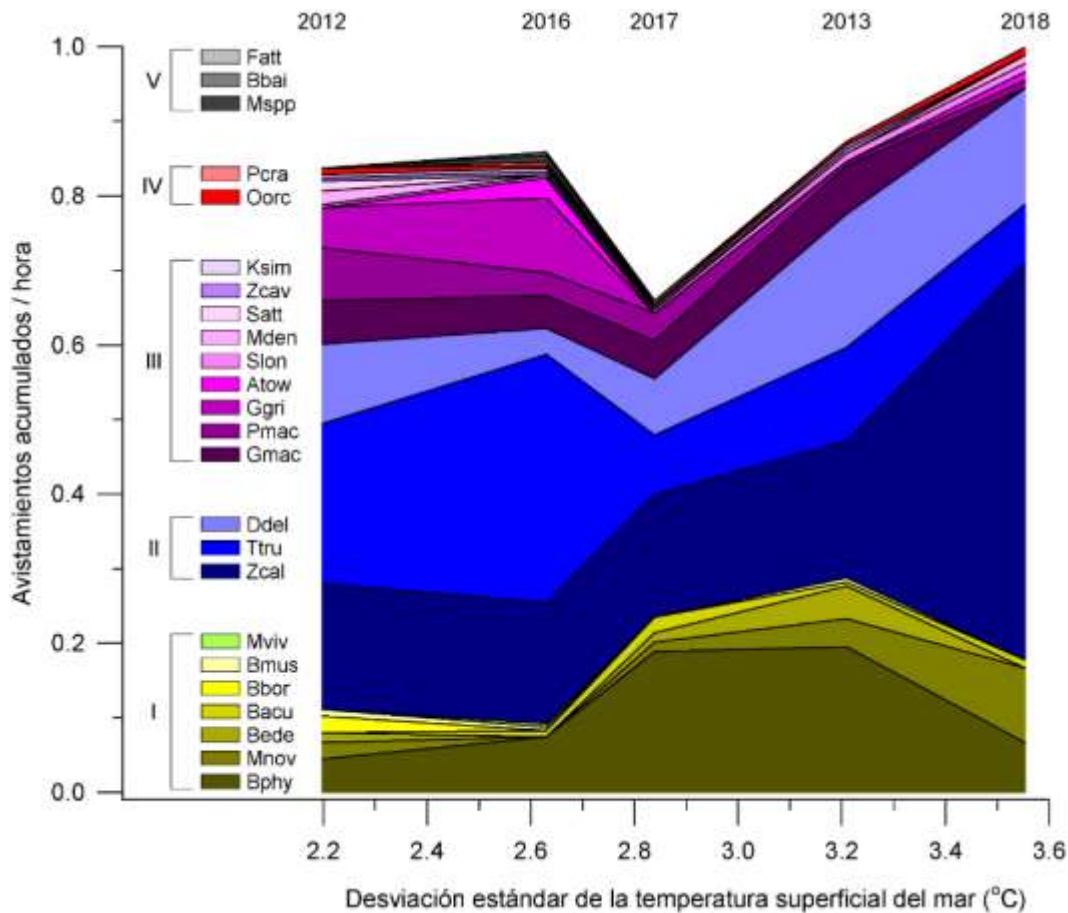


**Fig. 20.** Variación anual del número efectivo de especies por gremio trófico.



**Fig. 21.** Relaciones de la ocurrencia entre gremios tróficos.

El gremio I se observó en ambas costas al norte de la latitud  $25^\circ$  así como en la Región de las Grandes Islas (Fig. 23). Estas zonas están bien caracterizadas por su alta productividad primaria la cual se debe a diferentes procesos tales como surgencias por giros en la costa occidental, surgencias por acción del viento en la costa oriental y descarga de ríos, así como la acción de las amplias mareas en la Región de las Grandes Islas. El gremio II se distribuyó desde la Boca del Golfo hasta la Región de las Grandes Islas (donde se observó su mayor abundancia) incluyendo ambas costas del golfo e incluso su parte central. El gremio III se observó mayoritariamente en las cuencas de gran profundidad en la parte media del golfo, así como en la cuenca de Santa Rosalía, hacia Salsipuedes y la Isla San Pedro Mártir. El gremio IV mostró una distribución fragmentada por tener muy pocos registros la mayoría de los cuales ocurrió en la Región de las Grandes Islas, así como en la parte central del golfo en la latitud  $25^\circ$ . Existen pocos registros del gremio V para determinar su distribución y este gremio es asimismo un conjunto artificial debido al desconocimiento de la dieta de las especies que lo conforman con excepción de la vaquita (Figs. 8, 23).



