

UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza

PROYECTO DE GRADO

DEFINICIÓN DE HÁBITATS CRÍTICOS PARA LA CONSERVACIÓN DE LA BALLENA AZUL (Balaenoptera musculus) EN CHILE

Proyecto de grado presentado como parte de los requisitos para optar al grado de Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza.

PRISCILA BELÉN ESCOBAR GIMPEL

Médico Veterinaria SANTIAGO-CHILE 2016 Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al grado de Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza

Profesor Guía	Nombre	Jaime Hernández Palma
	Nota	7,0
	Firma	
Profesor Consejero	Nombre	Alejandro Simeone C.
	Nota	7,0
	Firma	
Profesor Consejero	Nombre	Benito González
	Nota	7,0
	Firma	

Agradecimientos
Agradezco de corazón a quienes han creido en mi, en este trabajo y me han apoyado incondicionalmente todos estos años

TABLA DE CONTENIDO

RES	SUMEN	4
ABS	STRACT	5
1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo General	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3.	MATERIAL Y MÉTODO	13
3.1	Área de estudio	13
3.2	Datos de Ballena azul	14
3.3	Datos de variables ambientales	14
3.4	Identificación de variables ambientales relevantes (objetivo específico 1)	16
3.5	Definición de hábitats críticos (objetivo específico 2)	16
4.	RESULTADOS	19
4.1	Identificación de variables relevantes para explicar la distribución de la	
Ball	ena azul	19
4.2	Modelación de distribución de especies y definición de hábitats críticos	20
5.	DISCUSIÓN	29
5.1	Importancia ecológica de las variables seleccionadas	29
5.2	Distribución de especies	31
5.3	Implicancias en conservación y planificación espacial	35
5.4	Limitaciones y recomendaciones	38
6.	CONCLUSIONES	40
7.	BIBLIOGRAFÍA	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio correspondiente a las 200 millas marinas de ZEE continental de Chile
Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología de estudio
Figura 3. Correlación de Spearman para las variables seleccionadas. Todas altamente significativas (p < .0001)
Figura 4. Mapas del área de estudio muestran la modelación de probabilidad de ocurrencia de Ballena azul con Máxima Entropía y Random Forest22
Figura 5. Mapa del área de estudio con resultado del ensamble de modelos de distribución de Ballena azul
Figura 6. Mapa de las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de Ballena azul24
Figura 7. Mapa que muestra el área con mayor probabilidad de ocurrencia de Ballena azul y las amenazas incluidas en el estudio
Figura 8. Mapa con índice de riesgo en áreas con alta probabilidad de ocurrencia de Ballena azul
Figura 9. Relación entre el modelo de distribución de Ballena azul y las unidades biogeográficas del escosistema marino chileno, según se define en Escribano et al. (2003), las regiones de surgencias norte, centro/sur y fiordos australes corresponden a zonas separadas por discontinuidades oceanográficas y características biológicas distintivas del sistema pelágico. Mientras que las provincias Perú-Chile y Magallánica corresponden a los compartimentos biogeográficos del sitema bentónico

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables ambientales utilizadas en la modelación de distribución de Ballena azul. 15
Tabla 2. Frecuencia total y relativa de las variables más importantes durante las 10 iteraciones con MaxEnt y Random Forest, con todas las variables
Tabla 3. Frecuencia de cada variable en el lugar de importancia a lo largo de las 10 iteraciones posteriores con MaxEnt y Random Forest, solo con variables seleccionadas
Tabla 4. Rendimientos de los modelos. 21
Tabla 5. Rendimiento del modelo ensamblado. 21
Tabla 6. Valores de las variables en las zonas donde se distribuyen las presencias de ballenas azules y donde se predicen las mayores probabilidades de distribución según el modelo
Tabla 7. Superficies de áreas protegidas existentes y propuestas a nivel nacional38

RESUMEN

Las aguas chilenas albergan importantes zonas de alimentación para la Ballena azul (Balaenoptera musculus) durante la época estival y otoñal, particularmente en regiones australes. Sin embargo, poco se sabe acerca de los factores que influencian la selección de hábitat y distribución de la especie a nivel nacional. El presente estudio contribuye a la definición de hábitats críticos dentro de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Chile continental, a partir de la obtención de su distribución potencial e identificación de variables explicativas, mediante técnicas de Modelación de Distribución de Especies (Species distribution modeling, SDM), con notables ventajas metodológicas, utilizadas por primera vez en el estudio de cetáceos. Se logró identificar la clorofila-a (Chl-a), partículas orgánicas de carbono (POC), altura de la línea de fluorescencia normalizada (NFLH), radiación fotosintética disponible (PAR), temperatura marina superficial (SST) y la distancia a la costa, como las variables que mejor explican la distribución de la especie en el área de estudio. Se obtuvo su distribución potencial, a partir del ensamble de los modelos (AUC 0,94 \pm 0,01) ajustados y evaluados (MaxEnt, AUC 0,93 \pm 0,02; Ranfom Forest, varianza explicada 59,78% \pm 4,9, AUC 0,95 \pm 0,02). Esta modelación permitió definir un área de 167.204 km² de alta probabilidad de ocurrencia, coincidente, en cierta medida, con patrones de circulación oceánica y surgencias costeras. En esta área es posible distinguir dos zonas: una zona centro/norte (entre 26°S y 36°S, entre ~1-250 kms de la costa); y una zona sur (entre 37°S y 46°S, más cercana a la costa, ~50-60 kms de distancia máxima). Mediante la obtención de un "índice de riesgo", se advierte una mayor coocurrencia entre las amenazas incluidas en este estudio y los hábitats críticos de la zona sur. Adicionalmente, los análisis indican que solo un 0,009% del área definida como hábitat idóneo para la especie y un 0,01% de la ZEE continental, se encuentra protegida, lo que refleja el bajo nivel de protección que poseen importantes ecosistemas representativos de la biodiversidad nacional. Los resultados de este trabajo definen claras zonas de distribución potencial y prioritarias para orientar, de manera eficiente, esfuerzos de investigación y estrategias de conservación, que favorecería tanto a la Ballena azul, como a todo un ecosistema sustentado por áreas de alta productividad primaria e importancia ecológica.

