

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de lo 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 o titular de los Derechos Autor.

CICESE@ 2022. Todos los derechos reservados

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



**Maestría en Ciencias
en Ecología Marina**

**Distribución espacio-temporal del rorcual azul (*Balaenoptera
musculus*) en función del hábitat frente a la costa occidental
de la península de Baja California**

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

Presenta:

Celia Barcenilla Cristóbal

Ensenada, Baja California, México
2022

Tesis defendida por
Celia Barcenilla Cristóbal

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Mario Andrés Pardo Rueda
Director de tesis

Dra. María Clara Arteaga Uribe

Dr. Emilio José Beier

Dra. Diane Gendron Laniel

Dra. Gisela Heckel Dziendzielewski



Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Celia Barcenilla Cristóbal** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Distribución espacio-temporal del rorcual azul (*Balaenoptera musculus*) en función del hábitat frente a la costa occidental de la península de Baja California

Resumen aprobado por:

Dr. Mario Andrés Pardo Rueda
Director de tesis

La península de Baja California (PBC) es una zona importante de alimentación y tránsito a las zonas de crianza para grandes misticetos migratorios como el rorcual azul (*Balaenoptera musculus*), especialmente de febrero a julio. Esta especie se caracteriza por sus altos requerimientos energéticos durante todo el año, por lo que se espera que presente una distribución predecible hacia regiones de afloramiento con alta producción primaria estacional a lo largo de la costa occidental de la PBC. En esta región, se llevaron a cabo 26 prospecciones sistemáticas aéreas y marítimas entre 1994 y 2020, registrando 162 grupos y 243 individuos de rorcual azul, desde la costa hasta 200 km mar adentro, durante las distintas estaciones del año. Se exploraron potenciales variables predictoras del hábitat de la especie, como distancia a la costa, perfil batimétrico, temperatura superficial del mar (TSM) y concentración superficial de clorofila-a, así como sus anomalías espaciales, para construir modelos aditivos generalizados (GAMs) del número de grupos observados, ponderados por el esfuerzo lineal de muestreo (*i.e.*, tasas de encuentro). El mejor modelo incluyó la TSM y el gradiente batimétrico como covariables ambientales, representada como una relación no lineal, incluyendo un componente estacional y efectos aleatorios espaciales. El modelo mostró una alta variabilidad estacional en la distribución espacial del hábitat idóneo. Se evidenció una preferencia de la especie por la zona oceánica al sur de la PBC durante el verano, otoño e invierno; mientras que, en primavera, la especie usa gran parte la costa peninsular. El modelo de hábitat predijo zonas de alta agregación de rorcuales azules que coinciden con las observaciones, lo que destaca la habilidad del modelo para predecir la tasa de encuentro y la preferencia del hábitat de la especie. Estos “puntos calientes” fueron la zona de frentes térmicos próxima a Bahía Magdalena y Cabo San Lucas, Punta Eugenia y a lo largo del frente de Ensenada. Las áreas mencionadas son de vital importancia para la conservación del rorcual azul y deben tenerse en cuenta durante la planeación de la instalación de infraestructura para obtener energía del océano, entre otras actividades humanas.

Palabras clave: Rorcual azul, península de Baja California, efectos de la TSM, modelos de hábitat espacio-temporales, estacionalidad.

Abstract of the thesis presented by **Celia Barcenilla Cristóbal** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Spatio-temporal distribution of the blue whale (*Balaenoptera musculus*) according to the habitat off the western coast of the Baja California peninsula

Abstract approved by:

Dr. Mario Andrés Pardo Rueda
Thesis Director

The Baja California Peninsula (BCP) is an important feeding and transit area for large migratory baleen whales such as the blue whale (*Balaenoptera musculus*), especially from February to July. The species is characterized by its high energy requirements throughout the year, so it is expected to exhibit a predictable distribution towards upwelling regions with highly seasonal primary production along the western coast of the BCP. In this region, 26 systematic aerial and maritime surveys were carried out between 1994 and 2020. We registered 162 groups and 243 individuals of blue whales, from the coast up to 200 km offshore with a seasonal coverage. Several potential predictive variables of the species' habitat were explored as predictors, such as distance from shore, bathymetric profile, sea surface temperature (SST) and sea surface chlorophyll-*a* concentration, as well as their spatial anomalies, to build generalized additive models (GAMs) of the number of groups observed, weighted by the linear effort (*i.e.*, encounter rates). The best model had SST and bathymetry gradient as covariates, represented as a nonlinear environmental relation, including a seasonal component and spatial random effects. Model results indicated a highly seasonality in the spatial distribution of habitat suitability of the species' preference for the oceanic zone south of the BCP during summer, autumn and winter, while, in spring, the species uses a large part of the peninsular coast. The habitat model predicted areas of high blue whale aggregation that matched spatially the observations, highlighting the model's ability to predict encounter rate and habitat preference for the species. These hotspots were the oceanic fronts off Bahía Magdalena and Cabo San Lucas, Punta Eugenia, and along the Ensenada Front. These areas are therefore of vital importance for the conservation of the blue whale, and for upfront planning the installation of infrastructure to obtain energy from the ocean, among other human activities.

Keywords: Blue whale, Baja California peninsula, SST effects, spatial-temporal habitat patterns, seasonality.

Dedicatoria

A mis padres y abuelos, por ser un pilar fundamental en mi vida e impulsarme a realizar mis sueños.

En especial a ti, abuela, por haberme enseñado que para la mujer trabajadora en todas partes es "Jauja".

Agradecimientos

Me gustaría agradecer al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por darme la oportunidad de ser parte de esta institución y brindarme los recursos necesarios para mi formación personal y académica. Además, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme una beca para realizar este posgrado (CVU: 1014414).

Al megaproyecto “Centro Mexicano de Innovación en Energía-Océano” liderado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y financiado por el fondo sectorial CONACYT-Secretaría de Energía.

Al CICESE - Unidad La Paz, por la beca de manutención otorgada para los meses de abril y mayo 2022 del proyecto número 691-100.

A mi director de tesis, el Dr. Mario Pardo, por enseñarme un lenguaje nuevo e introducirme en el mundo de la modelación, por su paciencia y por guiarme sabiamente en esta investigación a distancia.

A los miembros de mi comité. A la Dra. Diane Gendron Laniel del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR- IPN), por su sabiduría con esta especie y por la confianza depositada en mí al brindarme los datos que ha generado con su arduo trabajo de investigación. A la Dra. María Clara Arteaga Uribe y al Dr. Emilio José Beier por sus sabios comentarios y recomendaciones que me ayudaron a enriquecer el presente trabajo. Quiero dar un especial agradecimiento a la Dra. Gisela Heckel Dziendzielewski, por hacer esto posible y confiar en mí desde el principio.

A todos los profesores del posgrado de Ecología Marina, quienes lograron impregnar en mí una parte del formidable conocimiento que poseen.

Al laboratorio de Macroecología Marina. En especial a Rafa, Miguel, Zury y Ariadna, por su ayuda con los códigos y sus valiosos comentarios.

A mis equipos de baloncesto y tochito, a mis compañeros del posgrado y a todos mis amigos de CICESE y UABC, habéis hecho que sea inolvidable.

A mis amigos de España, que siempre han estado al pendiente de mí y mis aventuras por México.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas	x
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Marco conceptual	1
1.2 Características del rorcual azul (<i>Balaenoptera musculus</i> ; Linnaeus, 1758)	3
1.3 Características oceanográficas de la costa occidental de la península de Baja California.....	6
1.4 Antecedentes	8
1.5 Descripción de proyecto	10
1.6 Justificación	11
1.7 Hipótesis.....	12
1.8 Objetivos	12
1.8.1 Objetivo general	12
1.8.2 Objetivos específicos.....	12
Capítulo 2. Metodología.....	13
2.1 Área de estudio	13
2.2 Esfuerzo de muestreo	14
2.2.1 Muestreos marítimos.....	14
2.2.2 Muestreos aéreos.....	15
2.3 Polígono de estudio.....	16
2.4 Variables físicas y biológicas	17
2.5 Procesamiento de datos.....	18
2.5.1 Distribución espacial y temporal de avistamientos y esfuerzo de muestreo	18
2.5.2 Construcción de transectos.....	18
2.5.3 Variables ambientales estáticas	18
2.5.3.1 Distancia a la costa y línea de costa	19
2.5.3.2 Batimetría.....	19

2.5.4	Temperatura superficial del mar (TSM)	20
2.5.5	Concentración de clorofila- <i>a</i> superficial (CHL).....	21
2.5.6	Topografía dinámica absoluta (ADT).....	21
2.5.7	Re-escalamiento de variables.....	22
2.6	Autocorrelación Pearson.....	23
2.7	Modelos aditivos generalizados (GAMs).....	23
2.7.1	Factor de detección.....	24
2.8	Mapas predictivos	25
Capítulo 3.	Resultados	26
3.1	Distribución espacio-temporal.....	28
3.2	Variables ambientales	29
3.2.1	Batimetría y distancia a la costa.....	29
3.2.2	Topografía dinámica absoluta	31
3.2.3	Temperatura superficial del mar.....	31
3.2.4	Anomalía espacial de la concentración superficial de clorofila- <i>a</i>	32
3.3	Análisis de correlación de Pearson.....	33
3.4	Modelos de distribución potencial.....	34
3.5	Mapas predictivos de idoneidad de hábitat.....	35
Capítulo 4.	Discusión.....	38
Capítulo 5.	Conclusiones	44
Literatura citada		45
Anexos.....		54

Lista de figuras

Figura	Página
1 Diagrama que representa los factores influyentes en la distribución geográfica de las especies. G, espacio geográfico; B, representa la región donde se produce la combinación adecuada de especies que interactúan (condiciones bióticas); A, región geográfica favorable para las especies en términos de factores abióticos; M, zona a la que la especie puede acceder por su capacidad de movimiento o dispersión; S, representa el área ocupada por la especie; P, representa el área potencial. Modificado de Soberón y Peterson (2005).	2
2 Ilustración del lado izquierdo de un rorcual azul por Uko Gorter.....	4
3 Mapa del área de estudio en el Océano Pacífico. El polígono de predicciones se observa en color rojo. En color gris los polígonos correspondientes a las zonas norte, de transición y sur, divisiones físico-biológicas de la península de Baja California (Hernández De la Torre et al., 2015).	13
4 Área de estudio en el Océano Pacífico, al oeste de la península de Baja California. En color rojo se muestra el diseño del muestreo aéreo para la búsqueda y localización de rorcual azul.	16
5 Posición geográfica del esfuerzo de muestreo en el área de estudio por años. Las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los puntos a los avistamientos, en color rojo en avión y en color azul en barco.....	26
6 Resumen del esfuerzo de muestreo por estaciones del año (líneas rojas) y avistamientos en barco (rombo) y avioneta (círculo). <i>n</i> representa el número de avistamientos en cada estación.	28
7 Mapa de la magnitud del gradiente batimétrico y distancia a la costa en el área de estudio. En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y las formas amarillas a los avistamientos agrupados por estaciones del año. Las líneas negras indican la distancia a la costa de 50 y 150 km, respectivamente.....	30
8 Mapa estacional de temperatura superficial del mar en un promedio de 15 días desde el último día de muestreo. En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los círculos negros a los avistamientos. El tamaño de los círculos de los avistamientos representa el número de grupos de animales avistados en cada estación.....	32
9 Mapa estacional de la anomalía espacial de la concentración superficial de clorofila- <i>a</i> en un promedio de 15 días desde el último día de muestreo. En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los círculos negros a los avistamientos. El tamaño de los círculos de los avistamientos representa el número de grupos animales avistados en cada estación.	33
10 Predicciones de la distribución espacio-temporal del rorcual azul a partir de la idoneidad de hábitat (escala colorimétrica) frente a la península de Baja California. El mejor modelo usa como predictor los cambios estacionales en la temperatura superficial del mar y el gradiente batimétrico con una estructura espacial específica (ver competencia de modelos en Tabla 4). En negro, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los puntos a los avistamientos. <i>n</i> representa el número de grupos de animales avistados en cada estación.	35

- 11 Predicciones de la distribución espacio-temporal del rorcual azul a partir de la idoneidad de hábitat (escala colorimétrica) frente a la PBC. El mejor modelo utiliza como predictor los cambios estacionales en la temperatura superficial del mar con una estructura espacial específica (ver competencia de modelos en Tabla 4). En negro, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los puntos a los avistamientos. n representa el número de grupos de animales avistados en cada estación. 36
- 12 Histograma de la división del esfuerzo de muestreo en transectos 54
- 13 Matriz de correlación de Pearson entre los grupos de rorcuales azules en cada transecto y las variables oceanográficas probadas. 55
- 14 Mapa estacional de concentración de concentración superficial de clorofila- a . En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los círculos negros a los avistamientos. El tamaño de los círculos de los avistamientos representa el número de grupos de animales avistados en cada estación..... 56
- 15 Mapa estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar. En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los círculos negros a los avistamientos. El tamaño de los círculos de los avistamientos representa el número de grupos de animales avistados en cada estación..... 56

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Variables físico–biológicas utilizadas para identificar su relación con la presencia de rorcual azul en la costa occidental de la península de Baja California.....	17
2 Constantes utilizadas para re-escalar las variables.....	22
3 Información contenida en las bases de datos de CICIMAR-IPN y CICESE.	27
4 Mejores modelos de idoneidad de hábitat para rorcuales azules (<i>Balaenoptera musculus</i>) frente a la península de Baja California, ordenados de menor a mayor según el criterio de información de Akaike (AIC). Se muestra la diferencia de AIC (Δ) entre modelos, el porcentaje de devianza explicada por el modelo (Dev. Exp.), los grados de libertad efectivos del modelo (edf), el estadístico de ajuste (Chi^2) y la significancia del efecto de cada covariante (valor p). Códigos de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1.	34
5 Tabla del esfuerzo de muestreo por año	54
6 Tabla de valores de correlación entre las variables empleadas	55

Capítulo 1. Introducción

Los mamíferos marinos son especies centinelas en los ecosistemas marinos debido a que son depredadores con altos requerimientos energéticos, por lo que pueden ser indicadores ideales para evaluar el efecto de perturbaciones en el ambiente (*e.g.*, actividades antropogénicas; Moore, 2008). Los cetáceos forman el grupo de mamíferos marinos más diverso, agrupa a ballenas, delfines y marsopas. De las 89 especies de cetáceos descritas, 38 se encuentran en México y 26 se localizan en la región occidental de la península de Baja California (PBC) como temporales o residentes (Torres et al., 1995; Committee on Taxonomy, 2021). Ocho de estas 26 especies de cetáceos son misticetos o ballenas, entre ellos el rorcual azul (*Balaenoptera musculus*; Committee on Taxonomy, 2021).

Los cetáceos enfrentan múltiples amenazas, ejemplos de estas en México son: captura incidental (producto de prácticas pesqueras inadecuadas), contaminación de las aguas, colisiones con embarcaciones y actividades turísticas (Medrano y Vázquez, 2012). Todas las especies de cetáceos en México están bajo alguna categoría de riesgo en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010). Por ello, las áreas naturales protegidas (ANP) son una valiosa herramienta para preservar las especies de amplia distribución o migratorias, y sus hábitats (Hays et al., 2019). Sin embargo, la definición de los límites geográficos de las ANPs es un aspecto crítico, ya que se deben tomar en cuenta características dinámicas como corrientes marinas, perfiles batimétricos y zonas de surgencias, entre otras, que describen mejor el hábitat para estas especies (Evans, 2018). Las políticas de conservación para las especies de cetáceos, al igual que para otros grupos de megafauna marina, deben basarse en la identificación de estos hábitats críticos y en la caracterización de la influencia de los cambios ambientales, incluida la incertidumbre asociada a cada proceso (Gerrodette y Eguchi, 2011), de manera que se pueda medir, vigilar y predecir su efecto. Conocer esta información permite delimitar y seleccionar las unidades prioritarias y apropiadas para el manejo y la conservación de sus poblaciones (Clapham et al., 2008; Taylor, 1997).

1.1 Marco conceptual

Uno de los objetivos principales de la ecología de poblaciones es comprender los patrones de distribución geográfica de las especies y sus factores ambientales relacionados (Guisan y Zimmermann, 2000). Se considera nicho ecológico de una especie al conjunto de limitantes que determinan dónde

pueden sobrevivir, reproducirse y mantener sus poblaciones (Hutchinson, 1957; Soberón, 2007). El lugar de vida de un organismo o comunidad donde se manifiestan las propiedades del nicho se conoce como hábitat y está caracterizado por sus factores ambientales (Allaby, 1998). Entonces, para conocer las características del hábitat de una especie podemos asumir que estará presente en un punto dado donde se cumplan tres condiciones: 1) un entorno biótico determinado por la presencia de interacciones entre especies (*e.g.*, competencia o depredación) en las que la especie puede persistir; 2) la presencia de condiciones ambientales (abióticas) en las que la especie puede establecerse, sobrevivir y reproducirse; 3) la especie estará presente solo en una región a la que puede llegar desde áreas de distribución establecidas, donde no existan barreras biogeográficas (Figura 1; Soberon y Peterson, 2005; Peterson et al., 2011).

Por lo tanto, el área donde se cumplen las condiciones 1 y 2, es el área de distribución potencial (P) de la especie, es decir, son aquellos lugares donde las condiciones bióticas y abióticas son adecuadas para que la especie sobreviva, pero donde la especie no ha llegado debido a alguna limitación espacial o temporal (Figura 1)

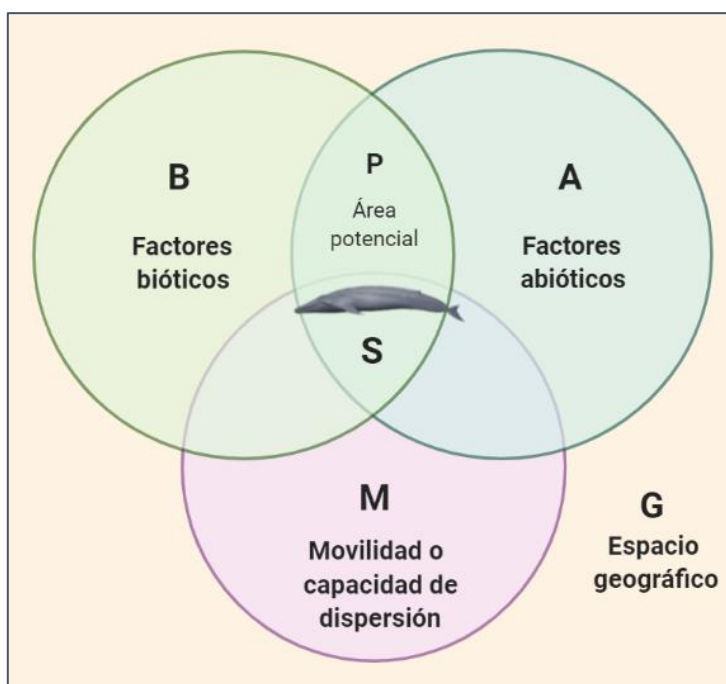


Figura 1. Diagrama que representa los factores influyentes en la distribución geográfica de las especies. G, espacio geográfico; B, representa la región donde se produce la combinación adecuada de especies que interactúan (condiciones bióticas); A, región geográfica favorable para las especies en términos de factores abióticos; M, zona a la que la especie puede acceder por su capacidad de movimiento o dispersión; S, representa el área ocupada por la especie; P, representa el área potencial. Modificado de Soberón y Peterson (2005).

En el ámbito marino, los estudios sobre poblaciones en sistemas pelágicos son escasos, particularmente los de los mamíferos marinos (Croll et al., 2005). Esto se debe principalmente a la dificultad de medir simultáneamente la distribución y la abundancia de los depredadores, los herbívoros, los productores primarios y los factores ambientales en el océano abierto en escalas temporales y espaciales adecuadas, así como la de realizar experimentos en sistemas pelágicos por limitantes logísticas (Croll et al., 2005). En la actualidad, los modelos predictivos son una herramienta útil para tener una primera aproximación de los sistemas naturales. Estos modelos consisten en aplicar diversas herramientas estadísticas, informáticas y geográficas sobre la información biológica disponible para elaborar predicciones razonables que permitan estimar la distribución de las especies de cetáceos (Redfern et al., 2006).

Los modelos de nicho ecológico son herramientas estadísticas que definen la distribución de hábitats adecuados de una especie en función de sus requisitos ecológicos (Peterson et al., 2011). La base es que las observaciones, que son de naturaleza discontinua, se relacionan con características ambientales y/o espaciales (predictores ambientales) de modo que puedan predecir las áreas adecuadas para la especie en lugares no muestreados; por lo tanto, los mapas resultantes son espacialmente continuos, mostrando las regiones donde se espera la mayor agregación (Franklin, 2010). Así, las áreas de alta idoneidad de hábitat se definen como aquellos sitios donde existen condiciones ideales (o favorables) para la subsistencia a largo plazo de una especie (Peterson y Soberón, 2012).

Los cetáceos son un grupo de mamíferos totalmente acuáticos cuyas adaptaciones anatómicas, morfológicas y fisiológicas les han permitido colonizar una amplia variedad de hábitats acuáticos (Katona y Whitehead, 1988). Su distribución generalmente se explica en términos de abundancia de presas, controlada principalmente por condiciones oceanográficas dinámicas (*e.g.*, temperatura superficial del mar [TSM], corrientes marinas y procesos de mesoescala), así como por características fisiográficas (*e.g.*, batimetría; Forcada, 2018; Gaxiola-Castro et al., 2008; Kenney et al., 1997). Dada la naturaleza de los datos de cetáceos, este tipo de modelos nos ayudan a entender mejor los posibles patrones de distribución y las áreas de alta idoneidad de hábitat (Peterson y Soberón, 2012; Redfern et al., 2006).