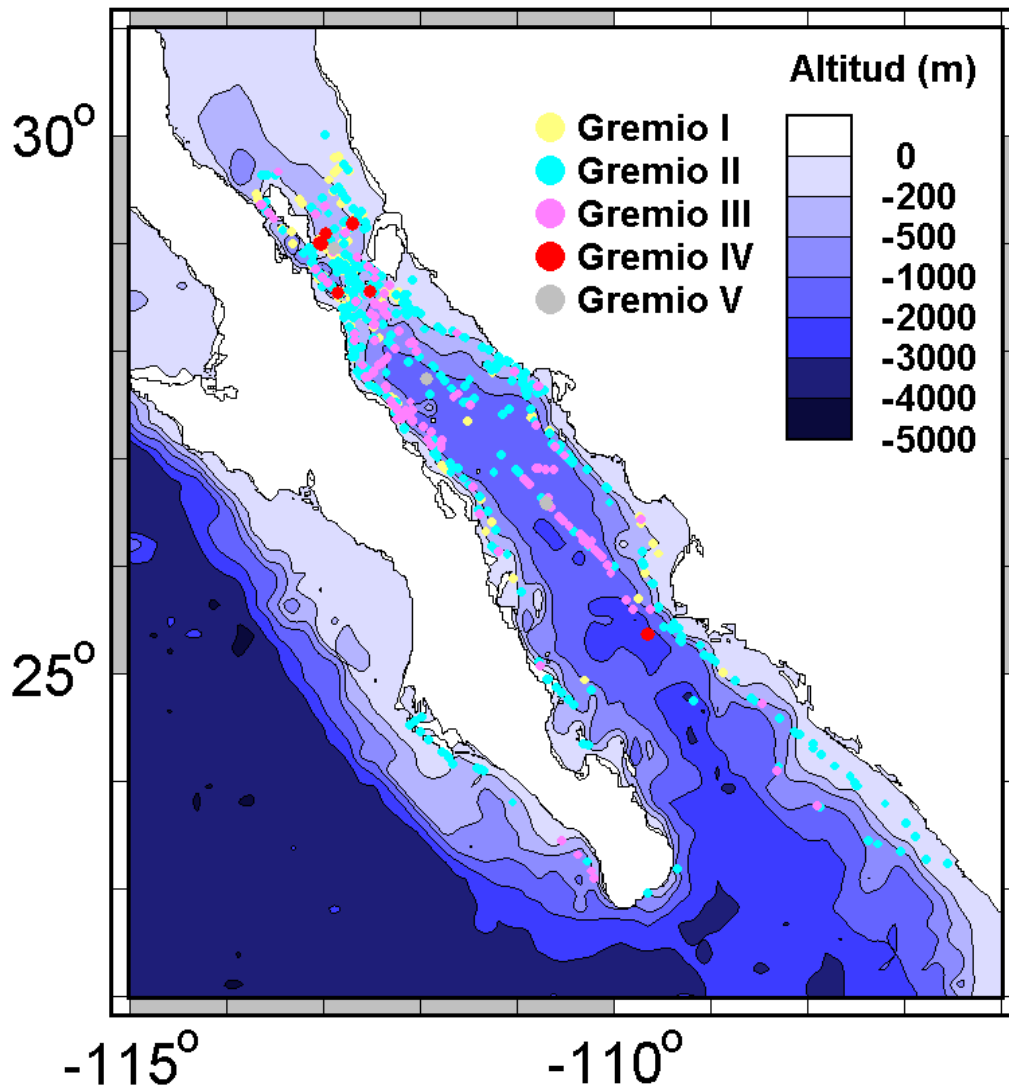
**Fig. 22.** Variación de la diversidad y ocurrencia anual de mamíferos marinos del Golfo de California por gremio trófico en relación con la DE-TSM como indicador de variabilidad ambiental. I (planctófagos) en tonos de amarillo; II (mayormente ictiófagos) en tonos de azul; III (teutófagos) en tonos de morado; IV (sarcófagos) en tonos de rojo y V (*sui generis*) en tonos de gris.

## 6. Discusión

En el Golfo de California se reconocen dos estaciones climáticas: una cálida de julio a noviembre y otra fría de diciembre a junio que son muy diferentes entre sí, así como altamente variables entre veranos (Lavin *et al.* 1997, 2003; De la Lanza 2004; Hidalgo-González & Álvarez Borrego 2008; Calmus *et al.* 2017; Robles-Tamayo 2018).

Esta investigación se llevó a cabo durante el verano de cinco veranos incluyendo un evento El Niño intenso (2016) (Portner *et al.* 2022, Ventura-Domínguez *et al.* 2022; García Fernández *et al.*, 2023) por lo que los resultados de este trabajo pueden ilustrar el cambio en

la mastofauna marina ante el cambio ambiental en general, pero especialmente el cambio climático a mediano plazo.



**Fig. 23.** Distribución de los gremios tróficos de mamíferos marinos en el Golfo de California durante los veranos de 2012, 2013, 2016, 2017 y 2018.

La variación ambiental asociada registrada fue solamente la TSM y la concentración superficial de Chl-*a* las cuales, aunque sus registros cubren grandes extensiones, representan sólo una pequeña porción de la columna de agua en la que viven los mamíferos marinos (Pardo *et al.* 2015). Las variaciones de TSM en particular se pueden considerar una aproximación a la variación ambiental general ya que reflejan la interacción de diferentes procesos atmosféricos y oceanográficos de escala mediana que regionalizan el Golfo de

California y en los que la concentración superficial de Chl-*a* exhibe una relación general inversa con la TSM. Los veranos 2012 y 2016 mostraron los mayores valores de TSM y las menores concentraciones superficiales de Chl-*a*, éste último verano asociado al fuerte evento El Niño 2015–2016 (Portner *et al.* 2022, Ventura-Domínguez *et al.* 2022; García Fernández *et al.*, 2023). Los veranos 2013, 2017 y 2018 presentaron valores menores de TSM y mayores de concentración superficial de Chl-*a* (Mirábal-Gómez *et al.* 2018; Ortiz-Ahumada *et al.* 2018; Gómez-Toledo 2019). De acuerdo con Pardo *et al.* (2015) la relación inversa entre la TSM y la concentración superficial de Chl-*a* son consecuencia indirecta de la dinámica en la picnolínea lo cual no se relaciona directamente con la abundancia de los mamíferos marinos. Sin embargo, Gómez-Toledo (2019), como otros autores, identifican que valores altos de concentración superficial de Chl-*a* y producción primaria mantienen poblaciones abundantes de mamíferos marinos.