Palabras claves: Ballena azul, Chile, modelación de distribución, hábitat crítico

ABSTRACT

Chilean waters harbour important feeding areas for the Blue whale (Balaenoptera musculus) during the summer and fall season, particularly in southern regions. Nevertheless, little is known about the factors that influence their habitat selection and distribution. This study contributes to the definition of critical habitat for the Blue whale within the Exclusive Economic Zone (EEZ) of continental Chile, obtaining their potential distribution and explanatory variables by different methods of Species Distribution Modeling (SDM). These models has notable methodological advantages and is being used for the first time in cetaceans research. It was possible to identify chlorophyll-a (Chl-a), particulate organic carbon (POC), normalized fluorescence line height (NFLH), photosynthetically available radiation (PAR), sea surface temperature (SST) and distance to shore, as the variables that best explain the specie distribution in the study area. Potential distribution was obtained from ensemble of methods (AUC 0.94 ± 0.01) adjusted and evaluated (Maxent, AUC 0.93 \pm 0.02; Ranfom Forest, variance explained 59.78% \pm 4 9 AUC 0.95 \pm 0.02). This modeling defined an area of 167,204 km² of high occurrence probability, associated with ocean circulation and coastal upwelling patterns. In this area it is possible to distinguish two zones: a central/north (26°S-36°S, ~1-250 kms off shore); and a southern zone (37°S-46°S, closer to the coast, ~50-60 kms max). To analyze the cooccurrence between threats and critical habitats occurred in the southern zone, the higher "risk index" was used. Furthermore, the analyses indicate that only 0.009% of the area defined as a suitable habitat for the Blue whale and 0.01% of the continental EEZ are protected, reflecting the low level of representative ecosystems protection with national significant biodiversity. This study provides valuable information about priority areas of potential distribution to efficiently conduct research efforts and conservation strategies that support both the Blue whale and a whole ecosystem supported by high primary productivity areas and of great ecological importance.

Key words: Blue whale, Chile, distribution modeling, critical habitat

1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes generales

Muy poco se sabe acerca del hábitat o ecología de muchas especies de cetáceos (Redfern *et al.*, 2006). En el caso de las ballenas, incluso en las especies más estudiadas, información acerca de su distribución y abundancia, tanto geográfica como temporal, es generalmente escasa en muchos lugares del mundo (IWC, 2011).

La Ballena azul, *Balaenoptera musculus* (Linnaeus 1758), se distribuye en todos los océanos (Reilly *et al.*, 2008), realiza migraciones estacionales entre las áreas de alimentación en altas latitudes en verano y zonas de reproducción en bajas latitudes en invierno (Sears & Calambokidis, 2002; Branch *et al.*, 2007). Pueden habitar tanto zonas costeras como pelágicas, sin embargo, se congregan para alimentarse, generalmente, al borde de la plataforma continental donde los afloramientos de nutrientes permiten la concentración de su alimento (Fiedler *et al.*, 1998; Schoenherr, 1991; Kieckhefer *et al.*, 1995).

En particular, la distribución de ballenas azules en el Hemisferio Sur se conoce escasamente y las brechas en su distribución son atribuídas, principalmente, a una cantidad insuficiente de estudios y esfuerzos de investigación, más que a una ausencia real en ciertas áreas (Branch *et al.*, 2007).

En el Pacífico Sudeste, los *peak* de avistamientos de ballenas azules han sido en meses de verano, mientras que de agosto a noviembre los registros son numerosos en las costas de Perú y Galápagos, con lo cual se infiere una migración desde aguas australes chilenas en verano, hacia regiones más norteñas en invierno (Branch *et al.*, 2007).

Diversos estudios de ballenas azules en Chile han destacado la importancia de la zona sur del país como área de alimentación para la especie, realizando investigaciones a largo plazo, principalmente de presencia y abundancia, en las regiones de Los Lagos y Aysén (Galletti-Vernazzani *et al.*, 2012; Hucke-Gaete *et al.*, 2004). Sin embargo, estudios que permitan analizar más en profundidad los factores que influencian la selección de hábitat y modelar la distribución de Ballena azul en todo Chile o en una zona del país, son escasos (Hucke-Gaete, 2004; Branch *et al.*, 2007; CPPS & PNUMA, 2012).

En relación al estado de sus poblaciones, se estima que la población mundial existente antes de la intensa caza ballenera, finalizada a mediados del siglo XX, se redujo

en un 70-90% (Reeves *et al.*, 1998; Reilly *et al.*, 2008). En el Pacífico Sudeste fueron cazadas principalmente en las costas de Chile y, en menor proporción, Perú y Ecuador (Clarke *et al.*, 1978; Ramírez, 1983; VanWaerebeek *et al.*, 1997; Williams *et al.*, 2011a).

En la actualidad, la población del Hemisferio sur se estima en alrededor de unos 2.300 individuos (IWC, 2015), mientras que en aguas chilenas, su tasa de avistamiento (~5 ballenas por 1.000 km) es consistente con una población de pocos miles de individuos (Reilly *et al.*, 2008).

Las amenazas antropogénicas, desde el fin de la ballenería comercial, incluyen colisión con embarcaciones, incremento del turismo de observación, enmallamiento con artes de pesca, contaminación química y acústica, además del cambio climático, que puede estar afectando la disponibilidad de presas en algunas zonas (Sears & Calambokidis, 2002; Reilly *et al.*, 2008).

Instrumentos para la conservación

En Chile, entre los aspectos legales que incluyen medidas relacionadas a la conservación de cetáceos, destaca la Ley Nº 20.293 que "Protege a los Cetáceos e Introduce Modificaciones a la Ley Nº 18.892 General de Pesca y Acuicultura" (Chile, M.Economía, Subpesca, 2008), mientras que a nivel mundial existen una serie de instancias donde Chile posee compromisos en relación a temas de conservación marina, entre los que destacan el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) y su Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020 (CDB, 2010).

La Ballena azul se encuentra catalogada En Peligro tanto a nivel nacional (Chile, Minsegpres, 2009), como internacional (IUCN, 2015). Además, se encuentra en el Apéndice I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, 2016) y de la Convención sobre la Conservación de Especies Migratorias de Animales Silvestres (CMS, 2015).

La información de abundancia y distribución de especies es una piedra angular de muchas estrategias de conservación de fauna silvestre (Williams *et al.*, 2006). Realizar estudios de selección de hábitat de la Ballena azul, amenazada tanto a nivel nacional como internacional, es claramente importante tanto para aumentar nuestro conocimiento acerca de su ecología, como para lograr monitorear eficazmente la recuperación de sus poblaciones y fomentar medidas de protección y manejo de áreas claves para su conservación.

Para definir áreas consideradas clave para la sobrevivencia de una población o especie, el término cada vez más utilizado en varios países es el de "hábitat crítico" (Clarke *et al.*, 2010), definido para cetáceos como: "Aquellas áreas específicas dentro del rango de distribución de una especie o población regularmente utilizada para realizar actividades esenciales para sobrevivir y mantener una tasa de crecimiento poblacional saludable. Las áreas más cruciales son las de alimentación y reproducción. También, es necesario tener en cuenta, las zonas utilizadas para otras actividades asociadas a la obtención de su alimento, socialización, cortejo, crianza, descanso y migración" (Hoyt, 2005; Clark *et al.*, 2010).

Modelación de Distribición de Especies (SDM)

Para definir estos hábitats críticos, una herramienta poderosa es la Modelación de Distribución de Especies (Species distribution modeling, SDM), utilizada cada vez más para abordar diversos estudios en ecología, biogeografía, evolución, efectos del cambio climático y biología de la conservación (Guisan & Thuiller, 2005).

La SDM corresponde a modelos empíricos que relacionan observaciones de campo con variables ambientales predictoras, basados usualmente en métodos estadísticos, lo cual permite una extrapolación espacial y temporal para obtener predicciones sobre distribuciones potenciales (Guisan & Zimmermann, 2000; Franklin, 2009; Soberon, 2012).