1.2 Características del rorcual azul (*Balaenoptera musculus*; Linnaeus, 1758)

El rorcual o ballena azul es un misticeto de la familia *Balaenopteridae* (Figura 2). Los misticetos (suborden Mysticeti), son conocidos comúnmente como ballenas barbadas, forman parte de los cetáceos (orden Cetartiodactyla) y se caracterizan principalmente por presentar dos orificios respiratorios y

barbas de queratina, las cuales les sirven para filtrar su alimento (Yochem y Leatherwood, 1985). Comúnmente, esta especie cosmopolita puede ser confundida con el rorcual común o ballena de aleta (*Balaenoptera physalus*), también perteneciente a la familia *Balaenopteridae*, sobre todo a grandes distancias de avistamiento.

Debido a su gran tamaño, hasta 33 m y 190.000 kg de masa corporal (Risting, 1922; Tomilin, 1967), la especie tiene altos requerimientos energéticos todo el año (Branch et al., 2007; Palacios et al., 2011). Se desplazan en un intervalo de velocidad de 2 a 6.5 km h⁻¹ mientras se alimentan, aunque durante las migraciones generalmente se desplazan a velocidades mayores, de 5 a 33 km h⁻¹ y son capaces de alcanzar los 48 km h⁻¹ en caso de amenaza (Slijper, 1962; Lockyer, 1981). A pesar de que los soplos y patrones de buceo varían con el nivel de actividad (Leatherwood et al., 1982), éstos también varían según la región y el período (Calambokidis et al., 2007). Estas características del rorcual azul, aunadas a su distribución geográfica amplia, la cual comprende ambientes pelágicos de aguas profundas y costeras sobre la plataforma continental, y a sus movimientos migratorios estacionales, aumentan la dificultad de muestreo de esta especie (Wade y Friedrichsen, 1979; Gendron, 2002).



Figura 2. Ilustración del lado izquierdo de un rorcual azul por Uko Gorter.

El rorcual azul, como la mayoría de los mamíferos marinos, se alimenta de agregaciones de presas densas distribuidas de forma irregular (Gaskin, 1982; Croll et al., 2005). Entre sus presas más frecuentes se encuentra el krill (orden Euphausiacea), las cuales suelen localizarse en zonas de surgencias o de alta productividad (Sears y Perrin, 2018). Los movimientos de esta especie están relacionados con la distribución y abundancia de sus presas, debido a los altos requerimientos energéticos de más de 2 t d⁻¹ (Nemoto, 1957; Branch et al., 2007). Para satisfacer esta demanda energética, el rorcual azul necesita alimentarse durante su migración invernal al sur, a diferencia de lo que ocurre con otras ballenas de hábitos migratorios (Rice, 1978; Yochem y Leatherwood, 1985; Barlow et al., 2008). Los rorcuales azules

se observan comúnmente solos o en parejas. Sin embargo, se pueden encontrar concentraciones de 50 o más individuos en áreas de alta productividad y en conjunto con ballenas de aleta (Sears y Perrin, 2018).

El rorcual azul en el Pacífico norte se distribuye desde Kamchatka en Rusia hasta el sur de Japón y desde el Golfo de Alaska y California hacia el sur, al menos hasta Costa Rica en el Pacífico nororiental (Wade y Friedrichsen, 1979; Sears y Perrin, 2018). Los rorcuales azules se agregan comúnmente en el golfo de Alaska, las Islas Canal, ambos lados de la PBC y en el domo de Costa Rica (Reilly y Thayer, 1990). Los rorcuales azules del Pacífico norte, incluyendo la costa occidental de la PBC, fueron cazados en sus áreas actuales de distribución hasta 1986, cuando la Comisión Ballenera Internacional logró establecer un acuerdo para proteger a la especie y prohibir su captura (Tønnessen y Johnsen, 1982; International Whaling Commission, 1988). Estas operaciones balleneras permitieron detectar patrones de migración en la especie e indicaron que el efecto de esta actividad ocasionó una reducción del número de animales pero no produjo cambios en su distribución (Gendron, 2002; Guerrero et al., 2006). Se ha estimado que antes de la explotación había entre 4,900 y 6,000 individuos en el Pacífico norte, y entre 1,400 y 1,900 individuos al momento de su prohibición (Rice, 1974; Gambell, 1976). No obstante, los años posteriores a su prohibición, las poblaciones no mostraron un incremento sustancial de su abundancia en distintas áreas de distribución. Esto podría relacionarse con la competencia con otras especies de rorcuales, pinnípedos y aves marinas que ocuparon dicho nicho ecológico dejado por el rorcual azul cuando sus poblaciones disminuyeron (Pauly et al., 1998). Actualmente, la población de rorcuales azules en el Pacífico nororiental se considera una de las más saludables del mundo (Calambokidis et al., 2009a; Monnahan et al., 2015; Sears et al., 2013).

En el presente, el rorcual azul se encuentra en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) bajo el estatus “en peligro de extinción” desde 2018 (Cooke, 2018) y está incluida en el Apéndice I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, por sus siglas en inglés), por lo que su comercio solo está autorizado bajo circunstancias excepcionales. En México, esta especie se encuentra sujeta a protección especial en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010).

1.3 Características oceanográficas de la costa occidental de la península de Baja California

El Pacífico nororiental es una importante zona de reproducción, alimentación y tránsito para grandes misticetos migratorios (*e.g.*, rorcual azul, ballena gris, rorcual jorobado). Este ecosistema es uno de los más productivos a nivel global (Fiedler et al., 2013) y está influenciado por el sistema de la corriente de California, una ramificación del gran giro subtropical oriental del Pacífico norte que se extiende desde cientos a más de 1,000 km por las costas norteamericanas hasta la PBC (Badan, 1997). El SCC está compuesto por: la corriente de California (CC), una corriente amplia, principalmente hacia el sur, cercana a la superficie; la contracorriente de California, una corriente más profunda hacia el polo en el ascenso continental; y una variedad de patrones de corrientes estacionales cercanas a la costa como la corriente de Davidson o el remolino del sur de California (Etnoyer et al., 2004). El límite sur del SCC se encuentra alrededor de 28° N, la latitud de Punta Eugenia, y se extiende hasta Baja California Sur (Durazo et al., 2010). En esta zona, el SCC presenta muchas de las características típicas de un sistema de circulación de frontera oriental y es considerada una zona de transición (Roden, 1971). El sistema de la corriente de California representa una confluencia de diferentes masas de agua que se originan en el Pacífico oriental subártico, subtropical y tropical (Bograd et al., 2019). Las fronteras entre estas masas de agua cambian de posición en escalas temporales muy diversas, desde semanales hasta decadales (Durazo et al., 2010; Arellano y Rivas, 2019). Presenta alternancia entre el dominio subártico durante invierno y primavera, cuando ocurren principalmente las surgencias costeras, y tropical-subtropical durante verano y otoño. Estas surgencias son forzadas por el esfuerzo del viento y por la circulación de remolinos de mesoescala (Fiedler et al., 2013).

La alta variabilidad estacional e interanual de los procesos oceanográficos y físicos en el área, se determina por la orografía del continente (Bakun y Nelson, 1991; Pérez-Brunius et al., 2007), por un alejamiento del flujo principal de la CC en verano y otoño de la plataforma continental (Lynn y Simpson, 1987) y por el debilitamiento (verano) e intensificación (primavera, en particular, abril y mayo) de los vientos predominantes del noroeste. El viento paralelo a la costa origina surgencias costeras y éstas son una característica oceanográfica principal de la zona costera en la región occidental de la PBC (Hernández De la Torre et al., 2015). Estos procesos establecen las condiciones que modulan la diversidad biológica y la variabilidad química en la región (Bograd y Lynn, 2003; Gaxiola-Castro et al., 2008; Durazo, 2009; Durazo et al., 2010), favoreciendo la mezcla vertical y la existencia de estructuras de mesoescala (Durazo et al., 2010). La importancia de estas estructuras ciclónicas de menor tamaño radica

en que pueden proporcionar un mecanismo físico por medio del cual el agua recién emergida, rica en nutrientes, se mantiene en la zona eufótica y favorece la supervivencia, el transporte y la agrupación de presas de bajo nivel trófico, como el krill del cual se alimenta el rorcual azul (Fiedler et al., 1998; Pauly, et al., 1998; Gaxiola-Castro et al., 2010; Barlow et al., 2020).

En la costa occidental de la PBC, las aguas emergen aproximadamente a 50 km de la costa llevando hacia la superficie agua fría, rica en nutrientes y pobre en oxígeno disuelto (Parés-Sierra et al., 1997; Durazo et al., 2010; Auad et al., 2011). La intensidad de las surgencias crece a lo largo de la costa peninsular hacia el norte. Sin embargo, los índices de surgencias varían en esta región en un intervalo bastante amplio dependiendo de las condiciones de viento, topografía del fondo y a veces de la influencia de la CC (Zuria-Jordan et al., 1995). Estas surgencias se asocian con una mayor presencia de agregaciones de eufáusidos; siendo más abundante la especie *Nyctiphanes simplex*, que es el principal alimento de los rorcuales azules que migran a este lugar (Sears, 1987; Gendron, 1992). Se sugiere que las agregaciones de *N. simplex* se encuentran por encima de los 150 m de profundidad (De Silva-Dávila y Palomares-García, 1998; Gómez-Gutiérrez et al., 2010) y que pueden estar influenciadas por la batimetría del área donde se distribuyen (Croll et al., 2005).

La alta productividad primaria del borde oriental del Pacífico norte está relacionada con procesos de surgencias que aportan aguas frías y ricas en nutrientes y bajas concentraciones de clorofila cerca de la costa e inclinan la nutriclina hacia la zona eufótica (Gaxiola-Castro et al., 2010). Consecuentemente, el patrón espacio-temporal de la productividad primaria en el Pacífico norte es similar al de la TSM. La TSM incide directamente en procesos enzimáticos del fitoplancton e indirectamente en la formación de gradientes verticales en la columna de agua, aislando zonas someras y profundas con disponibilidad de nutrientes para los organismos (Mann y Lazier, 2006). Los patrones de variabilidad espacio-temporal de la TSM en la PBC permiten una regionalización de la capa epipelágica en norte, centro y sur (Hernández De la Torre et al., 2015).

En la zona norte prevalece durante todo el año el dominio de aguas con temperaturas frías (de 10 a 14.9 °C) y aportes casi constantes de aguas oligotróficas del Pacífico central, excepto en primavera, que es una zona mesotrófica (Hernández De la Torre et al., 2015). Está delimitada al norte por la línea internacional entre las costas de México y Estados Unidos de América (32°32' N - 117°07' O) y forma parte del límite austral de la zona de transición entre la planicie costera y el talud continental de California. Es una zona de relevancia ecológica debido a los procesos de advección de las corrientes, los giros oceánicos, y al enriquecimiento superficial intermitente proveniente de las surgencias estacionales

de Punta Baja y del frente de Ensenada (Aquad et al., 2011). La zona centro de la PBC es un espacio de transición entre las otras dos subzonas, desde Punta Eugenia (27°50' N - 115°07' O) hasta Bahía Magdalena (24°47' N - 112°18' O; Hernández De la Torre et al., 2015). Se caracteriza por pasar de productividad mesotrófica en invierno a eutrófica en primavera; es oligotrófica en otoño (Hernández De la Torre et al., 2015). En esta zona confluyen regularmente giros y frentes térmicos, con movimientos ciclónicos y anticiclónicos (Durazo y Gaxiola-Castro, 2010; Kurczyn et al., 2012). Ello sugiere que la región se puede dividir en zonas dinámicamente distintas y, por tanto, con respuestas diferentes a los procesos físicos. En Punta Eugenia, a diferencia de otras zonas de afloramiento a lo largo de la península, la concentración de fitoplancton y zooplancton, es relativamente alta a lo largo del ciclo estacional, debido a la existencia de procesos de retención (giros oceánicos) complementarios a los de enriquecimiento estacional (Gaxiola-Castro et al., 2010). La zona sur de la PBC se ubica al oeste de Bahía Magdalena hasta Cabo San Lucas (22°52' N - 109°53' O; Hernández De la Torre et al., 2015). Es una zona de grandes giros y se caracteriza por la predominancia de la influencia ecuatorial (Gaxiola-Castro et al., 2010). Esta zona está fuertemente influenciada por la formación de frentes térmicos con un patrón estacional marcado, por lo que ha sido llamada el sistema frontal de Baja California (Etnoyer et al., 2004). En primavera y verano es mesotrófica, oligotrófica durante el otoño y mesotrófica en invierno (Hernández De la Torre et al., 2015). La zona de Bahía Magdalena se caracteriza por su alta productividad, la cual favorece la presencia de recursos pesqueros como camarón y pelágicos menores (Hernández et al., 2004; Morales-Zarate et al., 2011).

1.4 Antecedentes

Los rorcuales azules del Pacífico nororiental observados entre Alaska y México pertenecen a la misma población (Bailey et al., 2009; Calambokidis et al., 2009). Su distribución en México abarca la costa occidental de la PBC y el golfo de California (Rice, 1974; Yochem y Leatherwood, 1985; Gendron, 2002). Las aguas de la PBC son consideradas una zona de crianza, alimentación y probablemente área de reproducción para el rorcual azul (Gendron, 2002). En invierno-primavera se localizan en latitudes más bajas, especialmente en el golfo de California y el domo de Costa Rica, donde migran para reproducirse y alimentarse (Calambokidis et al., 2009). Durante el verano-otoño se localizan en latitudes medias, como las costas de California, donde se alimentan de enjambres densos de eufáusidos en aguas frías y bien mezcladas debido a las surgencias costeras (Schoenherr, 1991; Fiedler et al., 1998; Forney y Barlow, 1998; Calambokidis et al., 2009).

La bahía de Loreto, en el golfo de California, es un área donde se agregan rorcuales azules de manera particular y se observan regularmente madres con crías desde diciembre hasta marzo, por lo que se le considera un área importante de crianza de la especie (Leatherwood et al., 1988; Gendron, 2002; Ugalde de la Cruz, 2015). Su migración fuera del golfo de California en primavera coincide con el incremento de la productividad frente a la costa occidental de la PBC en primavera-verano (Gendron, 2002). Se ha observado que en invierno los rorcuales generalmente siguen una ruta directa durante su migración hacia el sur; aunque durante la migración hacia el norte, regularmente hacen paradas prolongadas frente a la costa central y norte de la PBC, dejando sus zonas de invernación en marzo y abril, pero llegan a las aguas de California hasta junio (Bailey et al., 2009). Esto supone que la especie también utiliza otras áreas transitorias de alimentación como el sistema frontal de Baja California, principalmente entre febrero y julio, aunque puede ser vista en todas las estaciones del año con una distribución variable (Scammon, 1874; Rice, 1974; Leatherwood et al., 1988; Gendron, 2002; Etnoyer et al., 2006). La distribución del rorcual azul frente a la costa occidental de la PBC comprende ambientes neríticos y oceánicos (Gendron, 2002). Los rorcuales que migran hacia el norte en primavera, aparentemente se encuentran más alejados de la costa que los rorcuales que migran al sur en otoño, en posible respuesta a las diferencias estacionales en la distribución de sus presas (Nemoto, 1959, 1970).

Los rorcuales azules tienden a agregarse en sus zonas de alimentación (Croll et al., 2005). La distribución de estas zonas de alimentación en la costa occidental de la PBC se define por la atracción de la especie hacia zonas de altas densidades de krill, distribuidas de forma irregular y a profundidades discretas en la columna de agua, coincidiendo con las rupturas topográficas de la plataforma continental en las que se agregan (Croll et al., 2005). Estas zonas están sostenidas por regiones de afloramiento con alta producción primaria estacional impulsada por el viento en el SCC (Croll et al., 2005; Fiedler et al., 1998). Sin embargo, el momento, la duración y la intensidad de estos afloramientos varía a lo largo del año (Bograd et al., 2009). Esto supone también alta variabilidad en la principal presa del rorcual azul, el krill, dependientes de estos núcleos de surgencia (Mangel et al., 2002).

La población de rorcuales azules del Pacífico nororiental ha sido estudiada mediante distintas técnicas, como detecciones acústicas, muestreos de distancia en transectos lineales y marcaje-recaptura por foto-identificación, en diferentes partes de su distribución (*e.g.*, Stafford et al., 1999; Calambokidis y Barlow, 2004). Sin embargo, se conoce poco sobre sus movimientos a menor escala y su distribución frente a la PBC. Al norte del sistema de la corriente de California, también se han usado marcas satelitales para describir patrones de movimiento (*e.g.*, Bailey et al., 2009; Irvine et al., 2014) y bases de datos de avistamientos, junto con variables oceanográficas, para predecir la distribución potencial basada en el

hábitat (*e.g.*, Forney et al., 2012; Pardo et al., 2015). Sin embargo, los datos de seguimiento satelital suelen muestrear una pequeña porción de la población, lo que limita la inferencia del hábitat potencial para toda la población. Cada uno de estos enfoques tiene ventajas particulares, ya que los datos de los muestreos proporcionan instantáneas de la abundancia de rorcual azul, pero solo para los años y temporadas muestreados. A pesar de estudios previos de esta especie para conocer su distribución en el Pacífico nororiental, no se obtuvieron las primeras predicciones de hábitat mediante modelos aditivos generalizados (GAMs) hasta 2017 (Hazen et al., 2017). Estos modelos fueron capaces de capturar las características de uso del hábitat de los rorcuales azules y proporcionar estimaciones de densidad durante todo el año para esta especie en California, superando así las limitaciones previas de áreas no muestreadas. Estos autores mostraron que los rorcuales azules usaban un hábitat más costero que se caracteriza por presentar una alta rugosidad batimétrica y temperaturas superficiales de 20 a 30 °C en verano. Por otro lado, hubo una preferencia por zonas oceánicas, de baja rugosidad batimétrica, temperaturas más cálidas y concentraciones de clorofila-*a* superficial más altas en invierno. Sin embargo, a pesar de que estas características concuerdan con las previamente descritas frente a la PBC, estos modelos no se extendieron hasta el hábitat del rorcual azul en el Pacífico nororiental, dejando un vacío de conocimiento en otra etapa de su migración.

1.5 Descripción de proyecto

La preocupación por el acelerado cambio climático global ha llevado a un creciente interés en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para la generación de energía con fuentes renovables en ecosistemas marinos y costeros donde habitan especies clave de mamíferos marinos como el rorcual azul. El presente trabajo forma parte del subproyecto “Efectos regionales sobre la distribución y abundancia de mamíferos marinos debido a la instalación de plantas productoras de energías alternativas en el océano” cuya responsable es la Dra. Gisela Heckel Dziendzielewski, del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California. Éste forma parte de la línea transversal “Ecología e Integración al Ambiente” englobado en el megaproyecto “Centro Mexicano de Innovación en Energía-Océano” liderado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM; financiado por el fondo sectorial CONACYT-Secretaría de Energía.

Este subproyecto tiene como objetivo principal evaluar la diversidad, distribución y abundancia de cetáceos y pinnípedos en los mares de México, donde exista un potencial interés en la instalación de plantas productoras de energías alternativas. Por ello, en este trabajo, se evaluará la distribución

espacio-temporal del rorcual azul en función del hábitat en la costa occidental de la PBC, que corresponde a la parte sur del sistema de la corriente de California, antes de la puesta en marcha de los diferentes proyectos de generación de energía. Estos estudios coadyuvarán a la definición de zonas para la instalación, evitando interferir con las especies de la zona y dará la línea base con la cual comparar cuando se instalen los dispositivos y se pongan en operación.

1.6 Justificación

Los mysticetos son indicadores de la salud de los ecosistemas, ya que son especies clave en el mantenimiento y productividad de los océanos. Cumplen funciones tan importantes como proporcionar nutrientes que alimentan la red trófica marina a través de sus excrementos o contribuir al ciclo del carbono oceánico. Este rol está influyendo actualmente en los argumentos científicos y económicos de los gobiernos para justificar medidas para proteger a las ballenas en un momento en que aumentan los llamados a reanudar su caza. Una de las regiones con mayor número de mamíferos marinos en México es la región occidental de la PBC (Heckel et al., 2018). Actualmente esta región, importante zona de reproducción, alimentación y tránsito para grandes mysticetos, carece de estudios de monitoreo de cetáceos a largo plazo. Estos estudios son necesarios para obtener información confiable para estimar de manera robusta su abundancia y distribución. Investigaciones recientes han obtenido aproximaciones a los requerimientos espaciales y temporales del hábitat del rorcual azul en las aguas de California, Oregon y Washington (Hazen et al., 2017). A pesar de ello, en la PBC no existe información sobre la abundancia poblacional del rorcual azul, las características de su hábitat y del uso de éste durante una etapa intermedia de su migración. Esta información es necesaria e indispensable para complementar la caracterización del hábitat local y regional, y poder detectar qué factores influyen en la agregación del rorcual azul en la costa occidental de la PBC y así entender un poco más sobre los requerimientos de esta peculiar especie. Este conocimiento puede ayudar para el diseño de estrategias de manejo en las ANP donde se agrega (Reserva de la Biósfera El Vizcaíno y Área de Protección de Flora y Fauna Cabo San Lucas), al ecoturismo (estableciendo un periodo y zonas de observación reguladas) y a plantear futuras estrategias para su conservación ante actividades antropogénicas (*e.g.*, regulación más eficiente del tránsito marítimo). Es importante, que en cualquier proyecto productivo (*i.e.*, CEMIE-Océano) se contemple la alteración del hábitat marino y se haga un análisis de la diversidad, distribución y abundancia de rorcuales migratorios en la región geográfica de interés.