Existen diversos estudios enfocados en atender la estructura, interacciones y variación de la comunidad de mamíferos marinos del Golfo de California que aportan información para seguir avanzando al entendimiento de su ecología (Gerrodette 1994, Moreno-Zúñiga 2008; Paniagua-Mendoza 2009; Salvadeo *et al.* 2009; Arellano- Peralta & Medrano González 2015; García-Morales 2017). Si bien el estudio de los mamíferos marinos es difícil por sus largos ciclos de vida y la alta capacidad de dispersión que los hace optimizar los beneficios de exploración continua de ambientes particulares, estas mismas características hacen a este grupo apto para estudios a largo plazo y amplia escala geográfica, (Arellano Peralta & Medrano González 2013).

En México se han registrado 52 especies de mamíferos marinos (Medrano González & Urbán Ramírez 2019) y particularmente en el Golfo de California se han registrado un máximo de 34 especies. En este estudio se registraron 25 especies, 23 cetáceos y dos pinnípedos, lo cual representa el 63% de la diversidad total reportada para el Golfo de California y el 48% de la diversidad total reportada para México (Mangels & Gerrodette 1994; Auriol Gamboa 1993; Urbán Ramírez 1997; Arellano Peralta & Medrano González 2015; García Morales 2017; Medrano González & Urbán Ramírez 2019).

De la diversidad total registrada resaltan tres especies: la ballena jorobada (*M. novaeangliae*) que es una especie migratoria que ocurre en el Pacífico Mexicano durante el invierno y parte de la primavera para reproducirse. Esta especie había sido reportada como

ocasional en el Golfo de California durante el verano por Rice (1974), Urbán & Aguayo (1987) y Gerrodette (1994). En este trabajo la ballena jorobada se registró los cinco veranos de muestreo formando diferentes agrupaciones incluyendo hembras con cría; La segunda especie que resalta es el lobo fino de Guadalupe (*A. p. townsendi*) del cual se observaron pocos individuos en dos veranos uno de los cuales fue 2016 que correspondió a un fuerte evento El Niño (Hernández-Montoya 2009; Gallo-Reynoso & Esperón-Rodríguez 2013; Flores-Hernández 2018; SEMARNAT 2018; Gómez-Toledo 2019; Juárez-Ruíz 2022). Los registros de estas dos especies nos permiten inferir que el Golfo de California es una región lo suficientemente rica en diversidad de ecosistemas y productividad para mantener poblaciones residentes, segmentos poblacionales que son parte de las poblaciones del Océano Pacífico adyacente, e individuos de poblaciones que normalmente son ajenas a este mar pero que con cierta frecuencia se adentran en él. Resalta por último el registro del murciélago pescador de las Islas del Golfo de California (*M. vivesi*) con un solo registro obtenido por observación nocturna entre las Islas Tiburón y Ángel de la Guarda. La clasificación de esta especie cómo rara en este estudio esta sesgada por el esfuerzo de observación en el mar que es siempre diurno y los hábitos de esta especie que son crepusculares y nocturnos.

Durante la realización del presente estudio se actualizó la taxonomía de dos especies registradas. Una fue el delfín común de rostro largo, *Delphinus capensis*, que en la actualidad se reconoce como como *Delphinus delphis bairdii* (Cunha et al. 2015; Committee on Taxonomy SMM 2020). La segunda especie es el lobo fino de Guadalupe, *Arctocephalus townsendi*, que ahora se reconoce como la subespecie *Arctocephalus philippii townsendi* (Higdon 2007; Committee on Taxonomy SMM 2020). Por la estabilidad de la investigación y comparación con estudios regionales previos, decidí que las especies quedaran como se registraron desde el inicio del estudio.

Las especies más comunes (vistas repetidamente a lo largo de los veranos) y con mayor ocurrencia (con más registros por tiempo de observación) fueron *T. truncatus* y *Z. californianus* porque tienen poblaciones residentes y abundantes en el golfo. Los resultados de Moreno-Zúñiga (2008) reportaron como mamíferos marinos con mayor ocurrencia a *B. musculus*, *B. physalus*, *D. delphis* y *P. macrocephalus* durante noviembre de 2005 y enero de 2007. Paniagua-Mendoza (2009) observó como las especies más frecuentes a *B. physalus*, *D. delphis*, *P. macrocephalus*, *T. truncatus* y *G. macrorhynchus* durante julio de 2007.



Salvadeo *et al.* (2009) determinaron como más frecuentes a *G. macrorhynchus*, *K. sima* y *K. breviceps*. Arellano Peralta & Medrano González (2015) reportaron a *T. truncatus*, *D. d. delphis*, *S. attenuata*, *B. physalus* y *Z. californianus* como las especies de mayor ocurrencia. Este trabajo y los que he citado sugieren entonces variación espacio-temporal de la ocurrencia de los mamíferos marinos del Golfo de California.

Se observó una relación en general inversa entre la TSM y la concentración superficial de Chl-a y sorprendentemente, se registró una mayor riqueza y ocurrencia de mamíferos marinos en condiciones de mayor TSM y menor concentración superficial de Chl-a en los veranos de 2012 y 2016, mientras que 2013 y 2017 mostraron mayor concentración superficial de Chl-a así como menor TSM y riqueza y ocurrencia de especies. La variación de especies incluyó variación entre gremios tróficos siendo los planctófagos más diversos en 2013 y 2017 mientras que los teutófagos fueron más diversos en 2012 y 2016. Si un alto valor de TSM y un bajo valor de concentración superficial de Chl-a son indicadores de baja producción marina, entonces la mayor diversidad observada de mamíferos marinos en estas condiciones parece asociada a una mayor dispersión de estos animales en busca de alimento. La ocurrencia total de todas las especies fue aproximadamente constante lo cual sugiere resiliencia del golfo ante la variación ambiental del Océano Pacífico adyacente durante el verano, aunque con aparentes cambios de distribución como esperaba Moreno Zúñiga (2008) al proyectar mayores cambios en la comunidad mastofaunística durante el verano. El 2018 fue diferente al mostrar baja riqueza y alta ocurrencia lo cual posiblemente está asociado al paso previo de un huracán disminuyendo el tiempo disponible de censos a bordo del buque. Esto sugiere que variaciones de la diversidad y distribución de la mastofauna en el Golfo de California pueden ocurrir en periodos de pocos días lo cual deriva aparentemente de las grandes capacidades de dispersión de estos animales.