Existe una amplia diversidad de herramientas disponibles para la SDM (Guisan & Thuiller, 2005), desde métodos estadísticos más o menos convencionales hasta árboles de regresión, redes neuronales y ensamble de métodos, como los que se pueden realizar con BIOMOD, una plataforma informática, disponible a través del *software* R-project (Soberon, 2012; Guisan & Zimmermann, 2000). El enfoque de ensamble de modelos permite disminuir la incertidumbre metodológica al usar sólo un modelo (Araujo & New, 2007; Thuiller *et al.*, 2009). Entre las técnicas que incluye BIOMOD-2 se encuentran Máxima Entropía (MaxEnt) y Random Forest (RF) (Thuiller *et al.*, 2015).

El método MaxEnt, uno de los más usados en SDM (Hijmans & Elith, 2016), pertenece al grupo de los llamados "modelos máquinas de aprendizaje" para modelar con solo datos de presencia (Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011), utilizando un algoritmo de máxima entropía, logra resultados robustos en términos de la proyección espacial de la distribución (Peterson *et al.*, 2007).

El método RF pertenece al grupo de métodos de clasificaciones basadas en reglas (Guisan & Zimmermann, 2000), utiliza una combinación de árboles predictivos de decisión, otorgando resultados competitivos a través del *boosting* y *bagging* adaptativo (Breiman, 2001).

Ambos métodos poseen técnicas internas para determinar la importancia de las variables en la predicción de la probabilidad de ocurrencia (Peterson & Cohoon, 1999; Breiman, 2001) y sus resultados no se ven afectados por las correlaciones entre las mismas (Elith *et al.*, 2011; Prasad *et al.*, 2006).

El estudio de la selección de hábitat para conocer la distribución de ballenas azules y los factores que la influencian, es un tema de creciente interés entre los investigadores (Fiedler *et al.*, 1998; Etnoyer *et al.*, 2006; Munger *et al.*, 2009; Becker *et al.*, 2010; Gill *et al.*, 2011; Miller, 2012; Forney *et al.*, 2012; CPPS & PNUMA, 2012; Branch *et al.*, 2007; Barlow *et al.*, 2009; Kaschner *et al.*, 2006; Palacios *et al.*, 2011; Pardo *et al.*, 2015), quienes han utilizado principalmente modelos de regresión.

Variables ambientales

El número de posibles covariables ambientales, en un marco de modelación espacial, es potencialmente amplio (Williams *et al.*, 2006) y pueden ser colectadas por muestreo *in situ* o ser obtenidas indirectamente a través de sensores remotos (Redfern *et al.*, 2006).

Las variables obtenidas a partir de sistemas de observación satelital son de suma importancia en los estudios del medio ambiente marino, ya que los productos que se pueden obtener son parámetros relacionados con variados procesos oceanográficos y son utilizados para monitorear la salud de ecosistemas marinos claves (Cerdeira-Estrada. & López-Saldaña, 2011). Incluso, existen trabajos que sugieren que datos ambientales provenientes de sensores remotos entregan predicciones iguales o mejores que predicciones realizadas utilizando datos ambientales *in situ*, los cuales son difíciles de obtener a través de muestreos temporal y espacialmente sistemáticos (NOAA & CPPS, 2013).

Por las características de la red trófica marina, existen investigaciones que han relacionado la presencia de cetáceos con zonas de alta productividad primaria (Croll *et al.*, 2005; Félix & Escobar, 2011; Félix & Haase, 2001; Jaquet & Whitehead, 1996; Whitehead, 2002), mediante la concentración de clorofila-a (Chl-a), comunmente

utilizada para describir el contenido de fitoplancton en un cuerpo de agua (NASA, 2014), resultando ser, en ciertos casos, un estimador consistente de la distribución de distintas poblaciones de ballenas (Whitehead, 2002).

Las ballenas azules deben alimentarse constantemente para satisfacer sus altos requerimientos energéticos, por lo que sus movimientos están asociados, en gran medida, a la presencia de su alimento (Branch *et al.*, 2007; Palacios *et al.*, 2011), compuesto de organismos zooplanctónicos, principalmente krill, pudiendo consumir entre dos a cuatro toneladas al día. (Yochem & Leatherwood 1985; Sears & Calambokidis, 2002; Branch *et al.*, 2007).

El krill se alimenta principalmente de fitoplancton, siendo una pieza clave en la transferencia de energía desde los productores primarios hacia los niveles más altos de la cadena trófica, cumpliendo un importante rol en la funcionalidad de muchos ecosistemas marinos (Everson, 2008).

Diversos estudios de Ballena azul en el Pacífico oriental, Pacífico tropical, Canadá y Australia han encontrado, generalmente, la productividad primaria, zonas de surgencias, SST, profundidad y distancia a la plataforma continental, como los mejores indicadores de selección de hábitat. Algunos autores, además, sugieren una asociación con la Chl-a con desfases de uno a cuatro meses (Miller, 2012; Croll *et al.*, 2005; Visser *et al.*, 2011).

Definción de áreas de conservación

Los mamíferos marinos, en general, son objeto de interés en conservación y manejo, por el solapamiento espacial y ecológico con los intereses humanos sobre los océanos (Trites *et al.* 1997). Acuerdos internacionales recomiendan el desarrollo de técnicas apropiadas de modelamiento para identificar áreas de alta prioridad o *hotspots* (IWC, 2011).

La modelación de hábitat ha sido clave para identificar sitios de conservación y potenciales Áreas Marinas Protegidas (AMPs) para mamíferos marinos en muchas partes del mundo como Escocia, países del Pacífico noreste, Baja California, Sudafrica, Japón, Australia y Nueva Zelandia (Clark *et al.*, 2010; Williams *et al.*, 2011b; Pompa *et al.*, 2011), lo cual representa un gran avance en comparación al simple uso de información de ocurrencias de especies y tasas de encuentro (Cañadas *et al.*, 2005).

La SDM ha sido utilizada para estudios de densidad y distribución de cetáceos en distintas partes del mundo, ha permitido la identificación de áreas donde los datos pueden ser limitados, pudiendo proveer un entendimiento adicional acerca de potenciales interacciones antropogénicas con estas especies. El análisis de estos mapas de distribución junto con zonas de amenazas pueden ayudar a la priorización y consideración acerca de las acciones de protección que deben ser implementadas (Corrigan *et al.*, 2014).

Las AMPs han sido utilizadas exitosamente para la conservación de cetáceos, quienes como especies de alto movimiento, presentan desafíos en cuanto al desarrollo de medidas de conservación, particularmente, por los vacíos de conocimiento, por lo cual se recomienda desarrollar AMPs de manera precavida (Clark *et al.*, 2010). En este sentido, la SDM también es una herramienta útil para monitorear el funcionamiento de una AMP como instrumento de protección (Hoyt, 2011).

Los resultados de la SDM una vez integrada y mapeada junto a información biogeográfica, puede ser utilizada para procesos de planificación sistemática para la conservación (Margules & Pressey, 2000), cuyos objetivos, generalmente, estan dirigidos a proteger y promover la conservación de alguna fracción de la diversidad biológica de una región (Pressey *et al.*, 2007).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Definir zonas geográficas a nivel nacional que cumplan con ser hábitats críticos para la conservación de la Ballena azul durante la época estival y otoñal en Chile.