1.7 Hipótesis

Debido a la necesidad de obtener alimento durante su migración, el rorcual azul tiene una distribución predecible a partir de regiones destacadas por su baja temperatura superficial del mar a escala estacional en el sur del sistema de la corriente de California.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo general

Inferir la distribución espacio-temporal del rorcual azul en la costa occidental de la PBC, mediante la construcción de modelos estadísticos que describan la relación de la presencia de la especie con las características oceanográficas del hábitat.

1.8.2 Objetivos específicos

- Identificar las variables ambientales que determinan la distribución potencial de la especie en la costa occidental de la PBC.
- Estimar las tasas de encuentro de rorcuales azules frente a la PBC.
- Predecir la distribución potencial y elaborar los mapas de distribución potencial del rorcual azul en la costa occidental de la PBC.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Área de estudio

El área que comprende este trabajo es la costa occidental de la PBC, localizada en el Pacífico nororiental (Figura 3). Esta región se corresponde con la zona 1 de las cuatro regiones biogeográficas marinas en las que se dividen las aguas patrimoniales de México con base en sus características oceanográficas (corrientes marinas, geomorfología, batimetría, climas y productividad) y su litoral tiene una longitud aproximada de 1,250 km (De la Lanza-Espino, 1991). Esta región se encuentra delimitada en su parte norte por la línea fronteriza internacional de México con los Estados Unidos de América a la altura de la ciudad de Tijuana, Baja California ($32^{\circ} 30' N$ y $118^{\circ} 24' O$) y se extiende por toda la costa occidental de la PBC, dentro del mar patrimonial, hasta Cabo San Lucas, Baja California Sur ($22^{\circ} 48' N$ y $110^{\circ} 00' O$).

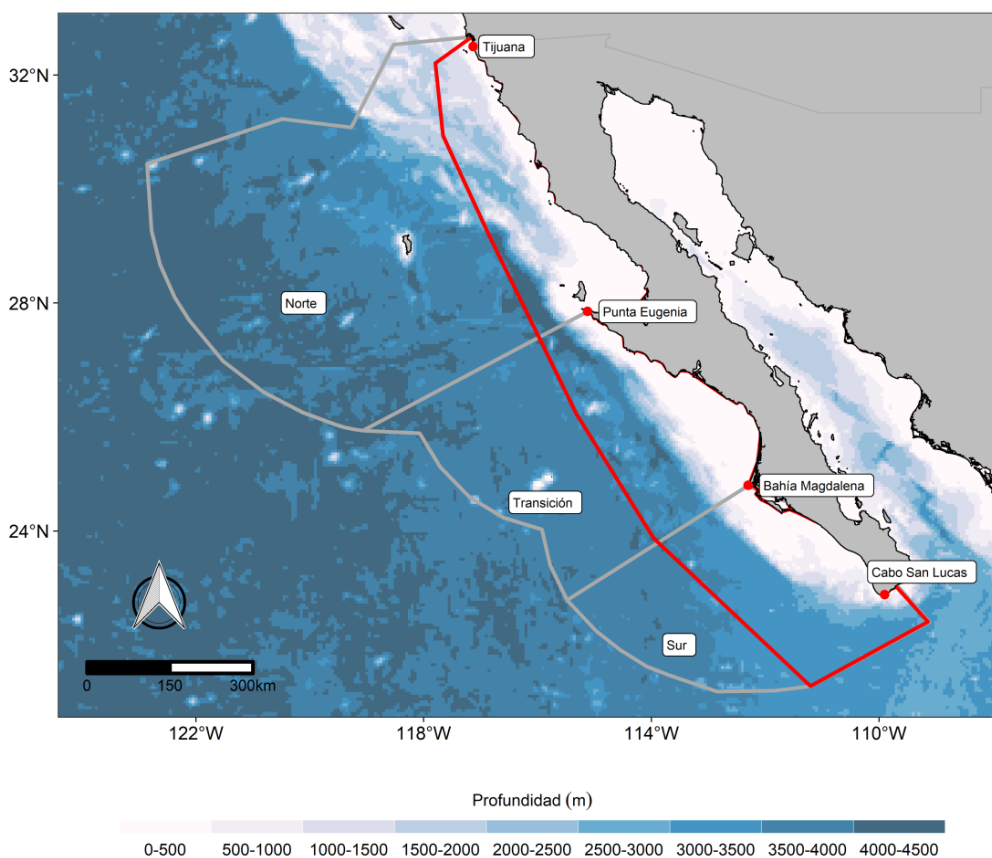


Figura 3. Mapa del área de estudio en el Océano Pacífico. El polígono de predicciones se observa en color rojo. En color gris los polígonos correspondientes a las zonas norte, de transición y sur, divisiones físico-biológicas de la península de Baja California (Hernández De la Torre et al., 2015).

2.2 Esfuerzo de muestreo

Es difícil obtener estimaciones confiables de la distribución espacio-temporal de cetáceos, debido a que los rangos de distribución son generalmente amplios y escasamente conocidos, así como y también debido al escaso tiempo que estos organismos pasan en la superficie, lo que dificulta su avistamiento. La información utilizada en este trabajo acerca de la distribución del rorcual azul incluye registros de muestreos sistemáticos aéreos y marítimos (1994 - 2020) en la costa occidental de la PBC, desde la costa hasta 200 km mar adentro, con la finalidad de construir una base de datos de esfuerzo de muestreo y de avistamientos. La base de datos incluye información recopilada por dos instituciones, CICIMAR-IPN entre 1994 y 2005, y CICESE desde el año 2017 hasta el 2020. Por parte de CICIMAR-IPN, se llevaron a cabo diez muestreos marítimos y siete muestreos aéreos (Gendron, 2002). Por parte de CICESE se realizaron nueve muestreos aéreos. Todos estos monitoreos siguieron transectos predefinidos y se describen a continuación.

2.2.1 Muestreos marítimos

Las dos campañas a bordo del buque oceanográfico "El Puma" de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), descritas en Gendron (2002), se llevaron a cabo del 28 de enero al 13 de febrero y del 3 al 20 de junio de 1994. Estas prospecciones se iniciaron en los 32°N y finalizaron en los 21°N (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La velocidad de búsqueda del buque se mantuvo a 18 km h⁻¹ (10 nudos). Tres observadores buscaban cetáceos simultáneamente desde una plataforma de observación a 16.5 m por encima del nivel del mar: observadores a babor y estribor escudriñaban el área desde la proa hasta 90° a sus respectivos lados, usando binoculares Fujinon 7 x 50 con retícula y compás integrados, mientras que un tercer observador, en el centro, observaba el área cercana a la nave a simple vista y registraba toda la información. Cada posición duraba 40 minutos y siete observadores se rotaban entre los tres puestos. La búsqueda fue continua desde el amanecer hasta el anochecer, siempre y cuando las condiciones fueran óptimas, es decir, buena visibilidad y una escala de Beaufort del estado del mar de tres o menos.

En marzo de 1994 se llevó a cabo un muestreo desde la lancha de CICIMAR en la parte sur de la PBC, desde Bahía Magdalena a Cabo San Lucas. En 1996, durante los cuatro cruceros a bordo de varios buques de la Armada de México, descritos en Gendron (2002), siete observadores se iban rotando en tres

posiciones. Escudriñaron el mar a lo largo de los transectos desde una plataforma de observación a 11-16 m por encima de la superficie del mar, con binoculares Fujinon 7 x 50. Durante el esfuerzo de búsqueda de cetáceos, los buques mantuvieron una velocidad aproximada de 10 nudos (18.5 km h^{-1}). La prospección por mar usada en este estudio se basó en la red de estaciones oceanográficas CalCOFI, a la cual se añadieron algunas estaciones de muestreo costero. La serie de líneas no fueron escogidas al azar, sino que corresponden a las rutas entre las estaciones de muestreo. En 1997, se realizaron prospecciones no sistemáticas en el área costera próxima a Bahía Magdalena a bordo de lanchas de 7 m de eslora con motor fuera de borda y desde una lancha de 9 m de eslora, con motor diésel (CICIMAR XV). En 1998 y 2005 se realizaron dos muestreos en el barco turístico “Don José” de 22 m de eslora en la zona sur de la PBC.

2.2.2 Muestreos aéreos

Los siete muestreos aéreos de 1994 a 1996 se hicieron a bordo de un avión monomotor Cessna 182 (Gendron, 2002). Estos comprendieron un arreglo de líneas rectas que se extendieron en *zig-zag* en toda el área de estudio, hasta 25-30 km de la costa de la PBC hacia afuera. La búsqueda de cetáceos fue realizada por dos observadores (piloto y copiloto), y un observador independiente, ubicados en la parte de atrás de la aeronave. Se utilizaron binoculares para confirmar la especie observada. La velocidad de vuelo en los transectos fue de 100 km h^{-1} , a una altura entre los 260 y los 300 m y con condición de mar entre 0 y 4 en la escala Beaufort. En febrero de 2017 se realizó un muestreo focalizado en el golfo de Ulloa. Luego, entre noviembre 2017 y febrero 2020 se llevaron a cabo ocho muestreos desde la frontera internacional Tijuana-San Diego ($32^{\circ} 31' 47'' \text{ N}$, $117^{\circ} 08' 25'' \text{ O}$) hasta Cabo San Lucas, Baja California Sur ($22^{\circ} 53' 23'' \text{ N}$, $109^{\circ} 54' 56'' \text{ O}$) y hasta 50 km al oeste de la costa, durante las distintas estaciones del año (Tabla 3; Figura 4). La aeronave voló a ~ 300 m de altitud y una velocidad de $\sim 180 \text{ km h}^{-1}$ mientras se trazaban transectos tipo *zig-zag* (Barlow y Forney, 2007). Durante el muestreo dos observadores en los asientos traseros, uno a cada lado de la línea de transecto, buscaron constantemente con y sin ayuda de binoculares Fujinon 7 x 50, a ambos lados de la línea de transecto. Se registraron en el mismo formato todos los datos de los avistamientos y el esfuerzo de búsqueda. Una vez avistado un grupo de cetáceos, se tomó la localización geográfica con un GPS, se suspendió el esfuerzo de búsqueda para hacer un acercamiento y confirmar la identificación y tamaño de grupo de la especie, únicamente cuando esto no implicaba grandes desviaciones del transecto. El tamaño de grupo se estimó por acuerdo de todos los observadores (Barlow y Forney, 2007).

Este estudio utilizó datos observacionales no invasivos. Durante la etapa de colecta de datos no hubo daños de ningún tipo a la especie de estudio. La aeronave no se aproximó a los animales a menos de 200 metros de altura.

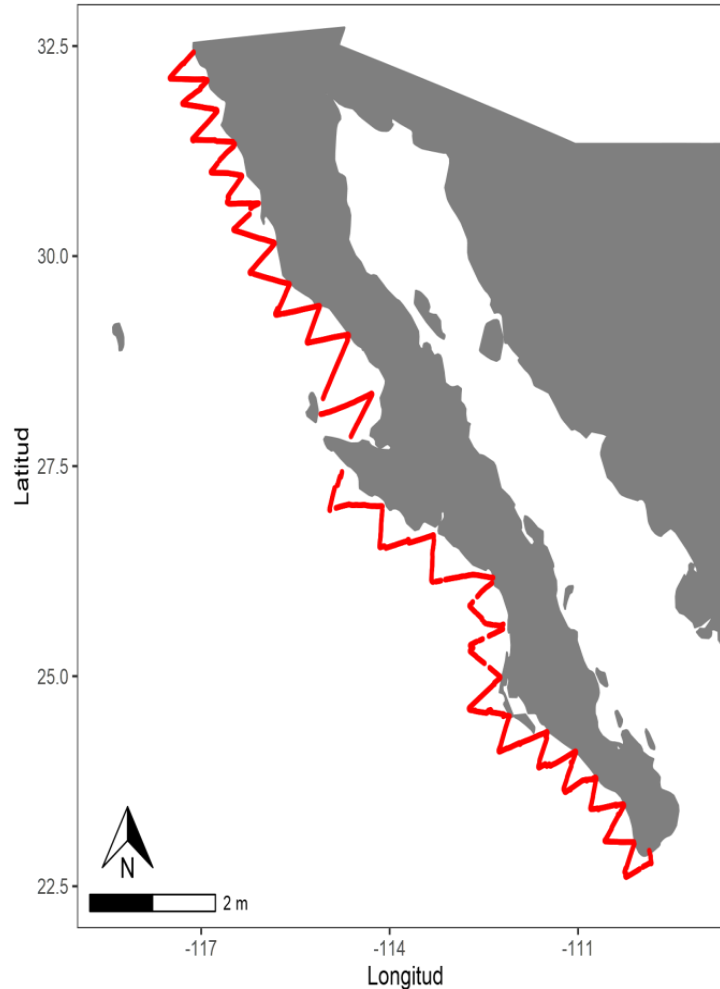


Figura 4. Área de estudio en el Océano Pacífico, al oeste de la península de Baja California. En color rojo se muestra el diseño del muestreo aéreo para la búsqueda y localización de rorcual azul.

2.3 Polígono de estudio

A partir de los gráficos de esfuerzo de muestreo totales y con la ayuda del programa Google Earth Pro, se creó el polígono del área de estudio en formato “.kml” (Google, 2020). El polígono, delimita todos los transectos a lo largo de la costa de la PBC, dentro del mar patrimonial. Para su delimitación se eliminaron las lagunas costeras que se encuentran en la península. El polígono está compuesto por 77 coordenadas. Su punto más norteño en la PBC fue $32^{\circ} 40' N$ y $118^{\circ} 08' W$, mientras que su punto más al sur es $21^{\circ} 16'$

N y 111° 12' W, dejando un margen homogéneo de separación a los transectos. Contó con un perímetro de 3,492 km y un área de 263,802 km².

2.4 Variables físicas y biológicas

Para este trabajo se seleccionaron nueve covariables ambientales como predictores potenciales del hábitat del rorcual azul y por ende, de su distribución, con base en el conocimiento previo sobre los factores ambientales que suelen influir en la distribución de cetáceos (*e.g.*, Praca et al., 2009; Fernandez et al., 2018). Para ello, se utilizaron datos de variables oceanográficas provenientes de sensores remotos, los cuales proporcionan datos rápidos que abarcan grandes regiones oceánicas y han permitido estudiar de manera eficaz las variaciones de la capa superficial del océano a través del espacio-tiempo (Muller-Karger et al., 1991; Santamaría-del-Angel et al., 1994).

Como covariables ambientales predictoras del hábitat se exploró la temperatura superficial del mar (TSM) y su anomalía espacial (TSM_{anom}), concentración superficial de clorofila-*a* (CHL) y su anomalía espacial (CHL_{anom}) y topografía dinámica absoluta (ADT). Además, estas variables se combinaron por separado con variables estáticas como: distancia a la costa (DC) y batimetría, incluyendo profundidad (P) y gradiente batimétrico (GB). Estas covariables se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables físico-biológicas utilizadas para identificar su relación con la presencia de rorcual azul en la costa occidental de la península de Baja California.

Variable	Unidades	Resolución espacio-temporal	Fuente y/o sensor	Año
TSM	°C	0.05°; ~4 km ² ; diaria	NOAA, AVHRR Pathfinder	1994 - 2021
TSM _{anom}	°C	0.05°; ~4 km ² ; diaria	NOAA, AVHRR Pathfinder	1994 - 2021
CHL	mg m ⁻³	0.045°; 4 km ² ; promedio 8 días	NASA, AQUA-MODIS	2002 - 2021
CHL _{anom}	mg m ⁻³	0.045°; 4 km ² ; promedio 8 días	NASA, AQUA-MODIS	2002 - 2021
ADT	m	0.25°; diaria	CMEMS	1994 - 2021
P	m	0.05°	University of California	-
DC	m	0.05°	NOAA	-
GB	m	0.05°	NOAA ERDDAP	-

2.5 Procesamiento de datos

2.5.1 Distribución espacial y temporal de avistamientos y esfuerzo de muestreo

Los datos obtenidos en el campo y anotados en formatos se capturaron en una base de datos en Microsoft Excel. Las variables con las que cuenta la base de datos son: tipo de plataforma, número de campaña oceanográfica a la que corresponde el muestreo, longitud, latitud, año, mes, día, día del año, estación del año, día juliano, institución a la que pertenece la base, altura de la plataforma de avistamiento, nombre de la plataforma y el estado del mar en la escala Beaufort durante el muestreo. La distancia recorrida durante cada día y la estructura espacial del esfuerzo lineal se obtuvo de las coordenadas GPS registradas automáticamente cada 15 segundos. La estación del año se agregó como una variable categórica de cuatro niveles (invierno, primavera, verano y otoño). Fueron considerados como invierno los meses de diciembre, enero y febrero; primavera los meses de marzo, abril y mayo; verano corresponde a los meses de junio, julio y agosto; y otoño a los meses de septiembre, octubre y noviembre. Se siguió este criterio con el fin de poder comparar nuestros resultados con las trayectorias y comportamiento de animales marcados satelitalmente, reportados por Bailey *et al.* (2009).

2.5.2 Construcción de transectos

Se dividió el esfuerzo de muestreo en transectos de longitudes similares (5-6 km), a partir de las coordenadas geográficas registradas por el GPS, descartando aquellos tramos en los que no hubo observación activa por diversas razones como mal tiempo, vuelo sobre tierra, finalización del recorrido, acercamiento a avistamientos para confirmar identidad y tamaño de grupo, etc. Luego, se asignó la información de avistamiento de rorcuales azules a cada transecto. Esto incluyó el número de grupos registrados y el total de animales por transecto.

2.5.3 Variables ambientales estáticas

Con el fin de conocer los valores más próximos en espacio y tiempo de las variables ambientales estáticas (*i.e.*, distancia a la costa y batimetría) al punto medio en cada transecto, se procedió a obtener

sus valores en el área de estudio y a empatar sus coordenadas al valor más cercano a cada transecto. Posteriormente, se realizó un mapa de cada variable ambiental para describir su variación espacio-temporal. Estas variables fueron procesadas con una resolución espacial de 0.05°.

2.5.3.1 Distancia a la costa y línea de costa

Los datos de distancia a la costa en alta resolución se obtuvieron de la base “*Coastlines, borders, and rivers*”, incluidos en “*A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database*” (GSHHS, por sus siglas en inglés; <http://www.soest.hawaii.edu/pwessel/gshhg/>), con una resolución de 1 km, última versión 15 de junio de 2017 (Wessel y Smith, 1996).

La mínima distancia a la costa de cada transecto se estimó con el paquete *geosphere* para R (Hijmans, 2021). Se utilizó el polígono del área de estudio previamente mencionado (Apartado 2.3). Los datos se procesaron a una resolución de 0.05°. Este cálculo de distancia mínima a la costa supuso un tiempo de procesamiento alto debido a la gran precisión de los cálculos, que proporcionaron resultados de alta resolución.

2.5.3.2 Batimetría

La profundidad del mar se obtuvo de la base de datos *Global Predicted Bathymetry V11.1*, del proyecto *Satellite Geodesy* de *Scripps Institution of Oceanography, University of California* (Smith y Sandwell, 1997; ftp://topex.ucsd.edu/pub/global_topo_1min/). Los datos descargados fueron del archivo “*topo_20.1.nc*”, mediante el programa *FilleZilla FTP Client* (versión 3.55.1). Con estos datos se obtuvo la información de la profundidad del mar más próxima a cada transecto, con una resolución de 0.05°, utilizando el software RStudio. Las unidades de esta variable se manejaron en metros. Se eliminaron los valores positivos y posteriormente se invirtieron los negativos para obtener profundidades positivas. La variable profundidad es una variable de tres dimensiones: latitud, longitud y profundidad.

El conjunto de datos de magnitud del gradiente de profundidad del fondo marino se obtuvo del *Estimated Seafloor Depth Gradients: srtm30plus*, proveído gratuitamente por el programa ERDDAP de NOAA (NOAA, 2022; https://oceanview.pfeg.noaa.gov/products/seafloor_gradient/downloads). Los datos fueron descargados en formato “.nc” y procesados a una resolución de 0.05°. Los archivos binarios en formato *Network Common Data Form* (NetCDF, por sus siglas en inglés), fueron procesados a través del paquete “netCDF4” mediante el software R para la lectura de la variable.

2.5.4 Temperatura superficial del mar (TSM)

Para este trabajo, se descargaron los datos de TSM correspondientes al proyecto AVHRR Pathfinder, versión 5.3 (PFV53), producidos por NOAA, National Center for Environmental Information (Saha et al., 2018; <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/files/nceiPH53sst1day/>). Estos datos son una recopilación de valores de TSM con una resolución de 0.05° (aproximadamente 4 km), dos veces al día (día y noche), con nivel 3 de procesamiento. Los archivos diarios pertenecientes a la noche fueron descargados desde 1994 hasta 2021. La descarga de datos se realizó mediante el programa FilleZilla FTP Client (versión 3.55.1).