La curva de acumulación de especies de mamíferos marinos de todos los veranos muestra una separación de tres secciones: la primera es la riqueza del verano 2012; la segunda sección va desde el 2013 hasta el 2015 y, por último, se aprecia una tercera sección que va desde 2016 hasta 2018. Este último incremento de especies registradas parece asociado al fenómeno El Niño observado durante los veranos 2015–2016 (Mirábal-Gómez *et al.* 2018; Ortiz-Ahumada *et al.* 2018; Gómez-Toledo 2019). Las variaciones anuales de riqueza se

deben mayormente a cambios en la frecuencia de las especies más abundantes (*T. truncatus*, *Z. californianus* y *B. physalus*) así como al registro de varias especies raras y poco frecuentes.

Las especies altamente frecuentes (asociación 1) tienen poblaciones residentes ampliamente distribuidas en el golfo y por ello, posiblemente con pocos cambios de distribución en el espacio y tiempo además de tener hábitos más cerca de la superficie lo que las hace más visibles. Las especies teutofágicas frecuentes (asociación 2) tienen poblaciones que podrían ser residentes sólo en un cierto grado como parte de sus amplias poblaciones en el Pacífico adyacente por lo que sus cambios de distribución en el espacio y tiempo podrían ser más evidentes. Las especies tropicales de frecuencia variable (asociación 3) que se ven pocas ocasiones en zonas específicas y que son organismos que entran y salen del golfo con base en la variación ambiental, parecen mostrar cambios de distribución y ocurrencia más marcados (Gendron & Chávez 1996; Jacquet & Gendron 2002; Salvadeo *et al.* 2011; Pardo *et al.* 2013, Arellano-Peralta & Medrano-González 2015; Mate *et al.* 2019; Alfonso Calles 2020). La variación anual y espacial de la diversidad de mamíferos marinos que se manifiesta en la composición de especies y en las heterogeneidades de las curvas de acumulación de riqueza, refuerza la idea de que incluso dentro de una estación, el verano en este caso, la comunidad de los mamíferos marinos del Golfo de California no es un solo conjunto, sino que tiene heterogeneidades las cuales son además dinámicas (Root 1967; Simberloof & Dayan 1991; Koch *et al.* 2019). La clara relación inversa entre la ocurrencia del gremio III (teutófagos) y la ocurrencia conjunta de los gremios I (planctófagos) y II (ictiófagos) permite distinguir dinámicas diferentes de cambio en la distribución de las especies que conforman estos gremios lo cual muy posiblemente deriva de las distintas variaciones entre los ecosistemas de agua superficial, en los que viven los gremios I y II, y los ecosistemas de aguas profundas de los que dependen las especies del gremio III. La relación positiva de los gremios I, II y III con el gremio IV (sarcófagos) parece evidentemente relacionada con su relación trófica la cual es más clara entre el gremio IV y los gremios I y II (Evans y Hammond 2004; Heithaus *et al.* 2008; Kanaji *et al.* 2011; Alves *et al.* 2013; Fruet *et al.* 2015). La DE-TSM como indicador de variabilidad ambiental, estuvo asociada a una mayor ocurrencia y diversidad de mamíferos marinos planctófagos e ictiófagos (2013 y 2018) mientras que una mayor ocurrencia y diversidad de teutófagos ocurrió en condiciones de baja DE-TSM (2012 y 2016). El verano 2017 que fue el segundo con menor TSM y valor medio

de concentración superficial de Chl-*a* fue el que presentó menor diversidad y ocurrencia de mamíferos marinos.

Una tercera restricción a este estudio es que se han analizado relaciones de ocurrencia y diversidad de mamíferos marinos con la variación ambiental con una consideración mínima a la estructura espacial la cual forma parte de la variación biológica y ambiental estudiada. La mayor ocurrencia de mamíferos marinos en este trabajo se registró en la Región de las Grandes Islas en el intervalo de latitud 23°–29° lo cual es igual a lo reportado por Arellano Peralta (2013) y parece obedecer a la gran productividad de la zona. Esta también fue la zona con mayor esfuerzo de muestreo en la presente investigación. Las especies que más se observaron en esta zona consecuentemente fueron mysticetos, delfines y lobos marinos (Adame *et al.* 2020). Los teutófagos fueron más abundantes en zonas pelágicas o con alta profundidad, específicamente en las cuencas de Santa Rosalía, San Pedro Mártir y en el centro del golfo. Los ictiófagos son relativamente abundantes en la Región de las Grandes Islas todo el año, pero la ocurrencia de planctófagos es menor en todo el golfo durante el verano por lo que su distribución en esta estación se ha descrito como más dependiente de la productividad primaria (García-Morales 2017).

## 7. Conclusión

La diversidad observada de mamíferos marinos en este estudio fue diferente entre los cinco veranos de 2012-2018 siendo *Z. californianus*, *T. truncatus*, y *B. physalus* las especies más frecuentes. Se observó una aparente periodicidad tetranual en la que 2012 y 2016 fueron similares teniendo ambos altos promedios de TSM y bajo de concentración superficial de Chl-*a* así como una diversidad mayor de mamíferos marinos. En contraste, los veranos 2013, 2017 y 2018 mostraron valores menores de TSM y mayores de concentración superficial de Chl-*a* así como una baja diversidad de mamíferos marinos.