2.2 Objetivos Específicos

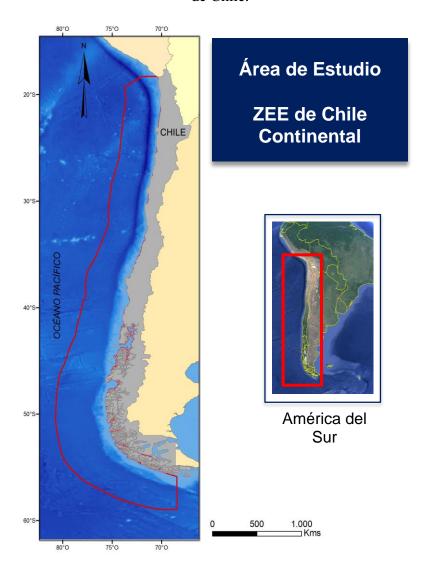
- 1) Identificar las variables ambientales que mejor explican la distribución de Ballena azul en el área de estudio durante la época estival y otoñal.
- 2) Obtener, a través de la modelación espacialmente explícita, la distribución potencial de la Ballena azul en sus áreas de alimentación que permita definir los hábitats críticos prioritarios para orientar de manera eficiente los esfuerzos y estrategias de conservación de la especie.

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1 Área de estudio

Se define como área de estudio la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Chile continental que corresponde a las 200 millas marinas contadas desde las líneas de base a partir de las cuales se mide la anchura del mar territorial.

Figura 1. Área de estudio correspondiente a las 200 millas marinas de ZEE continental de Chile.



3.2 Datos de Ballena azul

La información de los avistamientos de Ballena azul en Chile fue colecta desde la base de datos del Sistema de Información sobre Biodiversidad Marina y Áreas Protegidas del Pacífico Sudeste (SIBIMAP, 2014, www.sibimap.net), desarrollado por la Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS). Los datos disponibles en dicha plataforma, son extraídos desde publicaciones científicas y reportes sin publicar. De un total de 226 datos de avistamientos de Ballena azul disponibles en el SIBIMAP, se seleccionaron 155 entre los meses de diciembre y mayo, desde el año 2002 al 2007, años en los cuales hay mayor cantidad de datos disponibles. Otros 58 datos adicionales, se obtuvieron de Galletti-Vernazzani *et al.* (2012), entre los meses de febrero y abril, desde el año 2005 al 2010.

Para lograr un análisis consistente para todo el país y debido al sesgo que puede existir debido a la heterogeneidad espacial, temporal y metodológica de la obtención de datos de las fuentes, solo la información de presencia es de interés para el presente estudio, por lo cual no se utilizaron los datos de abundancia de ninguna de las fuentes de datos.

Mediante el *software* ArcGis v.10 (ESRI, 2011), se realiza un remuestreo a 9 km como distancia mínima, de los 213 datos de presencias seleccionados, con el fin de disminuir las pseudoreplicas y el sesgo en lugares que presentan estudios sistemáticos con mayor cantidad de avistamientos por año y ajustar los datos a la resolución de las variables ambientales. Finalmente, se utilizan para el modelamiento 164 datos de presencia.

3.3 Datos de variables ambientales

Para el modelamiento se utilizaron 16 variables ambientales (Tabla 1; Anexo1), las 12 primeras fueron obtenidas desde la base de datos de "Ocean Color Giovanni", plataforma que permite la visualización y análisis de datos oceanográficos, obtenidos por sensores remotos y procesados por el "Ocean Biology Processing Group" (OBPG), del "Goddard Space Flight Center" perteneciente a la "National Aeronautics and Space Administration" (NASA, 2014, http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/). La variable batimetría (ETOPO1) se obtuvo de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2014, http://www.ngdc.noaa.gov/).

Para cada variable ambiental se usó un promedio de los datos entre diciembre y mayo, desde el año 2002 al 2010. Para las variables de desfases de Chl-a se obtuvo el dato mensual desde agosto a noviembre, entre los años 2002 y 2009.

Aplicando una serie de procesos geoespaciales mediante los *softwares* ArcGis v.10 (ESRI, 2011) y QGis v.2.14.0 Essen (Quantum GIS Development Team, 2016), se calcularon las tres variables adicionales: distancia a la costa, pendiente y distancia a la isobata de 200 metros, estas dos últimas derivadas de la batimetría.

Tomando en cuenta la amplitud del área de estudio y el rango de movimiento de las ballenas azules, se utilizaron las variables a una resolución de 9 km x 9 km, realizando un remuestreo en el caso de aquellas obtenidas a una resolución distinta.

Tabla 1. Variables ambientales utilizadas en la modelación de distribución de Ballena azul.

Variable	Abreviación	Sensor	Resolución	Unidad
Concentración de clorofila a	Chl-a	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	mg/m ³
Temperatura marina superficial	SST	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	°C
Índice de coloración de materia orgánica disuelta	CDOM	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	m ⁻¹
Coeficiente de atenuación difusa	K490	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	nm
Altura normalizada de la línea de fluorescencia de la clorofila	NFLH	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	mWcm ⁻² μm ⁻¹ sr ⁻¹
Partículas inorgánicas de carbono	PIC	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	mg/m^3
Partículas orgánicas de carbono	POC	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	mg/m ³
Radiación fotosintética disponible	PAR	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	f*seg*m ²
Desfase de clorofila 1 mes	ChlNov	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	mg/m^3
Desfase de clorofila 2 meses	ChlOct	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	mg/m^3
Desfase de clorofila 3 meses	ChlSept	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	mg/m^3
Desfase de clorofila 4 meses	ChlAgo	MODIS- Aqua	9 km x 9 km	mg/m^3
Batimetría	ETOPO1	Modelo	1 arco de minuto	m
Pendiente		Derivada	1,5 km x 1,5 km	m
Distancia a la costa		Derivada	1 km x 1km	km
Distancia a la isobata de 200 metros		Derivada	1 km x 1km	km

Para visualizar las áreas que podrían estar amenazadas por actividades antropogénicas, información necesaria para establecer una priorización de zonas que pueden ser incluidas en análisis de propuestas de conservación, se calcularon dos variables de amenazas: distancia a las 55 principales ciudades costeras y puertos de Chile (con más de 500 hábitantes) y la distancia a 21 centros de cultivos marinos intensivos y extensivos, con producciones de 2 a cerca de 300.000 toneladas (FAO, 2005).

3.4 Identificación de variables ambientales relevantes (objetivo específico 1)

La SDM se realizó mediante el *software* R-Project v. 3.1.3 (R Core Team, 2015), con dos técnicas alternativas: MaxEnt y Random Forest (RF).

MaxEnt utiliza el parámetro Jacknife para el análisis de la contribución de cada variable a las características finales del modelo (Peterson & Cohoon, 1999). RF realiza una priorización de variables según su contribución en la reducción del error durante la creación de los árboles de decisión a través del *bagging* y selección aleatoria de las variables (Breiman, 2001).