Los archivos binarios en formato NetCDF fueron procesados a través del software Rstudio. A los valores extraídos de la variable se aplicaron dos correcciones de datos. Estos son los indicadores de calidad generales de la variable y se utilizan para todas las TSM de GHRSSST. La primera corrección fue el nivel de calidad del pixel de TSM. El rango es de 0 a 5, siendo 5 la mejor. Se escogieron los valores iguales o superiores a 4 (calidad aceptable). El segundo filtro de calidad fue el nivel de calidad Pathfinder, con un rango de 0 a 7, siendo 7 la mejor. Se seleccionaron los valores iguales o superiores a 4 (calidad aceptable).

Para conocer los valores de TSM más próximos en tiempo y espacio a cada transecto, se empataron las coordenadas de éstos a los datos previamente descargados. A partir de los valores diarios, se obtuvo un valor promedio para cada punto de transecto. Para ello, se promedió el valor del último día de muestreo y los 15 días previos al muestreo más cercanos a cada punto del transecto. Esto se realizó para mejorar la precisión del modelo. Los datos de TSM se empataron a una resolución de 0.1°. Para calcular la TSM_{anom} se utilizaron los valores más próximos de la TSM a los transectos en latitud y longitud, previamente

calculados, y se les restó el valor de la TSM promedio del polígono del área de estudio para ese día de muestreo.

2.5.5 Concentración de clorofila-*a* superficial (CHL)

La CHL es un producto satelital obtenido de imágenes de satélite del sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS, por sus siglas en inglés) o espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada, con información generada por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, por sus siglas en inglés), disponible del año 2002 hasta la actualidad. Los datos se descargaron en archivos diarios y en composiciones de ocho días de la página web *NASA Ocean Color* (NASA, 2020; https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/directaccess/MODIS-Aqua/Mapped/8Day/4km/chlor_a/). Estos archivos comprendieron del 1 de enero de 2005 hasta el 31 de noviembre de 2020. Para esta variable, se utilizó el nivel 3 de procesamiento de los datos, con tamaño de pixel de 4x4 km en formato NetCDF. La concentración de clorofila-*a* superficial está expresada en mg m^{-3} .

En el momento de empatar la CHL en tiempo y espacio al transecto más cercano, primero se probó a hacer el promedio de 8 y 15 días a partir de los archivos diarios mediante el programa Rstudio. El resultado arrojaba mayor porcentaje de datos faltantes (aprox. 10%) que el obtenido con las composiciones previamente promediadas de 8 días (aprox. 3%). Este procedimiento se llevó a cabo con una resolución de 0.05°. Por ello, para el procesamiento de la variable se utilizaron las composiciones promediadas de 8 días. A los valores extraídos de la variable se les aplicó la función logaritmo con el fin de normalizar los datos de la variable. Se mantuvieron los datos correspondientes únicamente al polígono del área de estudio, y los datos mayores a $\log(4)$ y menores a $\log(0.01)$. Para calcular la CHL_{anom} se utilizaron los valores previamente calculados y se les restó la media de los valores del polígono del área de estudio para ese día de muestreo.

2.5.6 Topografía dinámica absoluta (ADT)

A diferencia de otras variables de detección remota, el ADT proporciona información sobre la estructura de toda la columna de agua y también se mide de forma rutinaria con alta resolución espacio-temporal

por altímetros satelitales con cobertura global uniforme. El conjunto de datos de la variable ADT descargados fue el producto “SEALEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047” (E.U. Copernicus Marine Service Information, 2022; https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/DATA-ACCESS). Los datos, producidos por *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), se descargaron en formato NetCDF (CF1.6.). Estos datos se corresponden con “GLOBAL OCEAN GRIDDED L4 SEA SURFACE HEIGHTS AND DERIVED VARIABLES REPROCESSED (1993-ONGOING)”. Las medias diarias de ADT se descargaron a una resolución espacial de celdas de $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ y resolución temporal de 1 día. Los datos descargados abarcan el período del 1 de enero de 1994 hasta el 31 de mayo de 2020.

Una vez descargados los valores de ADT con una resolución mínima de 0.25° (menor resolución que el resto de variables), se empataron a la base de datos de los transectos en tiempo y espacio. Los datos de avistamientos y esfuerzos de muestreo se cuadrícularon en celdas del mismo tamaño que la resolución espacial de ADT.

2.5.7 Re-escalamiento de variables

Previo a introducir las variables al modelo, éstas se re-escalaron con el fin de obtener unidades pequeñas alrededor de cero. Para ello se restó la media a cada valor y el resultado se dividió por la desviación estándar (Tabla 2).

Tabla 2. Constantes utilizadas para re-escalar las variables.

Variable	Media (μ)	Desviación estándar (σ)
Gradiente batimétrico	0.005	0.005
Profundidad	787.007	981.538
Distancia a la costa	32.737	31.214
TSM	19.839	3.767
TSM_{anom}	-0.513	2.489
CHL	-0.661	0.761
CHL_{anom}	0.682	0.684
ADT	0.638	0.049

2.6 Autocorrelación Pearson

Al realizar modelos de hábitat es importante evitar que las variables ambientales que podrían estar altamente correlacionadas sean incluidas durante la modelación (Dormann et al., 2013). Para ello, se evaluó la colinealidad entre las variables ambientales mediante la construcción de una matriz de correlación de Pearson (Anexo B). Las matrices fueron generadas a partir de los valores obtenidos de las distintas variables de interés a la misma resolución (0.05°). Los valores de correlación se pueden localizar entre -1 y 1. Cuando el coeficiente de correlación de Pearson entre dos variables fue mayor a 0.7 (positivo o negativo) una de ellas no fue considerada en la construcción de los GAMs (Dormann et al., 2013). Se utilizó el lenguaje R, bajo Rstudio, para los análisis estadísticos (R Core Team, 2020).

2.7 Modelos aditivos generalizados (GAMs)

Los modelos aditivos generalizados o GAMs (Hastie y Tibshirani, 1986, 1990) son una técnica flexible y fluida que captura las no linealidades en los datos y nos ayuda a ajustar modelos no lineales. Los GAMs tienen la siguiente estructura:

$$y \sim s(x) \quad (1)$$

En este trabajo, como primera aproximación analítica, se infirió la distribución espacio-temporal a partir de las variables ambientales a diferentes escalas de tiempo y espacio y se ajustaron GAMs del número de grupos de rorcuales azules observados con una verosimilitud binomial negativa y un link logarítmico, además del esfuerzo de muestreo (*i.e.*, tasas de encuentro), en función de varias covariables ambientales a diferentes escalas de tiempo y espacio.

Se probaron modelos con la estructura general:

$$g(\mu_i) = A_i \theta + f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}) + f_3(x_{3i}) + \dots + offset(d_4) \quad (2)$$

Donde $\mu_i \equiv \mathbb{E}(Y_i)$ y $Y_i \sim BN(\mu_i, \phi)$. Y_i es la variable respuesta, en este trabajo corresponde al número de grupos de rorcual azul por transecto, $EF(\mu_i, \phi)$ denota una distribución binomial negativa con media μ_i y un parámetro de escala ϕ , A_i es una fila de la matriz del modelo para cualquier componente del

modelo estrictamente paramétrico, θ es el vector de parámetros correspondiente y el f_j son funciones suaves de las covariables x_k . Para la implementación de GAMs se utilizó se usó la función “gam” y el paquete “mgcv” en el programa estadístico R (Wood, 2011). El método de ajuste de la función “gam” fue “REML, Laplace approximate REML”, que puede adaptarse a modelos con efectos aleatorios gaussianos, utilizando la probabilidad restringida o de perfil aproximada de Laplace. Las funciones base (“k”) se restringieron a $k = 4$ para evitar el sobreajuste.

Se usó el Criterio de Información de Akaike (AIC) para determinar el modelo más parsimonioso entre un conjunto de modelos (Akaike, 1973). Como covariables se probaron: TSM, TSM_{anom}, CHL, CHL_{anom} y ADT. Además, se combinaron por separado con variables estáticas como: distancia a la costa y batimetría, incluyendo profundidad y gradiente batimétrico. El efecto aleatorio de la estación se especificó agregando el término $s(estación)$ a la función suavizada de la covariable de interés del modelo.

2.7.1 Factor de detección

Para generar modelos que describieran la relación de la cantidad de grupos de rorcual azul con las características del hábitat fue necesario unificar los muestreos. Para resolver las diferencias entre la detectabilidad promedio de la especie a partir de un muestreo con esfuerzo aéreo y uno con esfuerzo marítimo, se multiplicó el número de grupos por un factor de detección (Marsh y Sinclair, 1989; Barlow, 2015). Se utilizó $g_0 = 0.6$ como factor de detección del esfuerzo aéreo y $g_0 = 0.9$ del marítimo. Este factor de detección se utilizó en el cálculo de coeficiente conocido para mejorar el ajuste. Este coeficiente d se agregó como predictor lineal $offset(d)$ al modelo. Se aplicó la siguiente ecuación para calcular el coeficiente para mejorar el ajuste:

$$d = \frac{\sum B}{\sum L} * \frac{1}{g_0 * L_i} \quad (3)$$

Dónde:

B = número de grupos de rorcual azul por transecto

L = Longitud de la línea de transecto completada

g_0 = Probabilidad de detectar un grupo directamente sobre la línea del transecto

2.8 Mapas predictivos

Para obtener las predicciones del mejor modelo, se proyectaron a todos los valores estacionales y mensuales de las variables en el polígono de estudio. Para los valores de las variables TSM y TSM_{anom} se usó un promedio de 15 días previos a cada muestreo, a una resolución espacial de 0.05°, para los muestreos de los años: 1994, 1996, 1997, 1998, 2005, 2017, 2018, 2019 y 2020. Los 15 días representativos de cada estación se corresponden con la primera quincena del mes intermedio de esa estación. Como días representativos del invierno se consideraron del 1 al 15 de enero; primavera del 1 al 15 de abril; verano del 1 al 15 de julio; y otoño del 1 al 15 de octubre, ambos inclusive. Así, se obtuvo una tabla de valores representativos de cada estación del año. Para obtener los valores mensuales se utilizaron los valores de todos los días del mes de los años de muestreo a una resolución espacial de 0.05°. En el caso de la CHL y CHL_{anom} se empataron promedios de 8 días a una resolución espacial de 0.05°. Los datos de los días seleccionados no pertenecen a todos los años donde hubo esfuerzo de muestreo por la ausencia de una base de datos previa a 2002. Los años utilizados fueron: 2005, 2017, 2018, 2019 y 2020. También se obtuvieron todos los posibles valores para las variables ambientales estáticas en el polígono de estudio a una resolución de 0.05°.

Para tener en cuenta el sesgo introducido por transectos de longitudes diferentes, el esfuerzo se incorporó como una variable de balance (d), es decir, una parte conocida de la media de la variable de respuesta:

$$d = \frac{\sum B}{\sum L} \quad (4)$$

Dónde:

B = número de grupos de rorcual azul por transecto

L = Longitud de la línea de transecto completada

Una vez obtenidas las predicciones de los modelos, sus valores se reescalaron en un intervalo de [0-1], como índice de la idoneidad de hábitat para la especie. Posteriormente se graficaron las predicciones obtenidas para el mejor modelo mediante el programa Rstudio (R Core Team, 2020).

Capítulo 3. Resultados

Se realizaron 26 muestreos entre los años 1994 y 2020 (Figura 5; Tabla 3). El esfuerzo de muestreo total fue de 36,175.14 km, correspondiente a 45,500 puntos del GPS. Debido a la heterogeneidad en la base de datos del esfuerzo de muestreo en cada campaña, las distancias entre los puntos del GPS fueron divididas en transectos. Se obtuvieron 5,910 transectos, 1,466 en barco y 4,444 en avioneta (Anexo A). El transecto más pequeño fue de 0.8 km y el más largo de 14.9 km, resultando la mayoría en una longitud aproximada de 5-6 km. El año en que se realizó menor esfuerzo de muestreo fue 2005 con un total de 103.34 km, en 17 transectos. El año con mayor esfuerzo fue 2018, con un total de 9,589.68 km recorridos en 1,632 transectos. Al comparar las cuatro estaciones del año, se observó que la estación con mayor esfuerzo de muestreo fue primavera con un total de 13,516.357 km, en 2,189 transectos. La estación con menor esfuerzo fue verano con un total de 3,999.87 km recorridos, en 624 transectos (Figura 6).

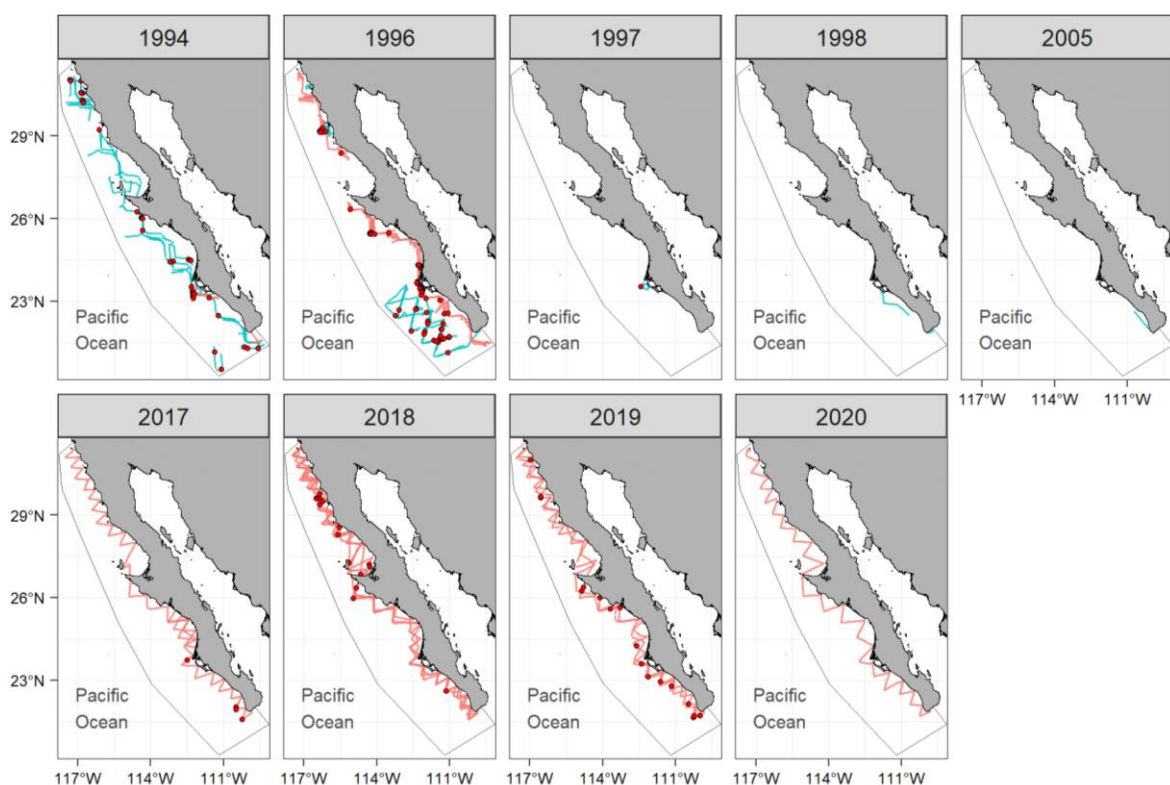


Figura 5. Posición geográfica del esfuerzo de muestreo en el área de estudio por años. Las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los puntos a los avistamientos, en color rojo en avión y en color azul en barco.

Durante el esfuerzo de muestreo fueron registrados 243 rorcuales azules en 162 avistamientos, tanto en zonas costeras como oceánicas (fuera de la plataforma continental; Tabla 3; Figura 6). Los animales se registraron en 121 transectos, con hasta cinco grupos de animales en un mismo transecto. Se registraron

un promedio de dos animales por avistamiento, siendo 12 rorcuales azules el tamaño grupal máximo observado en un avistamiento en la región central de la PBC durante la primavera de 2019. En promedio se registraron 0.05 grupos de animales por kilómetro de esfuerzo.

Tabla 3. Información contenida en las bases de datos de CICIMAR-IPN y CICESE.

Nº	Fuente	Plataforma	Periodo de muestreo	Estación	Nº individuos	Nº de grupos
1	CICIMAR-IPN	Barco	28 ene.-13 feb. 1994	Invierno	9	8
2	CICIMAR-IPN	Avioneta	22-24 mzo. 1994	Primavera	2	1
3	CICIMAR-IPN	Barco	24 mzo. 1994	Primavera	0	0
4	CICIMAR-IPN	Barco	3-20 jun. 1994	Verano	54	35
5	CICIMAR-IPN	Avioneta	17-21 oct. 1994	Otoño	0	0
6	CICIMAR-IPN	Avioneta	15-20 feb. 1996	Invierno	0	0
7	CICIMAR-IPN	Avioneta	25-30 mzo. 1996	Primavera	30	19
8	CICIMAR-IPN	Barco	2-12 abr. 1996	Primavera	30	20
9	CICIMAR-IPN	Avioneta	25 abr. 1996	Primavera	0	0
10	CICIMAR-IPN	Avioneta	27 mayo-2 jun. 1996	Primavera / verano	18	10
11	CICIMAR-IPN	Barco	5-14 jun. 1996	Verano	12	6
12	CICIMAR-IPN	Avioneta	15-16 jun. 1996	Verano	0	0
13	CICIMAR-IPN	Barco	2-5 ago.1996	Verano	21	19
14	CICIMAR-IPN	Barco	2-9 oct. 1996	Otoño	9	7
15	CICIMAR-IPN	Barco	6 mayo 1997	Primavera	5	1
16	CICIMAR-IPN	Barco	31 ene.-1 feb. 1998	Invierno	0	0
17	CICIMAR-IPN	Barco	16-17 feb. 2005	Invierno	0	0
18	CICESE	Avioneta	9 feb. 2017	Invierno	0	0
19	CICESE	Avioneta	7-11 nov. 2017	Otoño	5	4
20	CICESE	Avioneta	26 feb.-3 mzo. 2018	Invierno / primavera	4	3
21	CICESE	Avioneta	23-24 mayo 2018	Primavera	4	4
22	CICESE	Avioneta	21-27 ago. 2018	Verano	4	4
23	CICESE	Avioneta	6-9 nov. 2018	Otoño	4	4
24	CICESE	Avioneta	1-4 abr. 2019	Primavera	31	16
25	CICESE	Avioneta	16-22 oct. 2019	Otoño	1	1
26	CICESE	Avioneta	4-8 feb. 2020	Invierno	0	0

3.1 Distribución espacio-temporal

En la Figura 6, se observa el patrón estacional en los avistamientos. En primavera y verano se obtuvieron el mayor número de avistamientos, 119 y 94 avistamientos, respectivamente. Estos avistamientos están distribuidos a lo largo de toda la península. En invierno ($n = 11$) los avistamientos muestran animales en la zona sur principalmente, aunque también se aprecian en la parte norte. Mientras que, en otoño, no hay observaciones en la parte norte de la península y predominan en la parte sur y en algunas zonas de la parte media. Las estaciones con menor número de avistamientos fueron invierno ($n = 11$) y otoño ($n = 19$). El esfuerzo de muestreo no es homogéneo en todas las estaciones, es mayor en primavera. Sin embargo, a pesar de tener menor esfuerzo en verano que en primavera, se registró un número elevado de avistamientos.

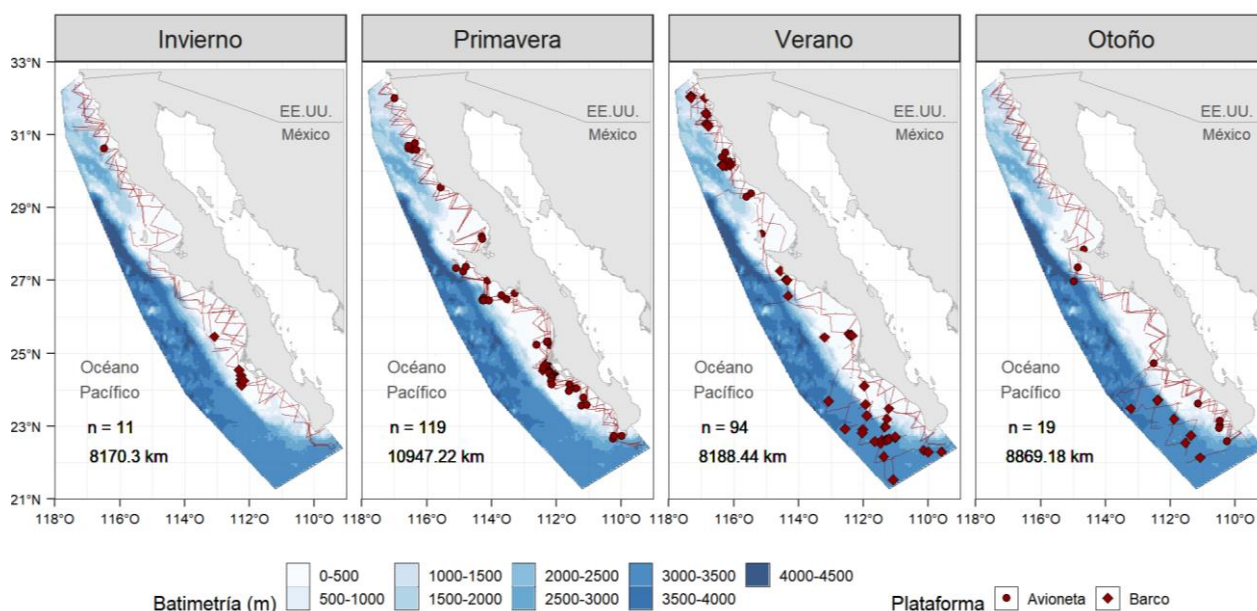


Figura 6. Resumen del esfuerzo de muestreo por estaciones del año (líneas rojas) y avistamientos en barco (rombo) y avioneta (círculo). n representa el número de avistamientos en cada estación.