Los veranos de 2012, 2016 y 2018, que fueron los de menor concentración superficial de Chl-*a* promedio, mostraron baja ocurrencia y mayor diversidad de especies planctófagas (gremio I) mientras que los veranos 2013 y 2017 presentaron más ocurrencia de este gremio. Contrario a los planctófagos, los teutófagos mostraron mayor ocurrencia y diversidad en 2012 y 2016.

Si un alto valor de TSM y un bajo valor de concentración superficial de Chl-a son indicadores de baja producción marina en la zona fótica, entonces la mayor diversidad observada de mamíferos marinos en estas condiciones parece asociada a una mayor dispersión de estos animales por buscar alimento.

La ocurrencia general de todas las especies fue casi constante lo que sugiere resiliencia de la mastofauna marina ante la variación ambiental del Golfo de California y el Océano Pacífico adyacente, pero con cambios en la distribución de las especies.

La mastofauna marina en el Golfo de California se clasifica en tres asociaciones: I) especies abundantes y comunes en el golfo con poblaciones locales, II) especies teutofágicas un poco menos abundantes y comunes en el golfo que forman parte de poblaciones en el Océano Pacífico adyacente, y III) especies tropicales poco abundantes y raras que forman parte de poblaciones en el Océano Pacífico adyacente. *Myotis vivesi* aparece como una especie rara porque sus hábitos nocturnos la hacen difícil de registrar en estudios de cruceros con observación diurna.

Los planctófagos e ictiófagos son los gremios más abundantes y los sarcófagos el menos abundante y diverso. Los teutófagos son el gremio más diverso lo cual indica heterogeneidades ecológicas en las zonas profundas relevantes para los mamíferos marinos.

La diversidad y la ocurrencia de las especies planctófagas e ictiófagas variaron de manera inversa entre sí lo que también sugiere dispersión en condiciones de baja concentración superficial de Chl-a.

La diversidad y la ocurrencia de las especies teutófagas variaron de manera paralela indicando una dinámica diferente de su distribución y abundancia.

La ocurrencia de los planctófagos e ictiófagos en conjunto mostró una relación paralela a la ocurrencia de los sarcófagos, y una relación inversa con los teutófagos lo cual sugiere dinámicas diferentes en las variaciones de los ecosistemas de aguas superficiales de las que dependen los planctófagos, ictiófagos y sarcófagos, y las de aguas profundas de las que dependen los teutófagos.

## 7.1. Comentarios finales

Falta por examinar la estructura de la distribución espacial de la mastofauna marina la cual seguramente contiene mucha de la variación ambiental asociada a los cambios de diversidad y ocurrencia observados en estos animales. Ésta también contiene información sobre los procesos de dispersión invocados para explicar tales cambios biológicos. Los resultados sugieren que habría una regionalización diferente entre los mamíferos asociados a los ecosistemas de superficie y los de aguas profundas, y que asimismo condiciones ambientales cercanas a las preferencias de todas las especies de mamíferos marinos, en un cierto tipo de ecosistema, generarán una mayor regionalización faunística, mientras que condiciones ambientales más alejadas de dichas preferencias, favorecerán la dispersión de estos animales generando una comunidad más homogénea en el espacio y el tiempo. Dado el amplio cambio ambiental del Golfo de California en distintas escalas de tiempo, podría explicarse entonces que la mastofauna marina tenga una estructura dinámica lo cual, en periodos de pocos días o incluso pocos veranos, se debe a la dispersión de estos animales más que a cambios demográficos. Caracterizar la dinámica de estos cambios puede ser de interés para una mejor gestión de actividades humanas como la pesca.

La variación de la diversidad, abundancia y distribución de la mastofauna marina en el Golfo de California, como seguramente la variación de toda su biodiversidad, depende de procesos geológicos, oceanográficos y atmosféricos de gran escala los cuales generan un ambiente continuamente cambiante. Entender esos procesos de cambio ambiental y ecológico en distintas escalas de tiempo y espacio es necesario para una mejor gestión de los recursos que provee el Golfo de California a nuestra sociedad lo que incluye su gobernanza, su sostenibilidad y lo justo de su uso.

Una conservación adecuada de la mastofauna marina del Golfo de California y en general de toda la biodiversidad en la Tierra, reclama a la ciencia para estudiar dicha biodiversidad, los ecosistemas de los que forma parte, y la sociedad humana con la que interactúa. Sin embargo, el rauda desarrollo actual de la tecnología y su alcance a la sociedad deshumaniza a la ciencia y su labor en bien de la vida en muchos aspectos.

Finalmente, me permito subrayar la alienación del conocimiento por el exceso de tecnologización y el abandono de la observación elemental de la naturaleza sobre la que se hizo esta investigación y que hasta ahora al menos no puede ser realizada por máquinas. Pero

aún si las máquinas hubiesen generado la información que yo conseguí observando el mar a lo largo de muchas horas y kilómetros, yo no pude haber percibido ni los análisis hechos ni las conclusiones alcanzadas alienado de la realidad que viví. Yo no hubiese podido entender los datos si no hubiese atestiguado los hechos que los generaron aún si tuve que utilizar binoculares, una cámara fotográfica, un aparato geoposicionador, cuadernos, lápices, sacapuntas y, sobre todo, un barco. Reivindico pues el naturalismo con el que hice esta investigación científica.