Se dividió el conjunto de datos en dos subconjuntos: 80% para la calibración y 20% para la evaluación de los modelos (Hijmans & Elith, 2016). Este procedimiento se iteró 10 veces (*bootstrap*) para cada técnica (MaxEnt y RF) con el objetivo de analizar la estabilidad del *ranking* de variables más relevantes.

Se seleccionaron las variables más frecuentes para ambas técnicas dentro de los primeros ocho lugares, durante todos los remuestreos (Tabla 2). Con esta selección de variables se ejecutó nuevamente 10 iteraciones de cada técnica para obtener una distribución de los estadísticos de calidad y sus valores más probables.

El número de iteraciones se decidió en base a la estabilización de las variables de importancia y los estadísticos de rendimiento de los modelos.

Complementariamente, se realizó un análisis de correlación de Spearman entre las variables seleccionadas para idetificar asociaciones entre ellas y apoyar la discusión acerca de su relevancia.

3.5 Definición de hábitats críticos (objetivo específico 2)

Para el ensamble de modelos se utilizó el paquete BIOMOD2 v. 3.1-64 (Thuiller *et al.*, 2014) de R-Project, que permite calibrar los modelos para un conjunto de técnicas distintas, permitiendo fortalecer el análisis e interpretación de los resultados, disminuyendo la incertidumbre metodológica (Thuiller *et al.*, 2009; Thuiller *et al.*, 2015).

Para decidir si ambos modelos se utilizarían para el ensamble final, se utilizó el indicador umbral-independiente AUC (*Area Under the Curve*), correspondiente al área total bajo la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) que describe la tasa de identificación correcta de presencias (sensibilidad, en el eje y) contra la tasa de falsos positivos (1-especificidad, en el eje x). El valor del AUC varía de 0,5 a 1, donde el valor 0,5 se interpreta como predicciones aleatorias y valores sobre 0,5 indican rendimientos mejores que el azar (Franklin, 2009).

A partir del modelo ensamblado, se seleccionaron las áreas que resultaron con probabilidades de presencia sobre 14% en la SDM (Figura 7), utilizando la suma máxima entre verdaderos positivos y negativos (max TPR+TNR=0,14), como umbral para el establecimiento de celdas de presencia o ausencia (Hijmans & Elith, 2016). En base a lo recomendado por Guénette & Villard (2014), para elegir este "punto de corte" se utilizó el punto en el que se maximizan sensibilidad y especificidad, ya que ofrece la mejor discriminación entre las presencias y ausencias predichas.

Con el objetivo de identificar las zonas prioritarias que podrían ser incluidas en procesos de planificación de áreas protegidas para Ballena azul, se realizó una consulta a 15 expertos pertenecientes a instituciones de educación, investigación y gobierno de distintos países (Anexo 2), para definir factores de peso otorgados a la probabilidad de ocurrencia resultante de la SDM y las variables indicadoras de amenazas dentro de una función de valor de protección (MOPT, 1992).

Siguiendo las recomendaciones de expertos, se utilizó el método de Williams *et al.* (2015) para obtener un "índice de riesgo" a través del producto entre la probabilidad de ocurrencia y las zonas de riesgo, con el fin de lograr visualizar dónde existe una mayor co-ocurrencia entre las amenazas incluidas en este estudio y los hábitats críticos de ballenas azules (Figura 8).

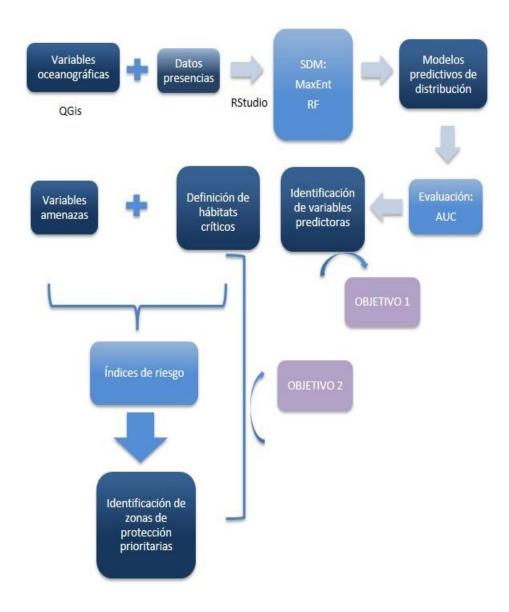


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología de estudio.

4. RESULTADOS

4.1 Identificación de variables relevantes para explicar la distribución de la Ballena azul

Las variables seleccionadas corresponden a la radiación fotosintética disponible (PAR), temperatura marina superficial (SST), clorofila-a (Chl-a), partículas orgánicas de carbono (POC), distancia a la costa y altura de la línea de fluorescencia normalizada (NFLH), las cuales fueron utilizadas para las modelaciones posteriores (Tabla 3).

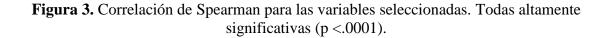
Tabla 2. Frecuencia total y relativa de las variables más importantes durante las 10 iteraciones con MaxEnt y Random Forest, con todas las variables.

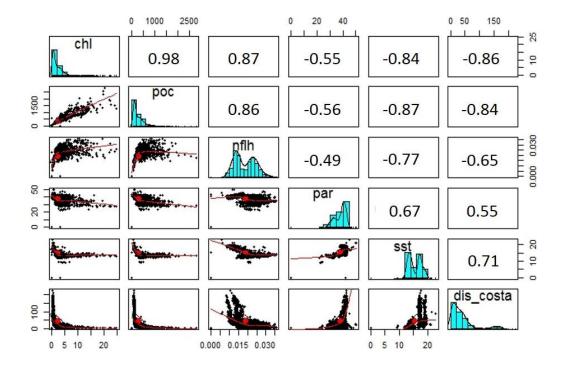
Variable	MaxEnt	RF	Frecuencia sumada
PAR	10	10	1
SST	10	10	1
Chl-a	9	10	0,95
POC	8	10	0,9
Distancia a la costa	9	5	0,7
NFLH	8	5	0,65

Tabla 3. Frecuencia de cada variable en el lugar de importancia a lo largo de las 10 iteraciones posteriores con MaxEnt y Random Forest, solo con variables seleccionadas.

Orden de importancia	Variable	Frecuencia en el lugar de importancia
1	Chl-a	0,75
2	POC	0,5
3	NFLH	0,5
4	PAR	0,4
5	SST	0,55
6	Distancia a la	0.6
	costa	0,6

La matriz de correlación de la variables seleccionadas (Figura 3) muestra altas correlaciones entre las variables estimadoras de fitoplancton (Chl-a, POC, NFLH), siendo las más altas las de Chl-a con POC (r=0,98), NFLH (r=0,87), SST (r=-0,84) y distancia a la costa (r=-0,86); POC con NFLH (r=0,86), SST (r=-0,86) y distancia a la costa (r=-0,83).