Los avistamientos a partir de observaciones en barco son previos a 2005, mientras que los realizados en avión son en su mayoría posteriores a 2017 (Figura 5). Los avistamientos en invierno parecen concentrarse frente a la costa de Bahía Magdalena. En otoño continúa la tendencia de localizarse en la mitad sur de la PBC, mientras que en primavera y verano se observaron a lo largo de toda la costa de la PBC (Figura 6).

3.2 Variables ambientales

3.2.1 Batimetría y distancia a la costa

Los rorcuales fueron avistados en aguas someras (< 500 m) y profundas (> 1500 m) a lo largo de toda la península (Figura 6). En invierno y primavera no hubo esfuerzo de muestreo en aguas profundas; sin embargo, en verano y otoño sí. En los valores de profundidad se observa que el esfuerzo de muestreo se realizó en un intervalo de 0.24 m, el transecto más somero registrado (31° 14' N, 116° 23' O), a 4,087 m, el más profundo en la zona oceánica centro de la PBC (27° 2' N, 114 56' O). El avistamiento más somero tuvo lugar en aguas con una profundidad máxima de 14.20 m en verano también en la zona central de la península (28° 17' N, 115° 8' O); mientras que el avistamiento en aguas más profundas registrado fue en aguas de 4,077.79 m de profundidad durante el otoño en la zona del talud al centro de la PBC (26° 59' N, 114° 58' O). El porcentaje de datos faltantes de la profundidad y el gradiente batimétrico a la resolución que se empataron los transectos (0.05°) fue de 0.07% y 0.02%, respectivamente.

La magnitud del gradiente batimétrico aumenta paralelamente a la costa de la PBC, principalmente en la costa central de la PBC (Figura 7). En esta zona, a lo largo del talud continental, la profundidad alcanza valores mayores a 4000 m. La mínima magnitud del gradiente batimétrico en que se obtuvo esfuerzo de muestreo fue de 6.27×10^{-06} m (27° 57' N, 115° 6' O) durante la primavera; mientras que el máximo valor en que se registró esfuerzo de muestreo fue de 0.02 m (27° 10' N, 114° 52' O) en otoño. El avistamiento registrado con la mayor magnitud del gradiente batimétrico fue de 0.019 m en primavera en la zona cercana al talud en la parte media de la PBC (27° 15' N, 114° 51' O). El de menor fue de 0.0003 m en otoño, también en la zona central de la PBC pero próxima a la costa (27° 49' N, 114° 40' O).

El área de estudio tiene una distancia a la costa máxima de 229 km y mínima menor a un kilómetro. El porcentaje de datos faltantes de la distancia a la costa a la resolución que se empataron los transectos (0.05°) fue 0%. Fuera de la costa occidental de la península la especie fue observada frecuentemente a distancias de 50 a 150 km de la costa, entre el área de Bahía Magdalena y Cabo San Lucas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En zonas más lejanas existen menos avistamientos, aunque también es escaso el esfuerzo de búsqueda. En el invierno no se obtuvo esfuerzo de muestreo a más de 50 km de la costa. Durante la primavera, se encuentran frecuentemente distribuidos a lo largo de la costa a distancias menores a 50 km y hasta 200 km en el sur de la PBC. Durante el verano y el otoño se avistaron principalmente de 25 a 180 km de la costa en la zona sur de la PBC. El avistamiento más cercano registrado tuvo lugar a 3.45 km de la costa en verano en la zona próxima a isla de Cedros (28°

17' N, 115° 8' O), mientras que el más lejano tuvo lugar a 183.3 km de la costa también en verano, al suroeste de la PBC (23° 42' N, 113° 4' O).

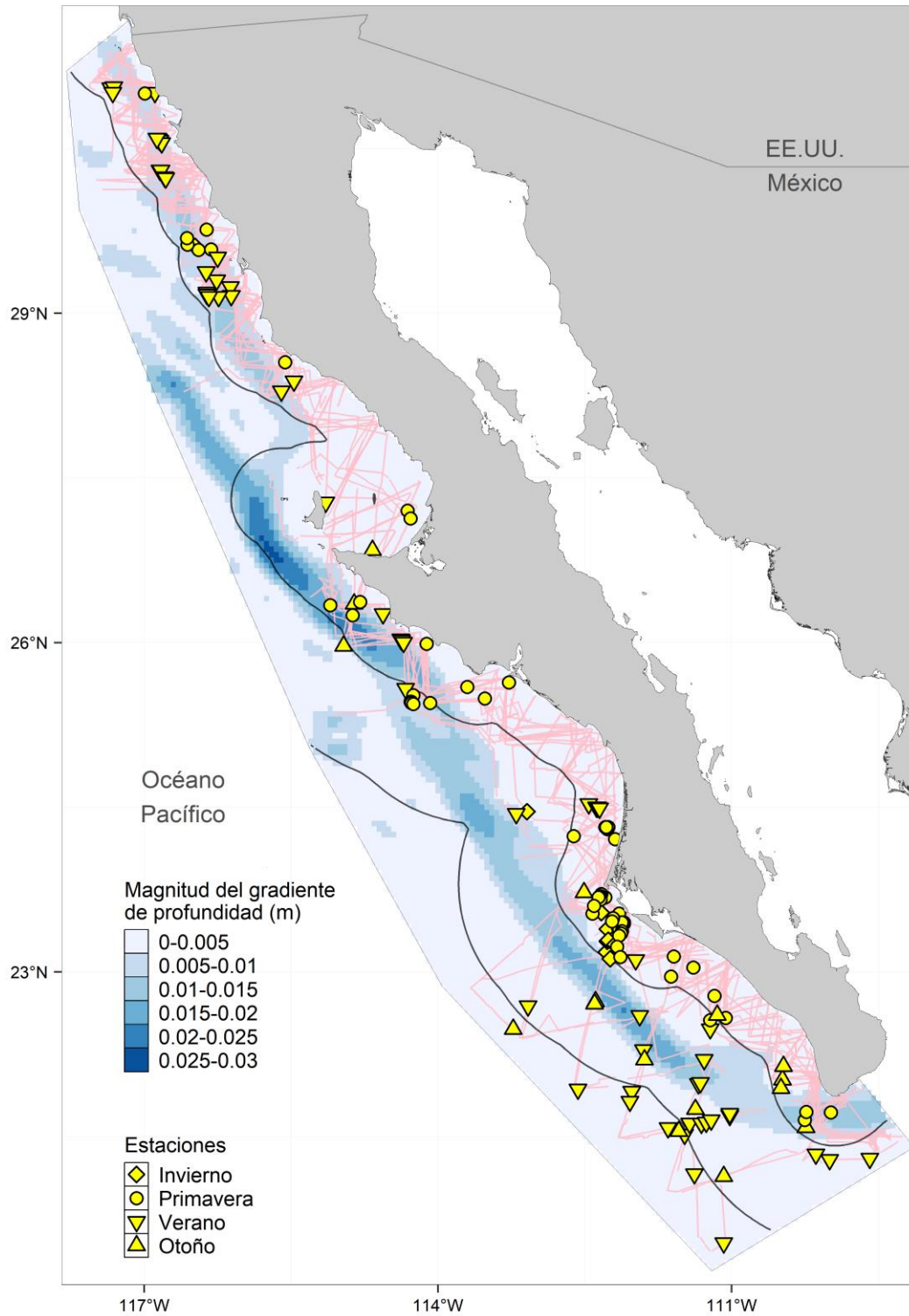


Figura 7. Mapa de la magnitud del gradiente batimétrico y distancia a la costa en el área de estudio. En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y las formas amarillas a los avistamientos agrupados por estaciones del año. Las líneas negras indican la distancia a la costa de 50 y 150 km, respectivamente.

En la Figura 7 también se observa una posible zona de agregación en la zona norte de la península (frente a San Quintín) y al sur de la PBC (frente a Bahía Magdalena). En ambas zonas se han registrado animales al menos en 2 estaciones distintas. Frente a Bahía Magdalena se han llegado a tener registros de avistamientos en las cuatro estaciones del año.

3.2.2 Topografía dinámica absoluta

La variable ADT fue descargada con menor resolución que el resto de variables (0.25°). El porcentaje de datos faltantes del ADT a la resolución que se empataron los transectos (0.25°) fue de 5.5 %. El intervalo del ADT durante el esfuerzo de muestreo fue de 0.545 m ($29^\circ 39' N$, $115^\circ 40' O$) a 0.739 m ($22^\circ 29' N$, $109^\circ 35' O$), ambos obtenidos durante el otoño. El avistamiento registrado con menor ADT fue de 0.567 m y tuvo lugar en la zona norte de la PBC ($32^\circ 2' N$, $117^\circ 18' O$). El avistamiento con mayor ADT fue de 0.725 m próximo a Cabo San Lucas ($22^\circ 43' N$, $109^\circ 59' O$). La variable se probó en los modelos, pero a la escala de este estudio no aportaba información relevante.

3.2.3 Temperatura superficial del mar

Durante el periodo de muestreo se presentó un intervalo de temperatura para los transectos de 13 a $30^\circ C$, en primavera (abril) y otoño (septiembre), respectivamente. El porcentaje de datos faltantes de la TSM y la TSM_{anom} a la resolución que se empataron los transectos (0.1°) fue de 13.32%. En los valores de TSM se observa una marcada estacionalidad entre la primavera y el otoño (Figura 8). Las temperaturas más elevadas se presentaron en la costa sur de la PBC, mientras que las menos elevadas se obtuvieron en la costa norte de la PBC. El transecto donde se registró la TSM más alta fue en la zona más sureña del área de estudio y próxima a la costa ($22^\circ 54' N$, $109^\circ 47' O$), durante el verano. En cambio, el transecto con la TSM más baja se registró en primavera, en la zona cercana a Punta San Carlos ($29^\circ 34' N$, $115^\circ 37' O$). Los valores de temperatura más elevados se presentaron durante el verano de 1996 ($29.4^\circ C$), mientras que los más bajos se presentaron durante la primavera de 1996 ($12.7^\circ C$). El mayor número de individuos avistados ($n = 12$) fue en temperaturas bajas ($16^\circ C$) en la parte central de la PBC, frente a Punta Abreojos ($26^\circ 36' N$, $113^\circ 40' O$), en la primavera de 2019.

El intervalo de la TSM_{anom} durante el periodo de muestreo va de -7 a 6 $^{\circ}C$, valores obtenidos en otoño y verano respectivamente. En los valores de TSM_{anom} se observa una marcada diferencia entre la zona norte y sur de la península, siendo la zona de transición entre ambas zonas la que muestra una marcada estacionalidad entre invierno-primavera y verano-otoño (Anexo C). Se obtuvieron registros de avistamientos tanto en anomalías positivas como en anomalías negativas. El avistamiento registrado a la mayor anomalía negativa (-5.03 $^{\circ}C$) tuvo lugar frente a San Quintín ($30^{\circ} 10' N$, $116^{\circ} 15' O$) durante el verano de 1996 y el avistamiento en la mayor anomalía positiva (4.25 $^{\circ}C$) tuvo lugar en la zona oceánica próxima a Cabo San Lucas, al sur de la PBC ($22^{\circ} 40' N$, $111^{\circ} 2' O$) en el verano del 1996.

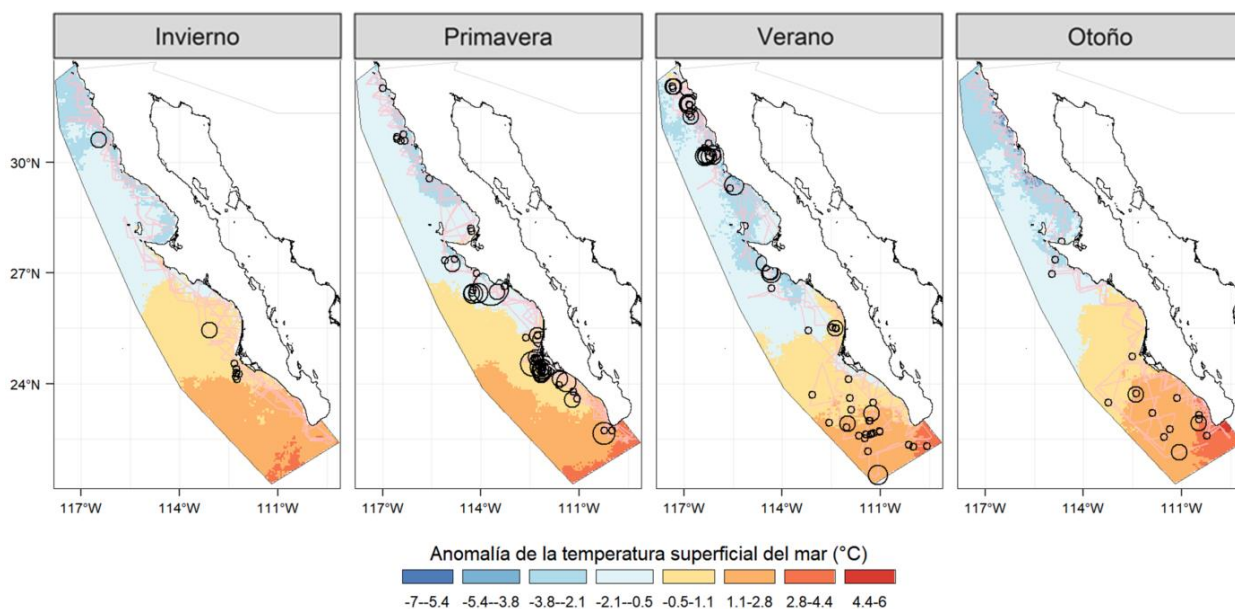


Figura 8. Mapa estacional de temperatura superficial del mar en un promedio de 15 días desde el último día de muestreo. En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los círculos negros a los avistamientos. El tamaño de los círculos de los avistamientos representa el número de grupos de animales avistados en cada estación.

3.2.4 Anomalía espacial de la concentración superficial de clorofila-*a*

El porcentaje de datos faltantes de la CHL y la CHL_{anom} a la resolución que se empataron los transectos (0.05°) fue de 42.7% de los datos totales, ya que CHL no estuvo disponible a través del satélite MODIS-Aqua hasta 2002. Esto representa que solo hay valores disponibles para 3,489 transectos, de los cuales el 3% de los datos a la hora de empatar los transectos faltaron. El intervalo de CHL durante el periodo de muestreo fue de -2.61 a 1.37 $mg\ m^{-3}$ para los transectos muestreados. El transecto con mayor CHL se registró en la frente a Punta Abreojos ($26^{\circ} 38' N$, $113^{\circ} 27' O$), mientras que el de menor concentración se

registró en la zona oceánica central de la PBC a la altura de Punta Abreojos ($26^{\circ} 58' N$, $114^{\circ} 48' O$), ambos durante el verano de 2018 (Anexo C). En los valores de CHL se observa una marcada estacionalidad entre invierno-otoño y primavera-verano, principalmente en zonas próximas a la costa. La primavera y el verano cuentan con los valores más altos de CHL.

Durante el periodo de muestreo se presentó un intervalo de CHL_{anom} de -1.11 a 2.89 $mg\ m^{-3}$ para los transectos muestreados. El transecto con mayor CHL_{anom} negativa se registró en la zona frente a San Quintín ($30^{\circ} 34' N$, $116^{\circ} 33' O$) durante la primavera de 2018, mientras que el de mayor CHL_{anom} positiva se registró en la boca de Laguna San Ignacio ($26^{\circ} 40' N$, $113^{\circ} 19' O$) durante el otoño de 2019. En los valores de CHL_{anom} se observa una marcada estacionalidad entre invierno-otoño y primavera-verano (Figura 9). La CHL_{anom} positiva más elevada se presentó tanto en primavera, como en verano en zonas cercanas a la costa a lo largo de la PBC. También fueron en estas estaciones donde se registraron los mayores valores de CHL_{anom} negativa en la parte oceánica.

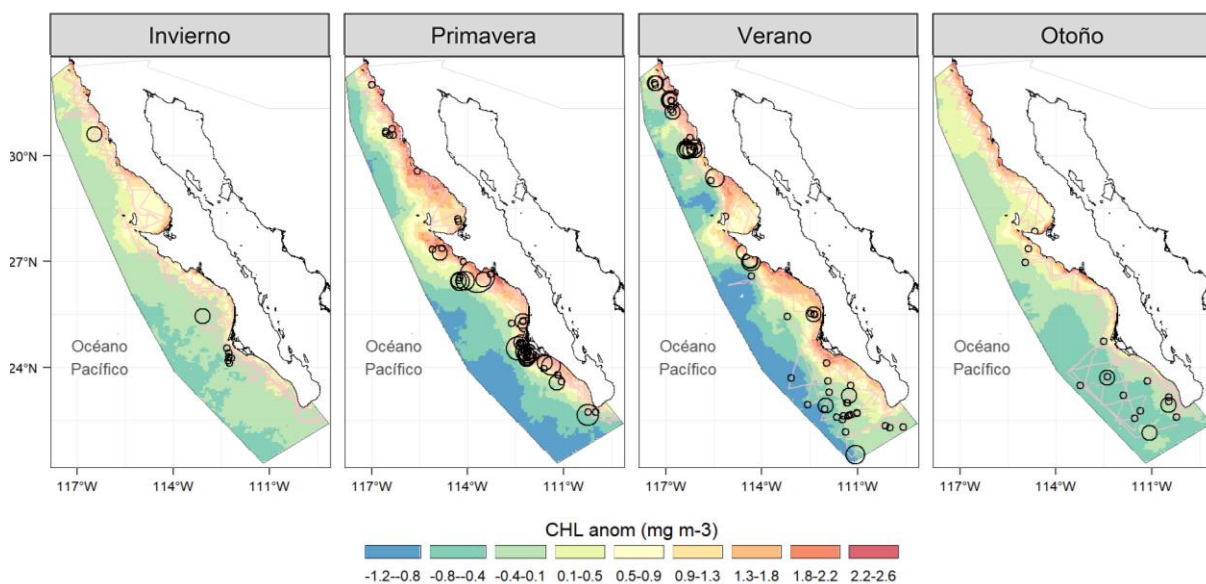


Figura 9. Mapa estacional de la anomalía espacial de la concentración superficial de clorofila-*a* en un promedio de 15 días desde el último día de muestreo. En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los círculos negros a los avistamientos. El tamaño de los círculos de los avistamientos representa el número de grupos animales avistados en cada estación.

3.3 Análisis de correlación de Pearson

Aquellas variables altamente correlacionadas no se introdujeron simultáneamente en un mismo modelo (Anexo B). Éstas fueron: TSM, TSM_{anom} y ADT, con una alta correlación positiva ($p > 0.8$). Las variables CHL y CHL_{anom} estuvieron negativamente correlacionadas ($p < -0.9$). La TSM y TSM_{anom} mostraron alta

correlación negativa con la CHL y CHL_{anom} ($p < -0.7$). Por esta razón no fueron introducidas en el mismo modelo. De las variables utilizadas para mejorar el modelo, se observó que la CHL, la CHL_{anom} y la DC están altamente correlacionadas entre sí ($P < -0.6$) y no se utilizaron en el mismo modelo. El resto de variables no están altamente correlacionadas con la distancia a la costa, por lo que sí se probaron junto con esta variable. El gradiente batimétrico y la profundidad presentaron alta correlación entre sí ($p > 0.8$). El ADT está altamente correlacionadas con el resto de covariables ambientales ($p > \pm 0.6$) por lo que esta variable solo se probó con las variables estáticas.

3.4 Modelos de distribución potencial

De todos los modelos estacionales probados, el modelo con menor AIC resultó ser el modelo con la variable CHL_{anom} (AIC = 395.01, D.E. = 8.99%), incluyendo un componente estacional (estación del año) y efectos aleatorios espaciales (latitud y longitud). Sin embargo, cuando se obtuvo el mapa predictivo de la CHL_{anom} , éste no mostró variaciones en el patrón a lo largo de las distintas estaciones del año. Por ello, y aunado a su baja devianza explicada, este modelo se descartó. Se probaron modelos de predicciones mensuales de idoneidad de hábitat de manera exploratoria, ya que debido a la naturaleza de los datos (varios meses sin esfuerzo de muestreo) tienen mayor incertidumbre (Tabla 4).

Tabla 4. Mejores modelos de idoneidad de hábitat para rorcuales azules (*Balaenoptera musculus*) frente a la península de Baja California, ordenados de menor a mayor según el criterio de información de Akaike (AIC). Se muestra la diferencia de AIC (Δ) entre modelos, el porcentaje de devianza explicada por el modelo (Dev. Exp.), los grados de libertad efectivos del modelo (edf), el estadístico de ajuste (Chi^2) y la significancia del efecto de cada covariante (valor p). Códigos de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1.