*Sabemos que la naturaleza teme a los vacíos*

Persona normal, Benito Taibo (2011)

## 8. Referencias

- Adame, K., Elorriaga-Verplancken, F.R., Beier, E. 2020. The demographic decline of a sea lion population followed multi-decadal sea surface warming. *Sci Rep* 10, 10499 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67534-0>.
- Alfonso Calles, F. B. 2020. Abundancia y distribución espacio-temporal del calderón de aletas cortas (*Globicephala macrorhynchus*) en la región oriental de las Grandes Islas del Golfo de California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). 61 pp.
- Álvarez-Borrego, S. 2008. Oceanografía de la región de las grandes islas. Cap. 2. En: Danemann G, Ezcurra E. (Eds.). Bahía de los Ángeles: Recursos Naturales y Comunidad. Línea base 2007. SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Pronatura Noroeste, A.C. y San Diego Natural History Museum, México, D.F. 45-65.
- Alves, F., Quérrouil, S., Dinis, A., Nicolau, C., Ribeiro, C., Freitas, L., Kaufmann, M., y Fortuna, C. 2013. Population structure of short-finned pilot whales in the oceanic archipelago of Madeira based on photo-identification and genetic analyses: Implications for conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 23(5), 758–776.
- Arellano-Peralta, V. A., Medrano-González, L. 2013. Mamíferos marinos en el Golfo de California. Macroecología, impacto y su perspectiva hacia la conservación. Colección Posgrado 43. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Arellano-Peralta, V. A., Medrano-González, L. 2015. Ecology, conservation and human history of marine mammals in the Gulf of California and Pacific coast of Baja California, Mexico. *Ocean Coastal Manag.* 104, 90-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.12.004>.
- Aurioles-Gamboa D (1993) Biodiversidad y situación actual de los mamíferos marinos en México. *Publ Espec Soc Mex Hist Nat* 397:412–425
- Benavidez-Gómez, T. 2016. Distribución geográfica de la interacción entre los mamíferos marinos del pacífico mexicano con las especies que conforman su dieta y con las pesquerías. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, 104 pp.

- Berta, A., Sumich, J. L., Kovacs, K. M. 2015 Marine mammals: Evolutionary biology. 3a ed. Academic Press. San Diego, CA., 789 pp.
- Bourillón, L., Cantú, A., Eccardi, F., Lira, E., Ramírez, J., Velarde, E., Zavala, A. 1988. Islas del Golfo de California. Secretaría de Gobernación/UNAM, México.
- Calmus, T.; Búrquez, A.; Martínez, A. 2017. El golfo de California: Un océano joven, región megadiversa, vínculo entre tectónica y ecología. Cienc. UANL 2017,85, 59–64.
- Committee on Taxonomy. 2019. List of Marine Mammal Species and Subspecies. Society for Marine Mammalogy. Retrieved May 2020, from <https://www.marinemammalscience.org/speciesinformation/list-marine-mammal-species-subspecies/>
- Cunha, H.A., Loizaga de Castro, R., Secchi, E. R., Crespo, E. A., Lailson-Brito, J. Azevedo, A. F., Lazoski, C., Solé-Cava, A. M. 2015. Molecular and morphological differentiation of common dolphins (*Delphinus* sp.) in the southwestern Atlantic: Testing the two species hypothesis in sympatry. PLoS ONE 10(11), e0140251. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140251>
- De la Lanza Espino, G. (comp). 1991. Oceanografía de mares mexicanos. AGT Editor. México, D. F., 569 pp.
- De la Lanza Espino, G., Gómez Rojas J. C. 2004. Características físicas y químicas del Golfo de México. Pp 105-136. En: Caso M., Pisanty I., Ezcurra E. (comps). Diagnóstico ambiental del Golfo de México. SEMARNAT-INE-IE, A.C. -Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Vol. 1. México, D.F.
- DeMets, C. 1995. A reappraisal of seafloor spreading lineations in the Gulf of California: Implications for the transfer of Baja California to the Pacific plate and estimates of Pacific-North America motion, Geophys. Res. Lett., 22, 3345-3548.
- Evans, P. G. y Hammond, P. S. 2004. Monitoring cetaceans in European waters. Mammal Review, 34(1), 131–156.
- Flores-Hernández, E. O. 2018. Abundancia poblacional y uso de hábitat del lobo fino de Guadalupe (*Arctocephalus philippii townsendi*) en Isla Guadalupe, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.48 PP.



- Fruet, P. F., Daura-Jorge, F. G., Möller, L. M., Genoves, R. C., y Secchi, E. R. 2015. Abundance and demography of bottlenose dolphins inhabiting a subtropical estuary in the Southwestern Atlantic Ocean. *Journal of Mammalogy*, 96(2), 332-343.
- Gallo-Reynoso, J. P., Esperón-Rodríguez, M. 2013. Diet composition of the Guadalupe fur seal (*Arctocephalus townsendi*). Where and what do they eat? *Mar. Freshw. Behav. Physiol.*, 46(6), 455–467.  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10236244.2013.849400>
- García-Fernández, F., Gómez-Gutiérrez, J., De Silva-Dávila, R., Hakspiel-Segura, C., Ambriz-Arreola, I., Martínez-López, A., Sanchez-Uvera, A., Hernández-Rivas, M. & Robinson, C. J. (2023). Interannual response of euphausiid community abundance during the anomalous warming period (2014–2016) in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 212, 102994.
- García-Morales, R. 2008. Análisis de la variabilidad superficial de mesoescala en el Golfo de California y su relación con la distribución y abundancia relativa de misticetos (2005-2006). Maestría en Manejo de Recursos Marinos. Tesis, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, B.C.S., México, xiv, 115 h.
- García-Morales, R., Pérez-Lezama, E.L., Shirasago-Germán, B. 2017. Influence of environmental variability on distribution and relative abundance of baleen whales (suborder Mysticeti) in the Gulf of California. *Mar. Ecol.* e12479.  
<https://doi.org/10.1111/maec.12479>.
- Garrison, T. 2013. *Oceanography: An invitation to marine science*. Eighth edition. Belmont, CA: National Geographic Learning, Brooks/Cole, Cengage Learning. Print.
- Gee, J. H. R., Giller, P. S. (Eds.). 1987. *Organization of communities. Past and Present*. Blackweel Scientific Publications, Oxford. 576 pp.
- Gómez-Gallardo Unzueta, E. A. 2013. Zonas prioritarias para la conservación de las Ballenas en el Golfo de California: Un enfoque ecológico. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, B.C.S. 151 pp.
- Gómez-Toledo, J. A. 2019. Efectos de eventos físicos en la biomasa y producción fitoplanctónicas de la región sur del golfo de California en el siglo XXI. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C, México. 44 pp.