4.2 Modelación de distribución de especies y definición de hábitats críticos

Ambas técnicas de modelamiento resultaron con altos rendimientos y las predicciones se ajustan bien a las zonas con datos de presencias de la especie (Figura 4). A partir de los modelos ajustados con RF se obtuvo una varianza explicada de $59,78\% \pm 4,9 \, y$ un AUC de $0,95 \pm 0,02$, muy similar a MaxEnt con un AUC de $0,93 \pm 0,02$. Por lo que finalmente se obtuvo un modelo ensamblado de RF y MaxEnt con un valor AUC ponderado de $0,94 \pm 0,01$ (Tabla 4 y 5).

El modelo ensamblado final (Figura 5) muestra mayores probabilidades de ocurrencia de ballenas azules en dos zonas muy marcadas (Figura 6). La primera, una zona centro/norte entre los 26°S y 36°S con una distribución costera pero también más pelágica (~1-250 kms de la costa). La segunda, una zona sur, entre los 37°S y 46°S aproximadamente, donde las mayores probabilidades se concentran más cerca de la costa (distancia máxima ~50-60 km).

Tabla 4. Rendimientos de los modelos.

MaxEnt				Random Forest		
Modelo	AUC	max TPR+TNR	AUC	%Var explicada	max TPR+TNR	
1	0,94	0,25	0,97	65,87	0,22	
2	0,91	0,06	0,94	66,37	0,09	
3	0,95	0,18	0,97	57,24	0,15	
4	0,96	0,10	0,96	53,99	0,18	
5	0,94	0,16	0,95	56,89	0,08	
6	0,92	0,13	0,96	53,02	0,13	
7	0,94	0,26	0,94	60,27	0,19	
8	0,93	0,06	0,94	59,95	0,14	
9	0,91	0,02	0,93	64,4	0,17	
10	0,95	0,14	0,94	61,15	0,20	
Promedio	0,93	0,13	0,95	59,78	0,15	
SD	0,02	0,09	0,02	4,95	0,05	

Tabla 5. Rendimiento del modelo ensamblado.

	AUC	max TPR+TNR
RF	0,95	0,15
MaxEnt	0,93	0,13
Promedio	0,94	0,14
SD	0,01	0,01

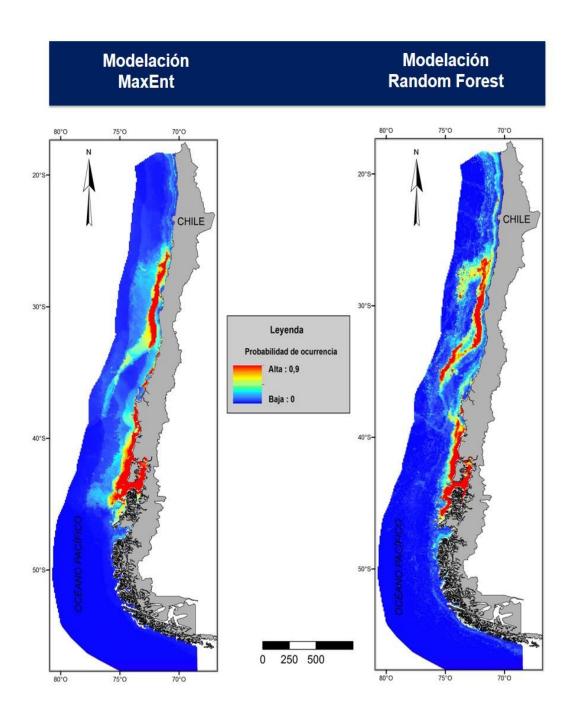


Figura 4. Mapas del área de estudio muestran la modelación de probabilidad de ocurrencia de Ballena azul con Máxima Entropía y Random Forest.

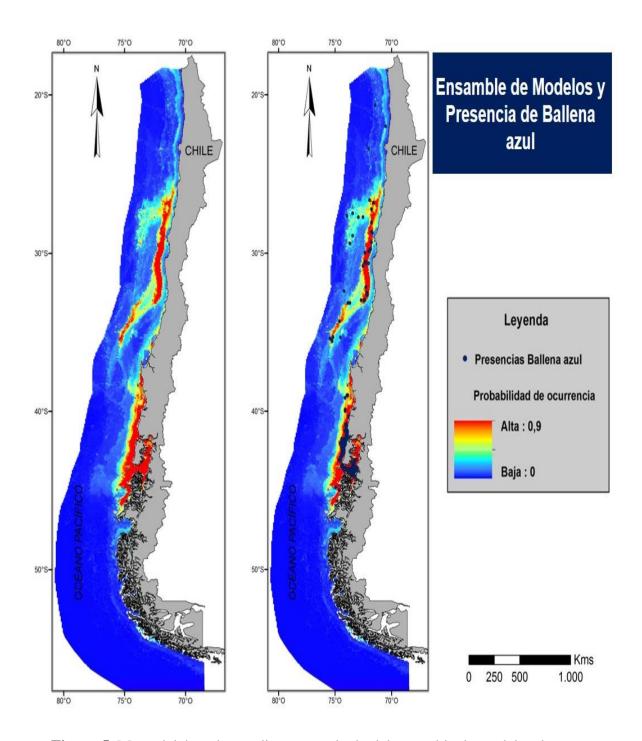


Figura 5. Mapa del área de estudio con resultado del ensamble de modelos de distribución de Ballena azul.

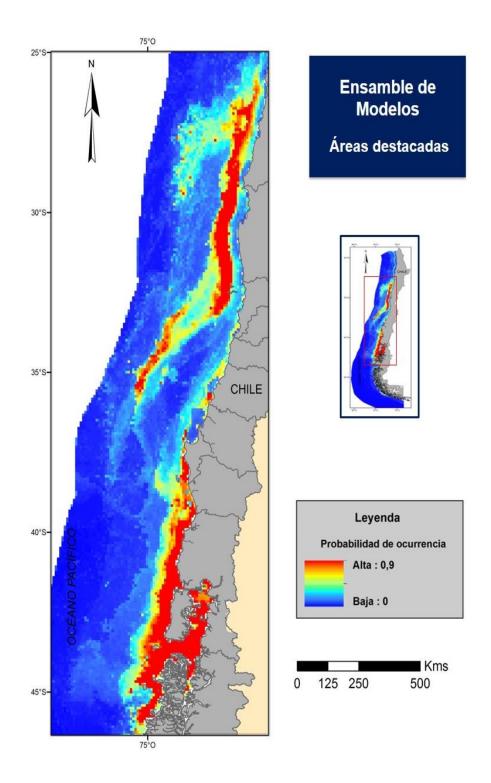


Figura 6. Mapa de las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de Ballena azul en Chile.

Los mayores valores de probabilidad de ocurrencia de ballenas azules (>14%) se observan en áreas donde los rangos de variables son muy similares a aquellos donde existen datos de presencias de la especie (Tabla 6).

Tabla 6. Valores de las variables en las zonas donde se distribuyen las presencias de ballenas azules y donde se predicen las mayores probabilidades de distribución según el modelo.