Modelo/Fórmula	AIC	Δ AIC	Dev. Exp.	edf	Chi^2	Valor p
$d_i = f_1(lon_i, lat_i, mes_i)$ TSM + offset(d)	1118.88	0.00	29.6	33.6	112.2	<2e-16 ***
$d_i = f_1(lon_i, lat_i, estaciones_i)$ TSM + $f_2(lon_i, lat_i)$ G + offset(d)	1120.55	1.67	29.8	28.45 5.74	98.81 15.23	<2e-16 *** 0.0346 *
$d_i = f_1(lon_i, lat_i, est_i)$ TSM + offset(d)	1123.40	4.52	28	30.38	105.7	<2e-16 ***
$d_i = f_1(lon_i, lat_i, est_i)$ TSM _{anom} + $f_2(lon_i, lat_i)$ G + offset(d)	1128.15	9.27	32.3	25.50 17.19	58.74 55.12	0.00335 ** 6.89e-05 ***
$d_i = f_1(lon_i, lat_i, est_i)$ ADT + $f_2(lon_i, lat_i)$ G + offset(d)	1214.60	95.72	30.5	31.73 7.46	95.13 22.64	3.71e-06 *** 0.00988 **

El siguiente modelo con menor AIC (1120.55, D.E. = 29.8%) fue el de la TSM y el gradiente batimétrico (G), incluyendo un componente estacional y efectos aleatorios espaciales (Tabla 4). Ambas variables tienen un efecto significativo en el modelo ($p < 0.05$). Por ello, los resultados de los GAMs sugieren que la TSM y el gradiente batimétrico son los mejores predictores estacionales de idoneidad de hábitat para rorcuales azules (*Balaenoptera musculus*) frente a la península de Baja California. El resto de los modelos, contenidos en la Tabla 4, tuvieron un AIC mayor que los modelos previamente mencionados.

3.5 Mapas predictivos de idoneidad de hábitat

Para obtener un mapa de idoneidad del hábitat del rorcual azul, se estimó la probabilidad de presencia de una especie con base en las condiciones ambientales, asignando a cada píxel un valor de cero a uno, donde cero indica que las condiciones ambientales son desfavorables para la presencia de la especie y uno que son las mejores (Phillips y Dudík, 2008; Elith et al., 2011). En la Figura 10, la escala colorimétrica corresponde al mejor modelo estacional en la costa occidental de la PBC, hasta ahora, de predicción de hábitat de la especie (AIC = 1120.55, D.E.= 29.8%).

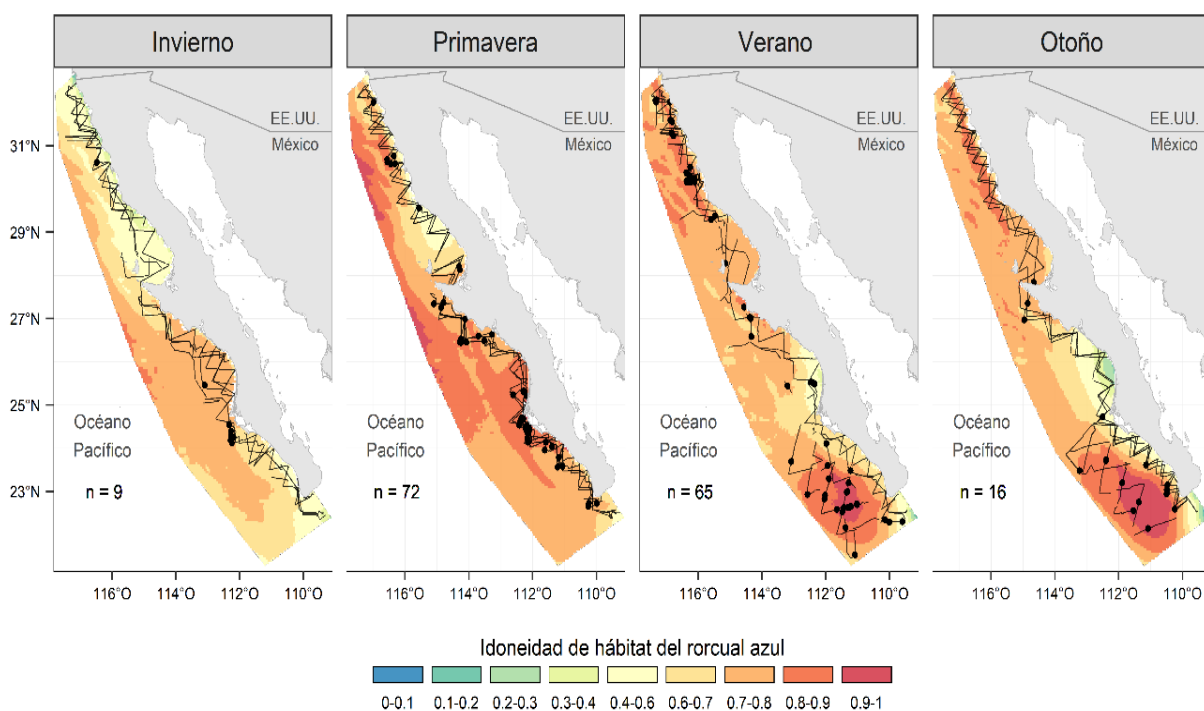


Figura 10. Predicciones de la distribución espacio-temporal del rorcual azul a partir de la idoneidad de hábitat (escala colorimétrica) frente a la península de Baja California. El mejor modelo usa como predictor los cambios estacionales en la temperatura superficial del mar y el gradiente batimétrico con una estructura espacial específica (ver competencia de modelos en Tabla 4). En negro, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los puntos a los avistamientos. n representa el número de grupos de animales avistados en cada estación.

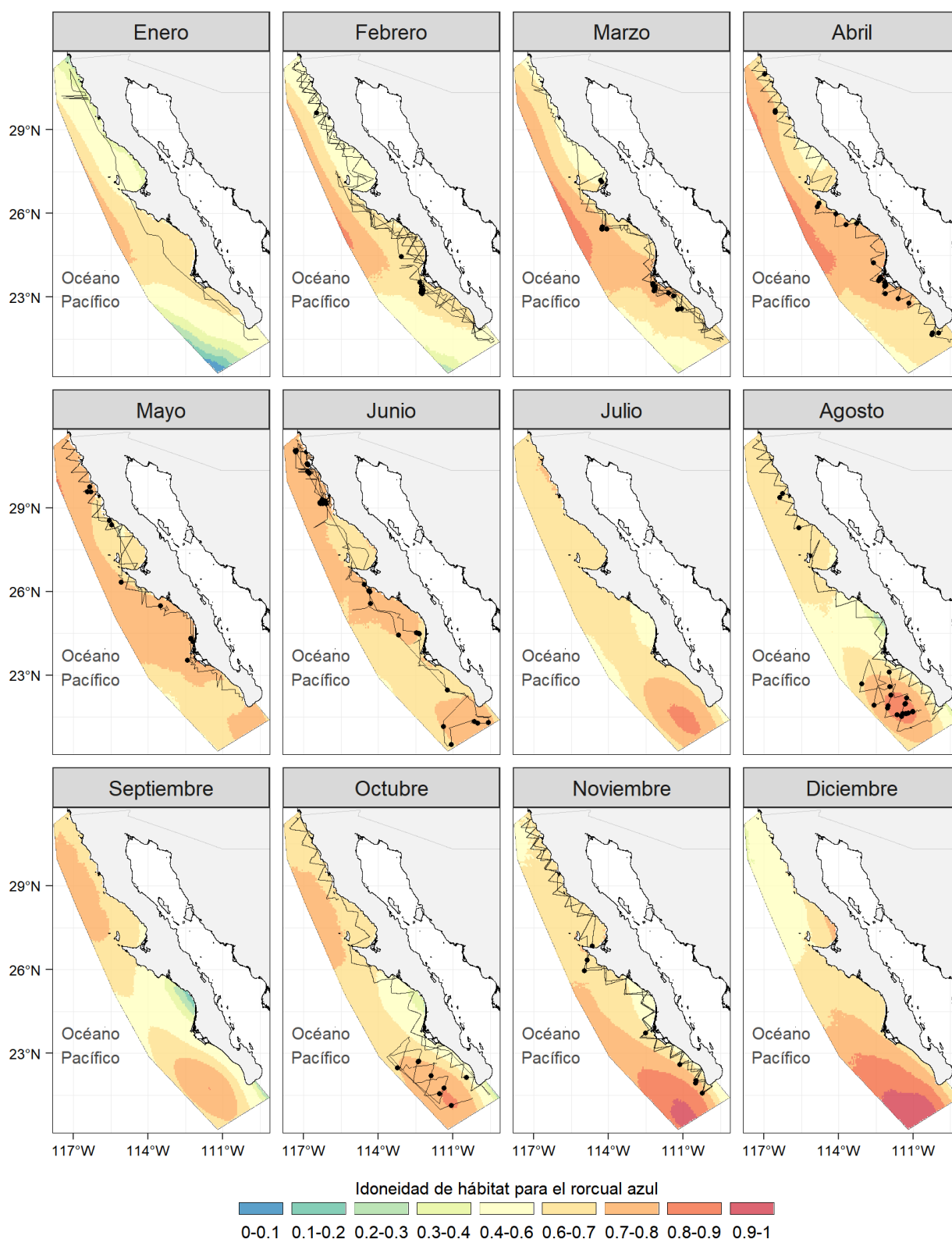


Figura 11. Predicciones de la distribución espacio-temporal del rorcual azul a partir de la idoneidad de hábitat (escala colorimétrica) frente a la PBC. El mejor modelo utiliza como predictor los cambios estacionales en la temperatura superficial del mar con una estructura espacial específica (ver competencia de modelos en Tabla 4). En negro, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los puntos a los avistamientos. n representa el número de grupos de animales avistados en cada estación.

En la **Figura 11** se puede apreciar que no hubo esfuerzo de muestreo para los meses de julio, septiembre y diciembre. El mes con mayor esfuerzo fue febrero con un total de 7,034.54 km recorridos en 1,175 transectos, frente a enero con un esfuerzo de muestreo total de 1,135.74 km en 186 transectos (Anexo A). Sin embargo, a pesar de que sí hubo esfuerzo de muestreo en enero, no se registraron avistamientos. En febrero, marzo, abril y noviembre los avistamientos registrados fueron en la mitad sur de la PBC principalmente, mientras que en mayo y junio ya se distribuyeron a lo largo de toda la PBC. Agosto y octubre fueron meses de avistamientos más oceánicos en la parte sur de la península. El mapa predictivo, obtenido a partir del mejor modelo obtenido, con la TSM como predictor ($AIC = 1118.88$, $D.E. = 29.6\%$), capta un patrón mensual que va variando a lo largo del año, siendo la zona oceánica sur de la PBC una zona importante para la especie de julio a diciembre. Los meses de septiembre y octubre también presentan mayor grado de idoneidad en la zona oceánica norte de la PBC. En febrero, marzo y abril se observa un patrón más oceánico en la parte media y norte de la PBC. Finalmente, de nuevo en abril y además en mayo y junio se predicen alta agregación de la especie en algunos lugares cerca de la costa, a lo largo de la PBC.

Capítulo 4. Discusión

Los resultados de este estudio proveen una primera aproximación de los posibles efectos de la TSM y el gradiente batimétrico en la distribución espacio-temporal del rorcual azul en la costa occidental de la península de Baja California. El rorcual azul es una especie cuyos movimientos durante todo el año no se conocen bien. El reciente desarrollo en el campo de la modelación de hábitat mediante GAMs y la amplia disponibilidad de datos ambientales a largo plazo ha permitido estimar la distribución potencial de la especie y hacer predicciones del posible cambio en sus patrones de distribución. Gracias a estos avances, ha mejorado en gran medida nuestra comprensión de las migraciones anuales del rorcual azul, desde el Pacífico tropical oriental en invierno y primavera, hasta el Pacífico nororiental en verano y otoño (Mate et al., 1999; Bailey et al., 2009; Irvine et al., 2014). Nuestro modelo fue capaz de capturar las características de uso del hábitat de los rorcuales azules, prediciendo zonas con alta idoneidad de hábitat en la PBC. Los resultados sugieren que la TSM y el gradiente batimétrico en conjunto son importantes predictores de la distribución de la especie en esta área, al igual que lo son para la costa oeste de EE.UU. (Hazen et al., 2017), y dicha distribución cambia a lo largo del año en sincronía con los cambios espacio-temporales en estas variables. Estas zonas con alta idoneidad de hábitat, indicadores de zonas de agregación o “puntos calientes”, fueron: la zona de frentes térmicos próxima a Bahía Magdalena y Cabo San Lucas, Punta Eugenia y a lo largo del frente de Ensenada. No obstante, es relevante mencionar que los resultados de los GAMs son un acercamiento a la realidad, por ende no se puede esperar que éstos reflejen todos los mecanismos que inciden en la distribución de una especie.

De los modelos probados con los distintos predictores, y a pesar de tener el mejor AIC, se descartaron los modelos de CHL y CHL_{anom}. Esto es debido a que hay una fragmentación en la base de datos: los que tienen CHL (2005-2020) y los que no (1994-2002), por lo que cuentan con un menor número de valores del predictor. Al no tener el mismo tamaño muestral, no son comparables los modelos de este predictor con los de TSM. Esto puede ser la causa de que las predicciones espaciales no concuerden con las de los otros modelos (*e.g.*, la TSM). El siguiente modelo de idoneidad de hábitat con un AIC bajo señaló como mejores predictores a la variación estacional de la TSM y el gradiente batimétrico (AIC = 1120.55). Ambas variables cuentan con un número similar de datos y ambas variables tienen un efecto significativo en el modelo ($p < 0.05$). A pesar de que el ADT ha sido utilizado como predictor del rorcual azul en el Pacífico nororiental a escala hemisférica durante la temporada de verano (Pardo et al., 2015), los modelos cuyos predictor fue el ADT también se descartaron como buenos modelos. Dichos modelos presentaron valores más elevados de Δ AIC respecto al mejor modelo, posiblemente debido a que su resolución mínima

(0.25°) no parece ser adecuada para la escala de nuestra área de estudio y por ello son menos parsimoniosos. Finalmente, el modelo seleccionado fue el que tiene como predictores la variación estacional de la TSM y el gradiente batimétrico (AIC = 1120.55, D.E. = 29.8%). Estas variables tienen gran importancia porque indican movimientos de masas de agua y afloramientos, lo que sugiere que la especie usa núcleos fríos que varían en ubicación estacionalmente y rasgos de mesoescala, como frentes térmicos durante todo el año.

Las predicciones mensuales que se presentan en este trabajo son un primer acercamiento a un modelo más preciso, capaz de captar a escala mensual la idoneidad del hábitat del rorcual azul. Los datos utilizados no son suficientes para obtener una buena predicción a escala mensual, ya que no se obtuvo esfuerzo de muestreo en todos los meses del año y no hay estudios a esa escala para comparar y contrastar los resultados obtenidos. Además, el esfuerzo de búsqueda lejos de la costa fue limitado y no se pudo determinar claramente si el rorcual azul es común en esa área más profunda durante todo el año. A pesar de ello, las predicciones fueron capaces de mostrar un patrón espacial que varía a lo largo de los meses del año, pero con mayor incertidumbre que el modelo basado en las estaciones del año del mismo predictor.

Las señales temporales exactas y los desencadenantes de sus migraciones siguen siendo desconocidos; sin embargo, es probable que sean impulsadas por agregaciones recurrentes de krill, debido a la dependencia de la especie de esta presa (Croll et al., 2005). Los estudios que modelan la distribución del krill en la corriente de California han descubierto una fuerte asociación con la ruptura de la plataforma y la energía cinética de los remolinos (Santora et al., 2011); de modo que, las variables físicas como la TSM y el gradiente batimétrico probablemente sirven como indicadores de la densidad de presas en nuestros modelos de rorcual azul. Debido a la falta de mediciones de la densidad del krill durante todo el año, es recomendable el uso de covariables ambientales para predecir el hábitat probable de la especie. Estudios recientes han mostrado los primeros mapas de predicción de hábitat potencial de rorcual azul a partir de la combinación de un gran conjunto de datos de telemetría por satélite con las condiciones oceanográficas del área (Bailey et al., 2009; Hazen et al., 2017; Irvine et al., 2014). Estos mapas predictivos se obtuvieron para todo el año en las aguas de California, Oregón y Washington (Hazen et al., 2017). A pesar de las aproximaciones a los requerimientos espaciales y temporales del hábitat del rorcual azul en la costa del Pacífico nororiental, ese estudio no abarcó un área tan importante como es la costa occidental de la PBC. Por este motivo, con este trabajo se buscó obtener una predicción de su distribución espacio-temporal en esta área de transición entre sus zonas de alimentación y de crianza. Un área donde la especie se encuentra en ella durante todas las estaciones del año con una distribución

diferente, dependiendo de la estación. Estas variaciones en la distribución están influenciadas por la disponibilidad de alimento estacional debido a las características oceanográficas estacionales de mesoescala que se presentan en la PBC.

Durante la temporada de invierno, el modelo estimó que los rorcuales azules se distribuyen en aguas más oceánicas, aunque con mayor acercamiento a la costa en el sector del Golfo de Ulloa. En primavera, la especie se encuentra más próxima a la costa, agregándose frente a la región de Ensenada, al sur de Punta Eugenia y alrededor de Bahía Magdalena. Este patrón puede responder a la ubicación estacional de los núcleos de surgencia, y su intensidad. Es plausible que estas regiones de agregación se correspondan con las zonas donde realizan paradas prolongadas durante su migración hacia el norte, ya que dejan típicamente sus zonas de invernación en marzo y abril, pero no llegan a las aguas de California hasta junio (Bailey et al., 2009). En verano y otoño, el patrón espacial muestra un grado mucho más bajo de idoneidad de hábitat en la zona norte de la PBC, mientras que durante todo el año destaca una región oceánica al oeste y suroeste de Cabo San Lucas como un punto de potencial agregación, con una alta idoneidad de hábitat. Este punto durante verano-otoño se vuelve aislado y migra hacia el norte, extendiéndose hasta Bahía Magdalena (Figura 10). Esto sugiere que durante el verano la península tiene las características de hábitat idóneo para que la especie se alimente, limitando su migración al norte a la PBC y concordando con los estudios previos (Etnoyer et al., 2006). La mezcla de agua provocada por las surgencias y los frentes térmicos a lo largo de la península permiten la recuperación de nutrientes y favorecen la productividad primaria, esto hace que el talud continental y las áreas cercanas a la costa sean regiones con altas concentración de alimento para el rorcual azul.

La zona sur de la península, conocida como sistema frontal de Baja California (Etnoyer et al., 2004), es una región altamente productiva que aparentemente es utilizada como posible zona de agregación durante el verano-otoño. La presencia prolongada de rorcuales azules en una región con alta densidad de frentes térmicos y sus alrededores, sugiere que los gradientes de TSM amplios son indicadores de áreas importantes de alimentación (Etnoyer et al., 2006). Un solo frente puede persistir 3 meses o más, y atraer a individuos de la misma especie. Los tiempos de residencia prolongados a lo largo de estos frentes pueden explicarse por la abundancia de una presa monoespecífica (Etnoyer et al., 2006). Es posible que los rorcuales azules y muchas otras especies frente a la costa de Baja California Sur se alimenten de langostillas rojas, *Pleuroncodon planipes*, en los frentes de esta zona (Longhurst et al., 2004). Las langostillas rojas posiblemente son arrastradas por estos frentes lejos de la costa y especies altamente migratorias, como los rorcuales azules, son atraídas a esta zona frente a Baja California Sur (Longhurst et al., 2004; Etnoyer et al., 2006). Esto podría explicar las paradas prolongadas y las

concentraciones de rorcuales azules con comportamiento de alimentación en parches durante la migración hacia el norte en primavera (Bailey 2009). Está claro que algo sucede en los frentes, pero la verdadera naturaleza de la atracción de esta especie es difícil de discernir.

Referente al mejor modelo mensual, éste utiliza como predictor la variación estacional de la temperatura superficial del mar (AIC = 1118.88, D.E. = 29.6%). El modelo capta un patrón mensual que va cambiando a lo largo del año. La zona oceánica sur de la península, frente a Bahía Magdalena y Cabo San Lucas, es una zona clave de julio a diciembre, con una alta idoneidad de hábitat. En esta zona de grandes giros y frentes térmicos, confluyen distintas masas de agua y sistemas de corrientes y cuenta con alta productividad (Gaxiola-Castro et al., 2010). La razón es la existencia de un ambiente continuo entre la plataforma continental en el golfo de Ulloa y el golfo de California de junio a noviembre (Gaxiola-Castro et al., 2010). Esto convierte a dicha zona en un área de tránsito constante de especies, tanto de las que se desplazan por acción del movimiento de las masas de agua (krill) como de aquellas con movimiento propio que siguen dichas masas (rorcual azul). En enero y febrero se observa un patrón espacial similar, siendo la zona frente a Bahía Magdalena la única región cercana a la costa con alta idoneidad de hábitat. La diferencia drástica entre diciembre y enero, puede deberse a que los rorcuales ingresan a sus zonas de crianza invernales en el golfo de California. Los meses de marzo y abril muestran un patrón espacial más oceánico en la parte media y norte de la península, región conocida por pasar de productividad mesotrófica en invierno a eutrófica en primavera (Hernández De la Torre et al., 2015).

Finalmente, de nuevo en abril y además en mayo y junio se predice una alta idoneidad de hábitat en las zonas costeras frente a la costa de Ensenada, Punta Eugenia, golfo de Ulloa y Bahía Magdalena. En la zona oceánica norte durante casi todo el año ocurre el frente de Ensenada, pero tiene mayor presencia de finales de marzo a principios de julio (Haury et al., 1993). El área próxima a Punta Eugenia y el Golfo de Ulloa es eutrófica en primavera, de transición entre las otras dos subzonas según los patrones de variabilidad espacio-temporal de la TSM (Hernández De la Torre et al., 2015). En esta zona confluyen regularmente giros y frentes térmicos, con movimientos ciclónicos y anticiclónicos. La costa de Bahía Magdalena es conocida por su alta productividad. A pesar de la falta de esfuerzo de muestreo en este estudio para los meses de julio, septiembre y diciembre, las observaciones concuerdan con lo predicho por el modelo, lo cual justifica la distribución de la especie en esos meses (Figura 10). El hecho de que el rorcual azul sea una especie con una distribución oceánica dificulta la obtención de información en lugares alejados de la costa. Por ello, estos mapas predictivos de idoneidad de hábitat de la especie pueden ayudar a comprender su posible distribución potencial en un área sin muestrear, basándonos en zonas de alta idoneidad de hábitat.