- Haussler, D., O'Brien, S., Ryder, O., Barker, F., Clamp, M., Crawford, A., Hanner, R., Hanotte, O., Johnson, W., Mcguire, J., Miller, W., Murphy, R., Murphy, W., Sheldon, F., Sinervo, B., Venkatesh, B., Wiley, E., Allendorf, F., Amato, G., Turner, S. 2009. Genome 10K: A Proposal to Obtain Whole-Genome Sequence for 10 000 Vertebrate Species. *J. Heredity*. 100, 659–674. [10.1093/jhered/esp086](https://doi.org/10.1093/jhered/esp086).
- Heithaus, M. R., Frid, A., Wirsing, A. J., y Worm, B. 2008. Predicting ecological consequences of marine top predator declines. *Trends in Ecological and Evolution*. 23: 202-210.
- Hernández-Montoya, J. C. 2009. Distribución, abundancia y estructura alimentaria del lobo fino de Guadalupe (*Arctocephalus townsendi*) en Isla Guadalupe, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.107 pp.
- Hidalgo-González, R. M., & Alvarez-Borrego, S. (2004). Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9), 739-752.
- Higdon, J. W., Bininda-Emonds, O. R. P., Beck R. M., Ferguson, S. H. 2007. Phylogeny and divergence of the pinnipeds (Carnivora, Mammalia) assessed using a multigene dataset. *BMC Evol. Biol.* 7, 216. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-7-216>.
- Jaquet, N., Gendron, D. Distribution and relative abundance of sperm whales in relation to key environmental features, squid landings and the distribution of other cetacean species in the Gulf of California, Mexico. *Marine Biology* 141, 591–601 (2002). <https://doi.org/10.1007/s00227-002-0839-0>
- Juárez Ruíz, A. E., 2022. Efecto de la temperatura superficial del mar sobre la producción de crías del lobo fino de Guadalupe y la variabilidad en el uso de su hábitat terrestre. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). 56 pp.
- Kanaji, Y., Okamura, H. y Miyashita, T. 2011. Long-term abundance trends of the northern form of the short-finned pilot whale (*Globicephala macrorhynchus*) along the Pacific coast of Japan. *Marine Mammal Science*, 27(3), 477-492.

- Koch, B. A. E., Castaño-Meneses, G., Delabie, H.C. J. 2019. El concepto de gremio: del feudalismo a la ecología de comunidades. *Acta biol. Colomb.*, 24(2), 224-231. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n2.74726>
- Kuball, C. D. 2007. Diagnosis of the Pacific Decadal Oscillation in global climate models. Thesis Senior. Iowa State University. Ames, I. A. 16 pp.
- Lavín, M. F., Beier, E., Badan, A. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. *Contribuciones a la Oceanografía Física en México, Unión Geofísica Mexicana, Monografía. 3*, 141-171.
- Lluch-Cota, S. E., Aragon Noriega, E. A., Arreguín Sánchez, F., Auriol Gamboa, D., Bautista Romero, J., R. C. Brusca, R. Cervantes Duarte, R. Cortes Altamirano, P. Del Monte Luna, A. Esquivel Herrera, G. Fernandez, M. E. Hendrickx, S. Hernández Vázquez, H. Herrera Cervantes, M. Kahru, M. Lavin, D. Lluch-Belda, D.B. Lluch-Cota, J. López Martínez, S.G. Marione, M.O. Nevarez Martínez, S. Ortega García, E. Palacios Castro, A. Pares Sierra, G. Ponce Díaz, M. Ramírez Rodríguez, C.A. Salinas Zavala, R.A. Schwartzlose, A.P. Sierra-Beltran. 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Prog. Oceanogr.*, 73, 1-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2007.01.013>
- López, M., Candela, J., Argote, M.L. 2006. Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California? *Geophys. Res. Lett.* 33, 1-5.
- Mangels, K. y Gerrodette, T. 1994. Report of cetacean sightings during a marine mammal survey in the eastern Pacific Ocean and the Gulf of California aboard the NOAA ships McArthur and David Starr Jordan July 28 – November 6, 1993. Southwest Fisheries Science Center, La Jolla, California, USA. pp. 88.
- Mate, B., Palacios, D., Follett, T. 2019. Data from: Fin whale movements in the Gulf of California, Mexico, from satellite telemetry. Movebank Data Repository. <https://doi.org/10.5441/001/1.65h5s5p2>
- Marinone, S. G. 2007. Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California? *Geophys. Res. Lett.* 34, 1-6
- Moreno-Zúñiga, J. E. 2008. Caracterización del hábitat de cetáceos comunes en noviembre 2005 y enero 2007 en el Golfo de California. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México. 87 pp.