Vari	able	Presencias	Modelo (>90%)	Modelo (>14%)
Chl o	Rango	0,27-13,44	3,2-6,13	0,029-24,66
Chl-a	Promedio \pm SD	$3,66 \pm 2,62$	$4,5\pm0,84$	$2,49 \pm 2,94$
DOC	Rango	73,3-2737,94	394, 02- 779,25	76,23-2786
POC	Promedio \pm SD	$461,25 \pm 328,64$	557,9 ± 103,78	324,4 ± 294,73
NFLH	Rango	0,01-0,03	0,02-0,03	0,005-0,03
	Promedio \pm SD	$0,\!02\pm0,\!01$	$0,02 \pm 0,001$	$0,\!02\pm0,\!01$
PAR	Rango	29,23-49,59	32,41-36,57	21,95-50,04
	Promedio \pm SD	$35,92 \pm 3,79$	$34,47 \pm 1,02$	$37,75 \pm 4,54$
SST	Rango	12,26-22,88	12,82-13,76	9,07-22,82
	Promedio \pm SD	$14,42 \pm 2,17$	$13,\!4\pm0,\!27$	$15,5 \pm 2,25$
Distancia a la costa	Rango	0-218,54	5,05-19,46	0,49-251
	Promedio \pm SD	$32,49 \pm 47,38$	$10,87 \pm 3,84$	$49{,}74\pm52$

A partir de la distribución estimada de la especie (modelo esamblado final, Figura 5 y 6) se define un área de alta probabilidad de ocurrencia de ballenas azules (> 14%) con una superficie de 167.204 km² dentro de la ZEE continental. Esta zona, se puede considerar como hábitat idóneo para la presencia de ballenas azules en Chile.

Exisitió consenso entre los 10 expertos que respondieron la consulta, quienes prefirieron no otorgar factores de peso a la probabilidad de ocurrencia y las amenazas,

destacando que éstos pueden ser útiles en casos que existan diferencias en la certeza y calidad de los datos o para evaluar riesgos multifactoriales con distintas consideraciones. Además, destacan que lo más utilizado para el análisis espacial de riesgos, es el solapamiento entre la distribución de especies y los factores de riesgo escogidos para cada estudio (Figura 7).

El análisis del "índice de riesgo" muestra una mayor co-ocurrencia entre las amenazas incluidas en este estudio y los hábitats críticos de ballenas azules en la zona sur (Figura 8).

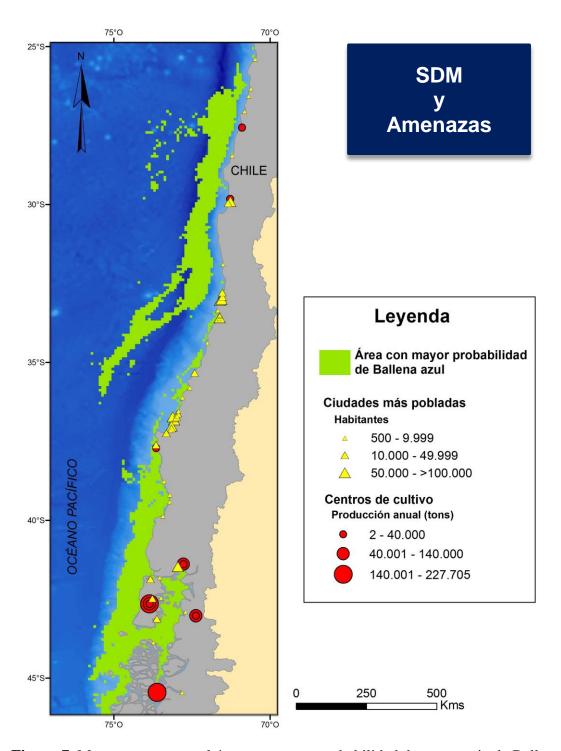


Figura 7. Mapa que muestra el área con mayor probabilidad de ocurrencia de Ballena azul y las amenazas incluidas en el estudio.

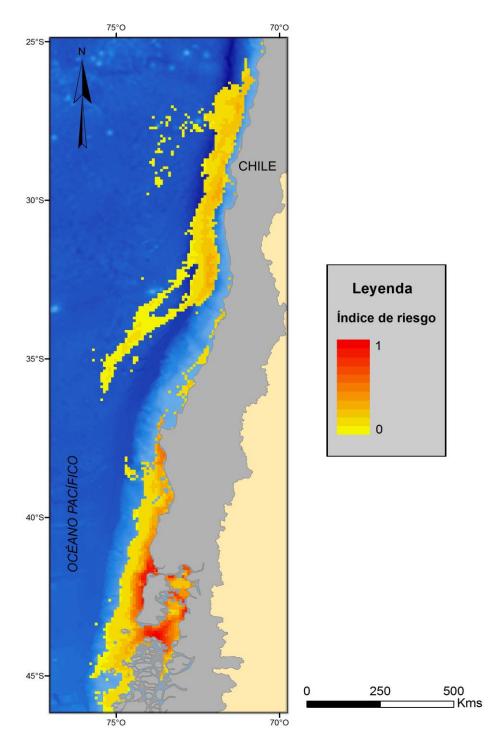


Figura 8. Mapa con índice de riesgo en áreas con alta probabilidad de ocurrencia de Ballena azul.

5. DISCUSIÓN

5.1 Importancia ecológica de las variables seleccionadas

Se sugiere que el patrón de distribución de ballenas azules sería reflejo de la biogeografía de eufásidos, su principal alimento, junto a otros crustáceos del mesozooplancton (Yochem & Leatherwood, 1985), debiendo buscar lugares donde estas especies se concentran para satisfacer su alta demanda energética (Croll *et al.*, 2005; Branch *et al.*, 2007).

Al no existir una apropiada información a gran escala de la distribución del krill, es confiable utilizar aproximaciones ambientales de su agregación (Branch *et al.*, 2007). Es común usar para la SDM de cetáceos variables oceanográficas como estimadoras directas o indirectas de su presencia (Redfern *et al.*, 2006), como es el caso de las seis variables que en este estudio resultaron otorgar la mayor fuerza explicativa al modelo final (Tabla 3).

Los resultados de este análisis de variables de importancia, refuerzan lo descrito por varios autores, que destacan la necesidad de utilizar diversos parámetros biofísicos marinos para estudiar el comportamiento de la productividad marina y procesos oceanográficos (Cerdeira-Estrada & López-Saldaña, 2011; Mann & Lazier 2006; CPPS & PNUMA, 2012).

El hecho que la Chl-a, principal pigmento fotosintético del fitoplancton e indicadora de la productividad primaria marina (Werdell & Bailey, 2005), se destacara como la variable más altamente explicativa en los modelos obtenidos, es un reflejo de su importancia ecológica, tanto en este como en otros estudios que han investigado la asociación entre la presencia de cetáceos y zonas de alta productividad (Croll *et al.*, 2005; Félix & Escobar, 2011; Félix & Haase, 2001; Jaquet & Whitehead, 1996; Whitehead, 2002). Ello, refuerza su estatus de estimador consistente de las poblaciones de ballenas.