El estudio de seguimiento por satélite a escala hemisférica en el Pacífico nororiental, reflejó que la península es una zona importante de congregación y alimentación de rorcuales azules (Bailey et al., 2009). Nuestros resultados evidencian que la estacionalidad de los avistamientos fue consistente con aquella distribución descrita para el rorcual azul en la costa occidental de la PBC (Bailey et al., 2009). En general, los rorcuales azules parecen alimentarse a lo largo de estrechos gradientes de TSM ($0.01\text{--}0.10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$), son difíciles de apreciar por encontrarse en el extremo inferior del espectro físico oceanográfico para el Pacífico noreste ($0.03\text{--}0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$; Etnoyer et al., 2006). Cabe destacar que los satélites pueden detectar y seguir estas características, a pesar de obstáculos como la nubosidad, la resolución limitada y la extensión limitada. Cada uno de los enfoques tomados en las distintas técnicas de muestreo de la especie (acústicas, transectos lineales, foto-identificación, marcas satelitales) han proporcionado instantáneas de las abundancias y distribución de rorcuales azules, pero solo para el momento y lugar del estudio. En sus áreas de alimentación en el Pacífico nororiental (Oregón, California y Baja California) se estimó un número entre 2,000 y 3,000 rorcuales azules (Calambokidis y Barlow, 2004).

Por otro lado, la abundancia en aguas mexicanas del Pacífico fue de 773 individuos para el periodo 1986-1993 (Intervalo de Confianza: IC 95%= 396-1510; (Gerrodette y Palacios, 1996). La estimación de abundancia en la costa occidental de la PBC fue de aproximadamente 500 animales, sin embargo, para el golfo de California fue de entre 200 y 300 individuos (Gendron, 2002; Ugalde, 2008). A pesar de que se ha refutado la teoría de la existencia de una población local California-Baja California (Gendron, 2002), estas diferencias en las estimaciones de abundancias sugieren que el número faltante de rorcuales azules entre sus áreas conocidas de alimentación y de crianza podría estar distribuido en un área transitoria como es la costa occidental de la PBC. Incluso, podría indicar que no sea un área transitoria y haya individuos en la costa occidental de la PBC que no migran durante todo el año. De ser así, la PBC podría ser un área de alimentación durante todo el año y la zona al sur de la PBC podría ser un área de reproducción para la especie en invierno.

Este trabajo presenta una primera aproximación de la distribución estacional del rorcual azul en la costa occidental de la península de Baja California inferida mediante la construcción de modelos estadísticos que describen la relación de la presencia de la especie con las características oceanográficas del hábitat. Estos métodos pueden ser replicados en otras regiones para esta especie. Los resultados obtenidos representan una base para futuros trabajos sobre el uso del hábitat del rorcual azul en esta área fundamental de agregación, para comprender mejor qué características oceanográficas influyen en la distribución y comportamiento de la especie. Los modelos presentados en este trabajo requerirán una validación continua para garantizar que las relaciones especie-ambiente identificadas aquí persisten en

el futuro, especialmente si el clima cambia más allá de las condiciones experimentadas durante nuestro estudio o si se obtienen avistamientos los años intermedios del muestreo.

Capítulo 5. Conclusiones

1. La variación estacional de la temperatura superficial del mar y el gradiente batimétrico son buenos predictores de la distribución del rorcual azul en la costa occidental de la península de Baja California.
2. Los modelos planteados sugieren alta agregación de rorcuales azules en zonas que han sido poco muestreadas, tales como la zona de frentes térmicos próxima a Bahía Magdalena y Cabo San Lucas, Punta Eugenia y a lo largo del frente de Ensenada.
3. Estas predicciones podrían ser utilizadas para proponer hábitats prioritarios para la especie que deban ser objeto de medidas de manejo.
4. Debido a su proximidad a la costa en los meses de abril a junio, se podría establecer un periodo de avistamiento recreativo regulado frente a la costa de Ensenada (BC) y Bahía Magdalena (BCS).
5. Para ayudar a que el área continúe siendo de buena calidad para los rorcuales azules, se deben de regular cuidadosamente, con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2010 (SEMARNAT, 2010), el desarrollo de actividades turísticas, especialmente aquellas dirigidas a estos animales, así como la pesca en general, el tránsito de embarcaciones y otras actividades humanas.

Literatura citada

- Akaike, H. 1973. Maximum likelihood identification of Gaussian autoregressive moving average models. *Biometrika*, 60(2), 255–265.
- Allaby, M. 1998. A dictionary of ecology. En Oxford University Press, New York. New York, USA.
- Arellano, B., Rivas, D. 2019. Coastal upwelling will intensify along the Baja California coast under climate change by mid-21st century: Insights from a GCM-nested physical-NPZD coupled numerical ocean model. *Journal of Marine Systems*, 199, 103207. doi:10.1016/j.jmarsys.2019.103207
- Auad, G., Roemmich, D., Gilson, J. 2011. The California Current System in relation to the Northeast Pacific Ocean circulation. *Progress in Oceanography*, 91(4), 576–592. doi:10.1016/j.pocean.2011.09.004
- Badan, A. 1997. La corriente costera de Costa Rica en el Pacífico mexicano. En *ribuciones a la oceanografía física en México*. Monografía (Lavín, M.F, Vol. 3). Unión Geofísica Mexicana: México, D.F.
- Bailey, H., Mate, B. R., Palacios, D. M., Irvine, L., Bograd, S. J., Costa, D. P. 2009. Behavioural estimation of blue whale movements in the Northeast Pacific from state-space model analysis of satellite tracks. *Endangered Species Research*, 10(1), 93–106. doi:10.3354/esr00239
- Bakun, A., Nelson, C. S. 1991. The Seasonal Cycle of Wind-Stress Curl in Subtropical Eastern Boundary Current Regions. *Journal of Physical Oceanography*, 21, 1815–1834. doi:10.1175/1520-0485(1991)021<1815:tscows>2.0.co;2
- Barlow, D., Bernard, K., Escobar-Flores, P., Palacios, D., Torres, L. 2020. Links in the trophic chain: modeling functional relationships between in situ oceanography, krill, and blue whale distribution under different oceanographic regimes. *Marine Ecology Progress Series*, 642, 207–225. doi:10.3354/meps13339
- Barlow, J., Forney, K. A. 2007. Abundance and population density of cetaceans in the California Current ecosystem. *Fishery Bulletin*, 105(4), 509–526. doi:10.1016/j.jmarsys.2007.01.010
- Barlow, J., Kahru, M., Mitchell, B. G. 2008. Cetacean biomass, prey consumption, and primary production requirements in the California Current ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 371, 285–295. doi:10.3354/meps07695
- Barlow, J. 2015. Inferring trackline detection probabilities, $g(0)$, for cetaceans from apparent densities in different survey conditions. *Marine Mammal Science*, 31(3), 923–943. doi:10.1111/mms.12205
- Bograd, S. J., Lynn, R. J. 2003. Long-term variability in the southern California Current System. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14–16), 2355–2370.
- Bograd, S. J., Schroeder, I., Sarkar, N., Qiu, X., Sydeman, W. J., Schwing, F. B. 2009. Phenology of coastal upwelling in the California Current. *Geophysical Research Letters*, 36(1), L01602. doi:10.1029/2008GL035933
- Bograd, S. J., Schroeder, I. D., Jacox, M. G. 2019. A water mass history of the Southern California current system. *Geophysical Research Letters*, 46(12), 6690–6698. doi:10.1029/2019GL082685

- Branch, T. A., Stafford, K. M., Palacios, D. M., Allison, C., Bannister, J. L., Burton, C. L. K. 2007. Past and present distribution, densities and movements of blue whales *Balaenoptera musculus* in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean. *Mammal Review*, 37(2), 116–175. doi:10.1111/j.1365-2907.2007.00106.x
- Calambokidis, J., Barlow, J. 2004. Abundance of blue and humpback whales in the eastern North Pacific estimated by capture-recapture and line-transect methods. *Marine Mammal Science*, 20(1), 63–85. doi:10.1111/J.1748-7692.2004.TB01141.X
- Calambokidis, J., Schorr, G. S., Steiger, G. H., Francis, J., Bakhtiari, M., Marshall, G., Oleson, E. M., Gendron, D., Robertson, K. 2007. Insights into the Underwater Diving, Feeding, and Calling Behavior of Blue Whales from a Suction-Cup-Attached Video-Imaging Tag (Critttercam). *Marine Technology Society Journal*, 41(4), 19–29. doi:10.4031/002533207787441980
- Calambokidis, J., Barlow, J., Ford, J. K. B., Chandler, T. E., Douglas, A. B. 2009. Insights into the population structure of blue whales in the Eastern North Pacific from recent sightings and photographic identification. *Marine Mammal Science*, 25(4), 816–832. doi:10.1111/J.1748-7692.2009.00298.X
- Clapham, P. J., Aguilar, A., Hatch, L. T. 2008. Determining spatial and temporal scales for management: lessons from whaling. *Marine Mammal Science*, 24(1), 183–201. doi:10.1111/J.1748-7692.2007.00175.X
- Committee on Taxonomy. 2021. List of marine mammal species and subspecies. Society for Marine Mammalogy.
- Cooke, J. G. 2018. *Balaenoptera musculus* (errata version published in 2019). The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T2477A156923585. doi:https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T2477A156923585.en
- Croll, D. A., Marinovic, B., Benson, S., Chavez, F. P., Black, N., Ternullo, R., Tershy, B. R. 2005. From wind to whales: Trophic links in a coastal upwelling system. *Marine Ecology Progress Series*, 289, 117–130. doi:10.3354/meps289117
- De la Lanza-Espino, G. 1991. *Oceanografía de mares mexicanos*. AGT Editor, México., 569.
- De Silva-Dávila, R., Palomares-García, J. R. 1998. Unusual larval growth production of *Nyctiphanes simplex* in Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. *Journal of Crustacean Biology*, 18(3), 490–498. doi:10.1163/193724098X00313
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J. R. G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., Lautenbach, S. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. doi:10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x
- Durazo, R. 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Progress in Oceanography*, 83(1–4), 361–368.
- Durazo, R., Gaxiola-Castro, G. 2010. Introducción. En G. Gaxiola-Castro & R. Durazo (Eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California*. pp. 13–18.

- Durazo, R., Ramírez, A. M., Miranda, L. E., Soto-Mardones, L. A. 2010. Climatología de variables hidrográficas. En G.-C. G & D. R. (Eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California*. pp. 25–27.
- E.U. Copernicus Marine Service Information. 2022. SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047 product. doi:10.48670/moi-00148. Recuperado el 20 01 2022 de https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/DATA-ACCESS.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., Yates, C. J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57. doi:10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x
- Etnoyer, P., Canny, D., Mate, B., Morgan, L. 2004. Persistent pelagic habitats in the Baja California to Bering Sea (B2B) ecoregion. *Oceanography*, 17(SPL.ISS. 1), 90–101. doi:10.5670/oceanog.2004.71
- Etnoyer, P., Canny, D., Mate, B. R., Morgan, L. E., Ortega-Ortiz, J. G., Nichols, W. J. 2006. Sea-surface temperature gradients across blue whale and sea turtle foraging trajectories off the Baja California Peninsula, Mexico. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 53(3–4), 340–358. doi:10.1016/J.DSR2.2006.01.010
- Evans, P. G. H. 2018. Marine Protected Areas and marine spatial planning for the benefit of marine mammals. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 98(5)(973–976). doi:10.1017/S0025315418000334
- Fernandez, M., Yesson, C., Gannier, A., Miller, P. I., Azevedo, J. M. N. 2018. A matter of timing: how temporal scale selection influences cetacean ecological niche modelling. *Marine Ecology Progress Series*, 595, 217–231.
- Fiedler, P. C., Mendelssohn, R., Palacios, D. M., Bograd, S. J. 2013. Pycnocline variations in the eastern tropical and north pacific, 1958-2008. *Journal of Climate*, 26(2), 583–599. doi:10.1175/JCLI-D-11-00728.1
- Fiedler, P. C., Reilly, S. B., Hewitt, R. P., Demer, D., Philbrick, V. A., Smith, S., Armstrong, W., Croll, D. A., Tershy, B. R., Mate, B. R. 1998. Blue whale habitat and prey in the California Channel Islands. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 45(8–9), 1781–1801. doi:10.1016/S0967-0645(98)80017-9
- Forcada, J. 2018. Distribution. *Encyclopedia of Marine Mammals*, 259–262. doi:10.1016/B978-0-12-804327-1.00106-0
- Forney, K.A., Ferguson, M. C., Becker, E. A., Fiedler, P. C., Redfern, J. V., Barlow, J., Vilchis, I. L., Ballance, L. T. 2012. Habitat-based spatial models of cetacean density in the eastern Pacific Ocean. *Endangered Species Research*, 16(2), 113–133. doi:10.3354/esr00393
- Forney, Karin A., Barlow, J. 1998. Seasonal patterns in the abundance and distribution of california cetaceans, 1991-1992. *Marine Mammal Science*, 14(3), 460–489. doi:10.1111/j.1748-7692.1998.tb00737.x
- Franklin, J. 2010. Moving beyond static species distribution models in support of conservation biogeography. *Diversity and Distributions*, 16(3), 321–330. doi:10.1111/J.1472-4642.2010.00641.X

- Gambell, R. 1976. World whale stocks. *Mammal Review*, 6(1), 41–53.
- Gaskin, D. E. 1982. *The Ecology of Whales and Dolphins*. Heinemann. London.
- Gaxiola-Castro, G., Durazo, R., Lavaniegos, B., De La Cruz-Orozco, M. E., Millán-Núñez, E., Soto-Mardones, L., Cepeda-Morales, J. 2008. Pelagic ecosystem response to interannual variability off Baja California. *Ciencias Marinas*, 34(2), 263–270. doi:10.7773/CM.V34I2.1413
- Gaxiola-Castro, G., Cepeda-Morales, J., Nájera-Martínez, S., Espinosa-Carreón, T. L., De la Cruz-Orozco, M. E., Sosa-Avalos, R., Aguirre-Hernández, E., Cantú-Ontiveros, J. P. 2010. Biomasa y producción del fitoplancton. En G. Gaxiola-Castro & R. Durazo (Eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California*.
- Gendron, D. 1992. Population structure of daytime surface swarms of *Nyctiphanes simplex* (Crustacea, Euphausiacea) in the Gulf of California, Mexico. *Marine Ecology Progress Series*.
- Gendron, D. 2002. *Ecología poblacional de la ballena azul, Balaenoptera musculus, de la Península de Baja California*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California, México. 105 pp.
- Gerrodette, T., Palacios, D. 1996. Estimates of cetacean abundance in eez waters of the eastern Tropical Pacific. LJ-96-10. En *Southwest Fisheries Science Center*. La Jolla, California, USA.
- Gerrodette, T., Eguchi, T. 2011. Precautionary design of a marine protected area based on a habitat model. *Endangered Species Research*, 15(2), 159–166. doi:10.3354/ESR00369
- Gómez-Gutiérrez, J., Robinson, C. J., Kawaguchi, S., Nicol, S. 2010. Parasite diversity of *Nyctiphanes simplex* and *Nematoscelis difficilis* (Crustacea: Euphausiacea) along the northwestern coast of Mexico. *Diseases of Aquatic Organisms*, 88(3), 249–266.
- Google. 2020. Mapa del océano Pacífico y la península de Baja California, México. Recuperado el 01 10 2020 de https://earth.google.com/web/@26.78627229,-110.55806816,2759736.20812843a,0d,35y,-5.7425h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=en.
- Guerrero, M., Urbán, J., Rojas, L. 2006. *Las ballenas del Golfo de California*. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). Ciudad de México.
- Guisan, A., Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2–3), 147–186. doi:10.1016/S0304-3800(00)00354-9
- Hastie, T. , Tibshirani, R. 1986. Generalized additive models (with discussion). *Statistical Science*, 1, 297–318.
- Hastie, T., Tibshirani, R. 1990. *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall.
- Haury, L. R., Venrick, E., Fey, C. L., McGowan, J. A., Niler, P. P. 1993. The Ensenada Front: July 1985. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 34, 69–88.
- Hays, G. C., Bailey, H., Bograd, S. J., Bowen, W. D., Campagna, C., Carmichael, R. H., Casale, P., Chiaradia, A., Costa, D. P., Cuevas, E., Nico de Bruyn, P. J., Dias, M. P., Duarte, C. M., Dunn, D. C., Dutton, P. H., Esteban, N., Friedlaender, A., Goetz, K. T., ... Sequeira, A. M. M. 2019. Translating Marine Animal Tracking Data into Conservation Policy and Management. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(5),

459–473. doi:10.1016/j.tree.2019.01.009

- Hazen, E. L., Palacios, D. M., Forney, K. A., Howell, E. A., Becker, E., Hoover, A. L., Irvine, L., DeAngelis, M., Bograd, S. J., Mate, B. R., Bailey, H. 2017. WhaleWatch: a dynamic management tool for predicting blue whale density in the California Current. *Journal of Applied Ecology*, 54(5), 1415–1428. doi:10.1111/1365-2664.12820
- Heckel, G., Ruiz Mar, M. G., Schramm, Y., Gorter, U. 2018. Atlas de Distribución y Abundancia de Mamíferos Marinos en México. Universidad Autónoma de Campeche.
- Hernández, B., Gaxiola-Castro, G., Najera-Martinez, S. 2004. Efectos del ENSO en la producción primaria frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, 30(3), 427–441.
- Hernández De la Torre, B., Aguirre Gómez, R., Gaxiola-Castro, G., Álvarez Borrego, S., Gallegos-García, A., Rosete Vergés, F., Bocco Verdinelli, G. 2015. Ordenamiento Ecológico Marino en el Pacífico Norte mexicano: propuesta metodológica. *Hidrobiológica*, 25(2), 151–163.
- Hijmans, R. J. 2021. geosphere: Spherical Trigonometry. R package version 1.5-14. <https://CRAN.R-project.org/package=geosphere>.
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks-cold spring harbor symposia on quantitative biology. Reprinted in 1991: classics in theoretical biology. *Bulletin of Mathematical Biology*, 53(1507), 193–213.
- International Whaling Commission, I. 1988. 38th Report of the International Whaling Commission (Vol. 1). London.
- Irvine, L. M., Mate, B. R., Winsor, M. H., Palacios, D. M., Bograd, S. J., Costa, D. P., Bailey, H. 2014. Spatial and Temporal Occurrence of Blue Whales off the U.S. West Coast, with Implications for Management. *PLoS ONE*, 9(7), e102959. doi:10.1371/journal.pone.0102959
- Katona, S., Whitehead, H. 1988. Are cetacea ecologically important. *Oceanogr Mar Biol Annu Rev*, 26, 553–568.
- Kenney, R. D., Scott, G. P., Thompson, T. J., Winn, H. E. 1997. Estimates of prey consumption and trophic impacts of cetaceans in the USA northeast continental shelf ecosystem. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 22.
- Kurczyn, J. A., Beier, E., Lavín, M. F., Chaigneau, A. 2012. Mesoscale eddies in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C10), n/a-n/a. doi:10.1029/2012JC007970
- Leatherwood, S., Goodrich, K., Kinter, A. L., Truppo, R. M. 1982. Respiration patterns and 'sightability' of whales. *Rep. Int. Whal. Commn*, 32, 601–613.
- Leatherwood, S., Reeves, R. ., Perrin, W. ., Evans, W. ., Hobbs, L. J. 1988. Ballenas, delfines y marsopas del Pacífico nororiental y de las aguas árticas adyacentes: Una guía para su identificación. En Comisión Interamericana del Atún Tropical (IATTC), Inf. Esp. No. (Vol. 8). La Jolla, California, USA.
- Lockyer, C. 1981. Growth and energy budgets of large baleen whales from the Southern Hemisphere. *Food and Agriculture Organization*, 3, 379-487.