- Morin, P. J. 2011. *Community ecology*. Chichester, West Sussex Hoboken, NJ: Wiley.
- Ortiz-Ahumada, José Carlos, Álvarez-Borrego, Saúl, & Gómez-Valdés, Jose. 2018. Effects of seasonal and interannual events on satellite-derived phytoplankton biomass and production in the southernmost part of the California Current System during 2003-2016. *Ciencias marinas*, 44(1), 1-20. <https://doi.org/10.7773/cm.v44i1.2743>
- Paniagua-Mendoza, A. 2009. Caracterización del hábitat de cetáceos comunes en el Golfo de California durante julio – agosto 2007. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. La Paz, B.C.S., México. 77 pp.
- Pardo MA, Silverberg N, Gendron D, Beier E, Palacios DM (2013) Role of environmental seasonality in the turnover of a cetacean community in the southwestern Gulf of California. *Mar Ecol Prog Ser* 487:245-260. <https://doi.org/10.3354/meps10217>
- Pardo, M. A., Gerrodette, T., Beier, E., Gendron, D., Forney, K. A., Chivers, S. J. 2015. Inferring cetacean population densities from the absolute dynamic topography of the ocean in a hierarchical Bayesian framework. *PLoS ONE* 10(3), e0120727. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120727>
- Portner, E. J., Benoit-Bird, K. J., Hazen, E. L., Waluk, C. M., Robinson, C. J., Gómez-Gutiérrez, J., & Gilly, W. F. (2022). Decline and recovery of pelagic acoustic backscatter following El Niño events in the Gulf of California, Mexico. *Progress in Oceanography*, 206, 102823.
- Portela, E., Beier, E., Barton, E. D., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., ... & Trasviña, A. (2016). Water masses and circulation in the tropical Pacific off central Mexico and surrounding areas. *Journal of Physical Oceanography*, 46(10), 3069-3081
- Rice, D. W. 1974. Whales and whale research in the eastern North Pacific. pp 170-195. En: Schevill, W. E. (ed). *The whale problem*. Harvard University Press. Cambridge.
- Robles-Tamayo, C. M., Valdez-Holguín, J. E., García-Morales, R., Figueroa-Preciado, G., Herrera-Cervantes, H., López-Martínez, J., Enríquez-Ocaña, L. F. 2018. Sea surface temperature (SST) variability of the eastern coastal zone of the gulf of California. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs10091434>
- Roden, G. I., Groves, G. W. 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.* 13(1), 10-35.

- Roden, G. I., Groves, G. W. 1964. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacif. Sci.*, 12(1), 21-45.
- Roden, G. I., Emilson, I. 1972. Physical oceanography of the Gulf of California. Gulf of California symposium, Universidad Nacional Autónoma de México, Mazatlán, Sin. México. Unpublished.
- Rojas-Bracho, L. 1984. Presencia y distribución del rorcual común, *Balaenoptera physalus* (Linnaeus, 1758) (Cetacea:Balaenopteridae) en el Golfo de California, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 157 pp.
- Root, R. B. 1967 The niche exploitation pattern of the blue-gray gnatcatcher. *Ecol Monogr.*, 37, 317-350. <https://doi.org/10.2307/1942327>.
- Salvadeo, C. J., Gómez Gallardo, A., Lluch-Belda, D., Urban-Ramírez, J. 2009. The Odontocete community and its environmental in the southwestern Gulf of California. *Lat. Am. J. Aquat. Mamm.* 7 (1-2): 23-32.
- Salvadeo, C., Flores-Ramírez, S., Gómez-Gallardo, A., MacLeod, C., Lluch-Belda, D., Jaume-Schinkel, S., & Urbán R, J. (2011). Bryde's whale (*Balaenoptera edeni*) in the southwestern Gulf of California: Relationship with ENSO variability and prey availability. *Ciencias Marinas*, 37(2), 215–225. <https://doi.org/10.7773/cm.v37i2.1840>
- SEMARNAT, 2018. Programa de acción para la conservación de la especie lobo fino de Guadalupe (*Arctocephalus townsendi*), SEMARNAT/CONANP.
- Simberloff, D., Dayan, T. 1991 The guild concept and the structure of ecological communities. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 22, 115-143. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.22.110191.000555>.
- Taibo, B. 2011. *Persona normal*. Ediciones Destino. México, D. F., 248 pp.
- Urbán-Ramírez, J., Aguayo, A. L. 1987. Spatial and seasonal distribution of the humpback whale *Megaptera novaeangliae* in the Mexican Pacific. *Mar. Mamm. Sci.* 29, 333-334. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1987.tb00320.x>
- Urbán RJ, Gómez-Gallardo UA, Palmeros RMA, Velázquez CG (1997) Los mamíferos marinos de la Bahía de La Paz. In: Urbán RJ, Ramírez RM (eds) *La Bahía de La Paz*. UABCS, CICIMAR, SCRIPPS, La Paz, p 201–236
- Ventura-Domínguez, P. D., Gómez-Gutiérrez, J., De Silva-Dávila, R., González-Rodríguez, E., Sánchez-Uvera, A. R., Silveyra-Bustamante, Á. A., Trasviña-Castro, A., Aburto-

Oropeza, O. & Sánchez, C. (2022). Community structure and biomass of larval euphausiids and postlarval mysids in relation to anomalous warming events during a weekly time series (2014–2017) at Cabo Pulmo National Park, Mexico. *Progress in Oceanography*, 208, 102881.

Whittaker, R. H. 1970. *Communities and ecosystems*. Macmillan, New York NY. 162 pp.

Wyrтки, K. 1965. The average annual heat balance of the North Pacific Ocean and its relation to Ocean Circulation. *J. Geophys. Res.* 70(18), 4547-4559, <https://doi.org/10.1029/JZ070i018p04547>.