- Longhurst, A., Etnoyer, P., Canny, D., Mate, B., Morgan, L. 2004. The answer must be red crabs, of course. *Oceanography*, 17(2), 6–7.
- Lynn, R., Simpson, J. 1987. The California Current system: the seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, 92, 12947–12966.
- Mangel, M., Marinovic, B., Pomeroy, C., Croll, D. 2002. Requiem for Ricker: unpacking MSY. *Bulletin of marine science*, 70(2), 763–781.
- Mann, K. H., Lazier, J. R. 2006. *Dynamics of marine ecosystems: Biologicalphysical interactions in the oceans* (3rd ed.). Blackwell Publishing: Dartmouth, Nova Scotia, Canada.
- Marsh, H., Sinclair, D. F. 1989. Correcting for visibility bias in strip transect aerial survey of aquatic fauna. *The Journal of Wildlife Management*, 53(4), 1017–1024. doi:<https://doi.org/10.2307/3809604>
- Mate, B. R., Lagerquist, B. A., Calambokidis, J. 1999. Movements of North Pacific blue whales during the feeding season off southern California and their southern fall migration. *Marine Mammal Science*, 15(4), 1246–1257. doi:10.1111/j.1748-7692.1999.tb00888.x
- Medrano, L., Vázquez, M. J. 2012. Impactos antropogénicos a los mamíferos marinos en el Golfo de California y la costa Pacífica de Baja California. Informe final al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. UNAM, 25.
- Moore, S. E. 2008. Marine mammals as ecosystem sentinels. *Journal of Mammalogy*, 89(3), 534–540. doi:10.1644/07-mamm-s-312r1.1
- Morales-Zarate, M. V., Lluch-Cota, S. E., Serviere-Zaragoza, E., Guzmán del Próo, S. 2011. Modeling an exploited rocky coastal ecosystem: Bahía Tortugas, Mexico. *Ecological Modelling*, 222, 1185–1191.
- Muller-Karger, F. E., Walsh, J. J., Evans, R. H., Meyers, M. B. 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperatura cycles of the Gulf of Mexico as determined by satélites. *Journal of Geophysics Research*, 96(12), 645–665.
- NASA. 2020. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Chlorophyll Data; 2018 Reprocessing. Goddard Space Flight Center Ocean Ecology Laboratory Ocean Biology Processing Group. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi:[data/10.5067/AQUA/MODIS/L3M/CHL/2018](https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/L3M/CHL/2018)
- Nemoto, T. 1957. Foods of baleen whales in the northern Pacific. *Sci. Rep. Whales Res. Inst.*, 12, 33–89.
- Nemoto, T. 1959. Foods of baleen whales with reference to whale movements. *Sci. Rep. Whales Res. Inst.*, 14, 149–290.
- Nemoto, T. 1970. Feeding pattern of baleen whales in the ocean. En *Marine Food Chains*. University of California Press: Berkeley. pp. 241–252.
- NOAA. 2022. Seafloor Gradient. Recuperado el 20 01 2022 de https://oceanview.pfeg.noaa.gov/products/seafloor_gradient/downloads.
- Palacios, D., Mate, B., Bailey, H., Irvine, L., Bograd, S., Costa, D. 2011. Migration routes and ecology of the Northeast Pacific blue whale. *Workshop on Integration, Mapping and GIS Analysis of Large Cetacean Migration Routes, Critical Habitats and Human Threats in the Eastern Pacific*, pp. 26-28.

- Pardo, M. A., Gerrodette, T., Beier, E., Gendron, D., Forney, K. A., Chivers, S. J., Barlow, J., Palacios, D. M. 2015. Inferring cetacean population densities from the absolute dynamic topography of the ocean in a hierarchical bayesian framework. *PLoS ONE*, 10(3). doi:10.1371/journal.pone.0120727
- Parés-Sierra, A., López, M., Pavía, E. G. 1997. Oceanografía Física del Océano Pacífico Nororiental. 1-24p. En: Lavín M.F. (ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Monografía N°3, Unión Geofísica Mexicana.
- Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R., Torres, F. 1998. Fishing Down Marine Food Webs. *Science*, 279(5352), 860–863. doi:10.1126/science.279.5352.860
- Pauly, D., Trites, A. W., Capuli, E., Christensen, V. 1998. Diet composition and trophic levels of marine mammals. *ICES Journal of Marine Science*, 55(3), 467–481. doi:10.1006/jmsc.1997.0280
- Pérez-Brunius, P., López, M., Parés-Sierra, A., Pineda, J. 2007. Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.*, 48, 204–214.
- Peterson, A. T., Soberón, J. 2012. Species distribution modeling and ecological niche modeling: Getting the Concepts Right. *Natureza a Conservação*, 10(2), 102–107. doi:10.4322/natcon.2012.019
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., Araújo, M. B. 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions (MPB-49)*. Ecological Niches and Geographic Distributions (MPB-49), Princeton University Press. doi:10.1515/9781400840670
- Phillips, S. J., Dudík, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161–175. doi:10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x
- Praca, E., Gannier, A., Das, K., Laran, S. 2009. Modelling the habitat suitability of cetaceans: example of the sperm whale in the northwestern Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(4), 648–657.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado el 21 01 2022 de <https://www.r-project.org/>.
- Redfern, J., Ferguson, M., Becker, E., Hyrenbach, K., Good, C., Barlow, J., Kaschner, K., Baumgartner, M., Forney, K., Ballance, L., Fauchald, P., Halpin, P., Hamazaki, T., Pershing, A., Qian, S., Read, A., Reilly, S., Torres, L., Werne, F. 2006. Techniques for cetacean habitat modeling. *Marine Ecology Progress Series*, 310, 271–295. doi:10.3354/meps310271
- Reilly, S. B., Thayer, V. G. 1990. BLUE WHALE (BALAENOPTERA MUSCULUS) DISTRIBUTION IN THE EASTERN TROPICAL PACIFIC. *Marine Mammal Science*, 6(4), 265–277. doi:10.1111/J.1748-7692.1990.TB00357.X
- Rice, D. W. 1974. Whales and whale research in the eastern North Pacific. *The Whale Problem: A Status Report*. En Harvard Press (W.E. Schev). Cambridge, MA, USA.
- Rice, D. W. 1978. Blue whale. *Marine mammals of the Eastern Pacific and Arctic waters*. En Pacific Search Press. Seattle.
- Risting, S. 1922. Av hvalfangstens historie / ved Sigurd Risting, med portrætter, illustrationer og karter. doi:10.5962/bhl.title.16212.

- Roden, G. I. 1971. Aspects of the transition zone in the Northeastern Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 76(15), 3462–3475. doi:10.1029/JC076i015p03462
- Saha, K., Zhao, X., Zhang, H., Casey, K. S., Zhang, D., Baker-Yeboah, S., Kilpatrick, K. A., Evans, R. H., Ryan, T., Relph, J. M. 2018. AVHRR Pathfinder version 5.3 level 3 collated (L3C) global 4km sea surface temperature for 1981-Present. doi: 10.7289/v52j68xx
- Santamaría-del-Angel, E., Alvarez-Borrego, S., Müller-Karger, F. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 99, 7411–7421.
- Santora, J. A., Sydeman, W. J., Schroeder, I. D., Wells, B. K., Field, J. C. 2011. Mesoscale structure and oceanographic determinants of krill hotspots in the California Current: Implications for trophic transfer and conservation. *Progress in Oceanography*, 91(4), 397–409. doi:10.1016/J.POCEAN.2011.04.002
- Scammon, C. M. 1874. *The Marine Mammals of the Northwestern Coast of North America: Described and Illustrated Together with an Account of the American Whale-fishery*. En Carmary and Co. San Francisco.
- Schoenherr, J. R. 1991. Blue whales feeding on high concentrations of euphausiids around Monterey Submarine Canyon. *Canadian Journal of Zoology*, 69(3), 583–594. doi:10.1139/Z91-088
- Sears, R. 1987. The photographic identification of individual blue whale (*Balaenoptera musculus*) in the Sea of Cortez. *Cetus*, 7(1), 14–17.
- Sears, R., Perrin, W. F. 2018. Blue Whale: *Balaenoptera musculus*. En W. Perrin, B. Würsig, & J. Thewissen (Eds.), *Encyclopedia of Marine Mammals*. doi:10.1016/B978-0-12-804327-1.00070-4
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. En *Diario Oficial de la Federación*. 30 de diciembre de 2010, Segunda Sección. México.
- Slijper, E. J. 1962. *Whales*. Hutchinson, London.
- Smith, W. H. F., Sandwell, D. T. 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277(5334), 1956–1962. doi:10.1126/SCIENCE.277.5334.1956
- Soberon, J., Peterson, A. T. 2005. Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics*, 2(0). doi:10.17161/BI.V2I0.4
- Soberón, J. 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10(12), 1115–1123. doi:10.1111/J.1461-0248.2007.01107.X
- Stafford, K. M., Nieukirk, S. L., Fox, C. G. 1999. An acoustic link between blue whales in the Eastern Tropical Pacific and the Northeast Pacific. *Marine Mammal Science*, 15, 1258–1268.
- Taylor, B. L. 1997. Defining “population” to meet management objectives for marine mammals. *Molecular Genetics of Marine Mammals*, 3, 49–65.
- Tomilin, A. G. 1967. *Mammals of the USSR and adjacent countries*, Vol. 9, Cetacea. Israel program for

scientific translations, Jerusalem.

- Tønnessen, J. N., Johnsen, A. O. 1982. The history of modern whaling. En University of California Press.
- Torres, A., Esquivel, C., Ceballos, G. 1995. Diversidad y conservación de los mamíferos marinos de México. *Revista Mexicana de Mastozoología*, (1): 22- 43. *Revista Mexicana de Mastozoología*, (1): 22-43.
- Ugalde, A. 2008. Abundancia y tasa de supervivencia de ballenas azules en el Golfo de California. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas - Instituto Politécnico Nacional. 76 pp.
- Ugalde de la Cruz, A. 2015. Movimientos migratorios, estructura poblacional y tasa de supervivencia de las ballenas azules del Pacífico Noereste con base en datos de foto-identificación. 75 pp.
- Wade, L. S., Friedrichsen, G. L. 1979. Recent sighting of the Blue whale (*Balaenoptera musculus*) in the Northeastern Tropical Pacific. *Fishery Bulletin*, 76(4), 915–919.
- Wessel, P., Smith, W. H. F. 1996. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 101(4), 8741–8743. doi:10.1029/96jb00104
- Wood, S. N. 2011. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)*, 73(1), 3–36.
- Yochem, P. K., Leatherwood, S. 1985. Blue whale, *Balaenoptera musculus* (Linnaeus, 1758). En S. H. Ridgway & R. Harrison (Eds.), *Handbook of Marine Mammals*, vol. 3, *The Sirenians and Baleen Whales* (Vol. 3). doi:10.2517/PRPSJ.8.155
- Zuria-Jordan, I. L., Álvarez-Borrego, S., Santamaría-del Ángel, E. Müller-Karger, F. E. 1995. Estimación de biomasa fitoplanctónica, derivada de datos de satélite, frente a Baja California Sur. *Ciencias Marinas*, 21(3), 265–280.

Anexos

Anexo A

Tabla 5. Tabla del esfuerzo de muestreo por año

Año	Km de esfuerzo	Nº de transectos	Nº transectos en barco	Nº transectos en avioneta
1994	5979.5230	986	897	89
1996	9281.7739	1381	498	883
1997	104.9802	15	15	0
1998	225.5060	39	39	0
2005	103.3420	17	17	0
2017	3390.5703	578	0	578
2018	9589.6858	1632	0	1632
2019	5079.6112	875	0	875
2020	2420.1451	387	0	387

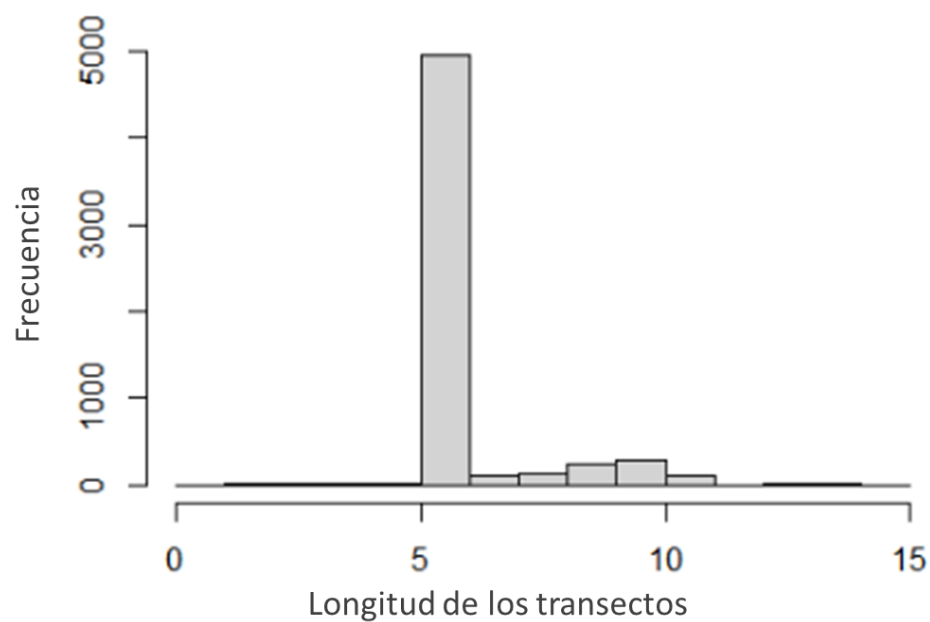


Figura 12. Histograma de la división del esfuerzo de muestreo en transectos

Anexo B

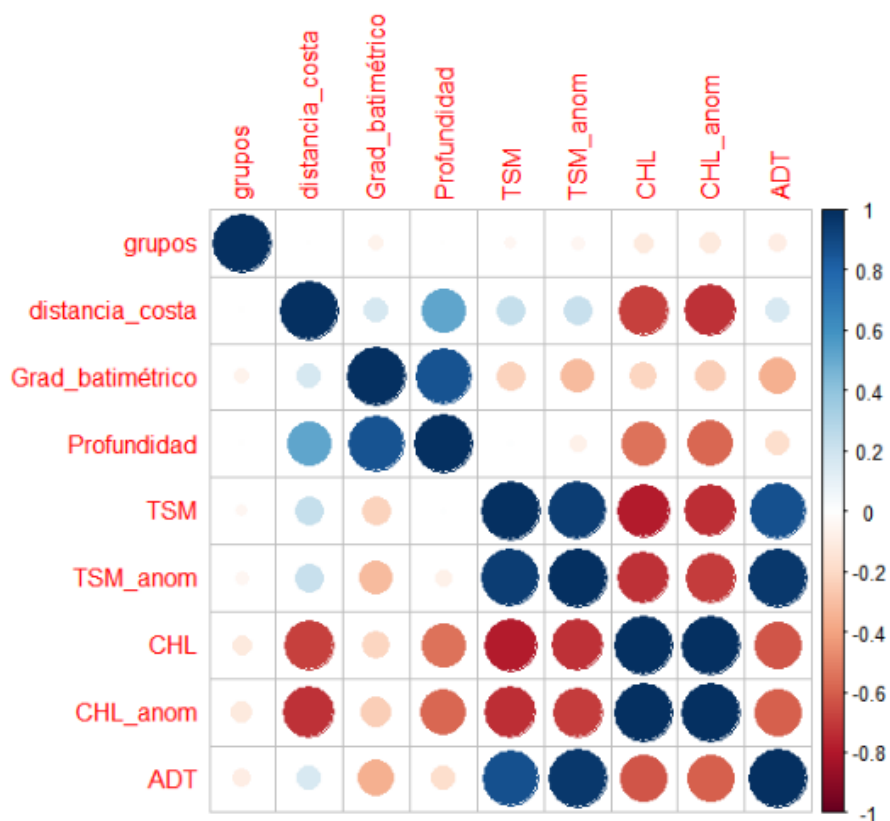


Figura 13. Matriz de correlación de Pearson entre los grupos de rorcuales azules en cada transecto y las variables oceanográficas probadas.

Tabla 6. Tabla de valores de correlación entre las variables empleadas

	Grupos	DC	GB	P	TSM	TSM _{anom}	CHL	CHL _{anom}	ADT
Grupos	1.00	0.00	-0.03	0.01	-0.05	-0.06	-0.10	-0.11	-0.11
DC	0.00	1.00	0.17	0.52	0.23	0.22	-0.68	-0.72	0.15
GB	-0.03	0.17	1.00	0.86	-0.23	-0.32	-0.19	-0.22	-0.40
P	0.01	0.52	0.86	1.00	0.00	-0.09	-0.52	-0.56	-0.20
TSM	-0.05	0.23	-0.23	0.00	1.00	0.95	-0.78	-0.74	0.86
TSM _{anom}	-0.06	0.22	-0.32	-0.09	0.95	1.00	-0.73	-0.70	0.95
CHL	-0.10	-0.68	-0.19	-0.52	-0.78	-0.73	1.00	1.00	-0.62
CHL _{anom}	-0.11	-0.72	-0.22	-0.56	-0.74	-0.70	1.00	1.00	-0.60
ADT	-0.11	0.15	-0.40	-0.20	0.86	0.95	-0.62	-0.60	1.00

Anexo C

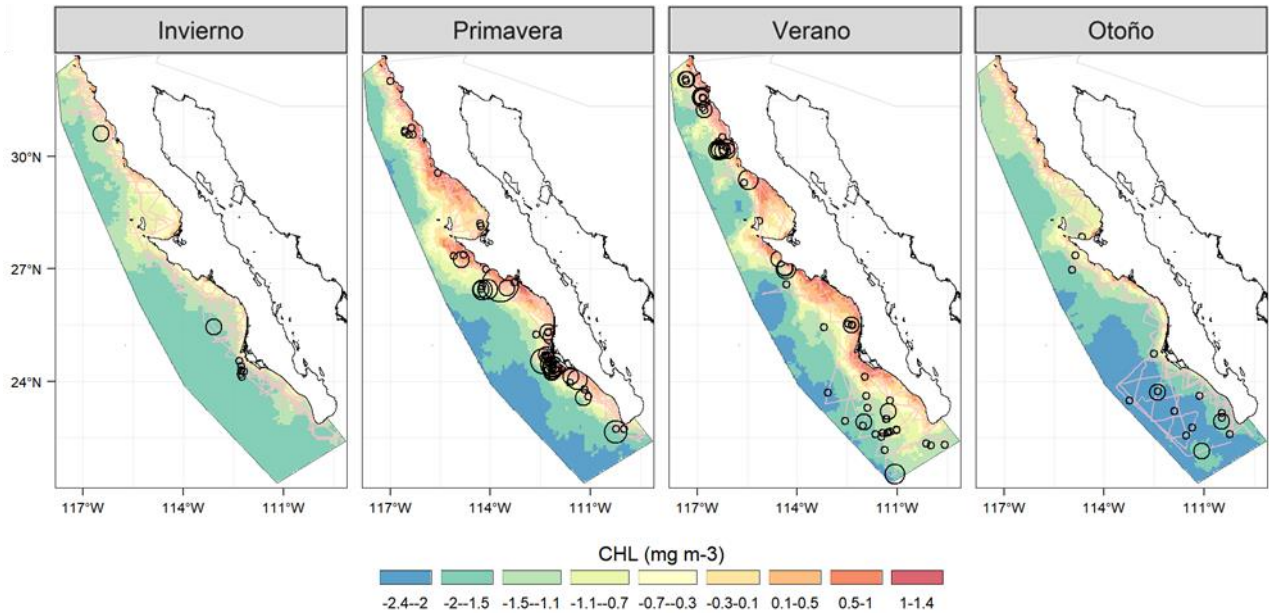


Figura 14. Mapa estacional de concentración de concentración superficial de clorofila-*a*. En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los círculos negros a los avistamientos. El tamaño de los círculos de los avistamientos representa el número de grupos de animales avistados en cada estación.

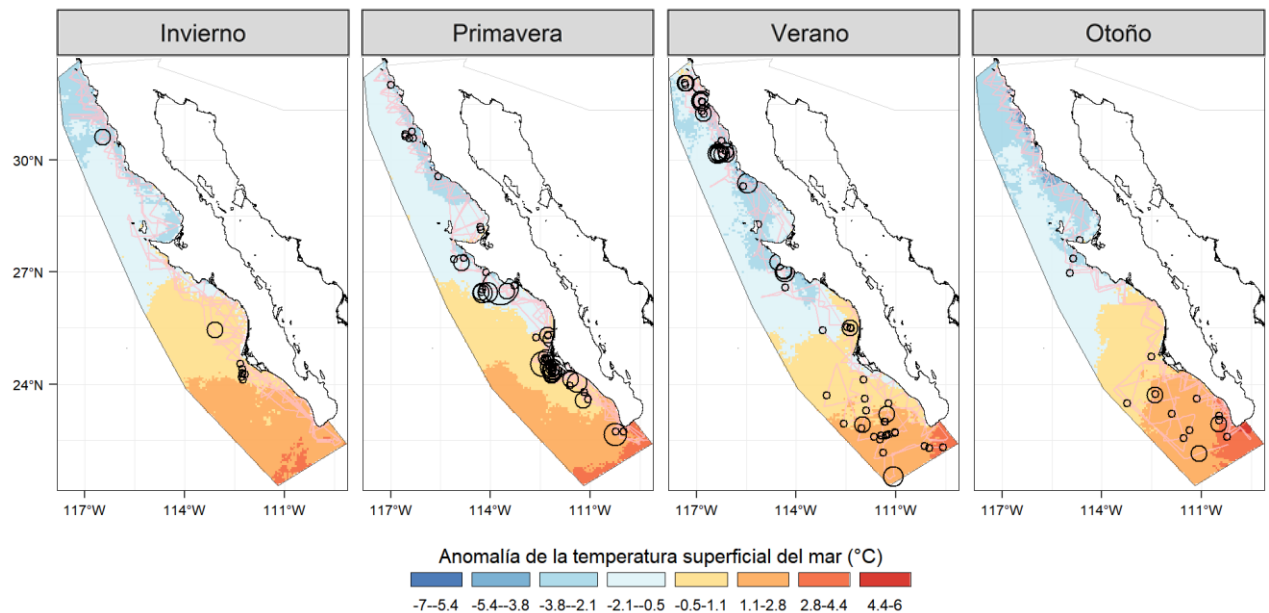


Figura 15. Mapa estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar. En rosa, las líneas corresponden al esfuerzo de muestreo y los círculos negros a los avistamientos. El tamaño de los círculos de los avistamientos representa el número de grupos de animales avistados en cada estación.