En el caso de las POC (partículas orgánicas de carbono), NFLH (fluorescencia de la clorofila del fitoplancton) y PAR (radiación fotosintética disponible), si bien, no se ha descrito su utilización en otros estudios relacionados con ballenas azules, en este trabajo resultaron ser la segunda, tercera y cuarta variable de importancia, respectivamente. Las tres se relacionan, de alguna forma, con el contenido de fitoplancton.

Las POC, corresponden a un conjunto de partículas en la superficie del océano que representa, generalmente, biomasa viva de fitoplancton y ditritus orgánico (NASA, 2014). Se utiliza para estimar las tasas de crecimiento del fitoplancton y la producción primaria neta basada en el carbono de las observaciones satelitales (Behrenfeld *et al.*, 2005). Es considerada de mayor interés que la Chl-a para estudios de biogeoquímica oceánica y su

papel potencial en el clima, por representar un reservorio de carbono de interés sustancial, altamente dinámico y cuya variabilidad está aún pobremente caracterizada (Stramski *et al.*, 2008).

La NFLH proporciona una rica fuente de información de la fisiología del fitoplancton, particularmente del proceso de fotosíntesis y la eficiencia del uso de luz en los modelos de productividad del océano, como reflejo de las interacciones entre la biología del océano y las fluctuaciones del clima en el entorno físico (Behrenfeld *et al.*, 2009). Existen estudios que la describen como una valiosa herramienta para evaluar las predicciones de estrés de nutrientes en los modelos de ecosistemas del océano y otorgan la primera evidencia de que el hierro juega un papel importante en la dinámica estacional del fitoplancton (Behrenfeld *et al.*, 2009).

La PAR también es utilizada como estimador de la productividad primaria marina (Carr *et al.*, 2006). Este parámetro indica la energía total disponible para el proceso de fotosíntesis del fitoplancton, por tanto es un parámetro clave para estudios biológicos y ecológicos (NASA, 2014).

En los últimos dos lugares de importancia se ubican la SST (temperatura marina superficial) y distancia a la costa. Ambas, de manera más indirecta, otorgarían información acerca de las áreas donde podría estar concentrándose el alimento de las ballenas azules, lo que se ve reflejado en sus altas correlaciones con la Chl-a y las POC (r=0,84-0,87, Figura 3).

Efectivamente, la SST constituye un buen indicador de estrés ambiental (Cerdeira-Estrada & López-Saldaña, 2011) y en otros estudios se ha reportado una relación inversa entre SST y Chl-a (González-Silvera *et al.*, 2004; Cerdeira-Estrada & López-Saldaña, 2011), con un aumento en la concentración de Chl-a a medida que disminuye la SST. Las correlaciones que la SST tiene con las otras variables indicadoras de fitoplancton, también resultaron ser inversas y altas (Figura 3), lo que se puede atribuir al hecho de que las mayores productividades se presentan en aguas frías asociadas al sistema de corrientes y surgencias marinas (Thiel *et al.*, 2007), factor que también estaría determinando las fuertes correlaciones inversas entre la distancia a la costa y la productividad primaria. Algunos autores describen que las concentraciones más altas de Chl-a (15–20 mg m³), en las costas del norte (18–24°S) se han registrado en zonas relativamente cercanas a la costa (<37 km) (Morales *et al.*, 1996; Iriarte & González, 2004; Thiel *et al.*, 2007).

En general, se describe que las ballenas azules se asocian a aguas más profundas que las de la plataforma continental y los registros en aguas más superficiales son típicos de regiones con plataforma continetal angosta (Branch *et al.*, 2007). En Chile, la plataforma continental es extremadamente estrecha alrededor de los 32°S (<10 km), ampliándose paulatinamente hacia el sur, alcanzando alrededor de 70 km en los 42°S

(Thiel *et al.*, 2007). Este sería otro factor que podría estar influyendo en la presencia y alta probabilidad de ocurrencia de Ballena azul en zonas cercanas a la costa.

Las variables Chl-a, SST y distancia a la costa, han resultado también ser importantes en los modelamientos de ballenas azules realizados por otros autores en distintas partes del mundo (Fiedler *et al.*, 1998; CPPS & PNUMA, 2012; Miller, 2012; Munger *et al.*, 2009; Gill *et al.*, 2011; Forney *et al.*, 2012; Etnoyer *et al.*, 2006). Sin embargo, otras variables que resultaron en algún grado importantes en otros estudios, como la batimetría y distancia a la isobata de 200 metros (Miller, 2012; Gill *et al.*, 2011; Becker *et al.*, 2010; Forney *et al.*, 2012) no otorgaron grandes contribuciones en los modelos realizados en este trabajo. Esto se puede deber a la particularidad existente en las costas de Chile, donde adquiere gran relevancia, la influencia del sistema de corrientes y surgencias sobre la productividad primaria.

La incorporación en el presente estudio de variables no utilizadas anteriormente en modelamiento de hábitat de cetáceos en general y ballenas azules en particular, se sustenta en su importancia ecológica, en su facilidad de obtención y en las sugerencias de incorporación de nuevos parámetros que ayuden a enriquecer y ajustar continuamente las predicciones de preferencias de hábitat de la especie (Cañadas *et al.*, 2005; Redfern *et al.*, 2006; Barlow *et al.*, 2009; Miller, 2012).

5.2 Distribución de especies

Importancia de las técnicas de modelación utilizadas

La mayoría de los estudios en cetáceos, han utilizado técnicas de regresión (Redfern *et al.*, 2006; Cañadas *et al.*, 2005; Barlow *et al.*, 2009; Becker *et al.*, 2010; Forney *et al.*, 2012; Croll *et al.*, 1998), sin embargo, las técnicas utilizadas en el presente estudio, son ampliamente usadas en la modelación de distribución de muchas especies (Hijmans & Elith, 2016; Franklin, 2009).

Trabajos que han comparado modelaciones de hábitat para cetáceos con GAMs y MaxEnt, cuando ambas técnicas utilizan datos sistemáticos, sugieren que las predicciones realizadas con MaxEnt son iguales o mejores que las predicciones realizadas con GAMs (NOAA & CPPS, 2013).

Tanto MaxEnt como RF tienen ventajas en relación con los métodos incorporados para la selección de variables, siendo poco probables de mejorar por medio de otros procedimientos que se utilizan para la pre-selección de las mismas (Elith *et al.*, 2011; Prasad *et al.*, 2006).

En particular, MaxEnt es un método estable, enfrentando variables correlacionadas (Elith *et al.*, 2011), mientras que RF posee estimadores internos que supervisan el error, la fuerza y la correlación (Breiman, 2001), destacándose por entregar los mejores resultados al momento de discriminar la importancia de las variables para la definición del modelo final (Prasad *et al.*, 2006).

Por otra parte, MaxEnt pertenece al grupo de los métodos que necesitan solo datos de presencia (Franklin, 2009), siendo una gran ventaja en estudios relacionados al medio marino, donde es difícil poder asegurar datos de ausencias reales de una especie. Los datos de solo presencia son un recurso valioso y potencialmente pueden ser usados para modelar las mismas relaciones ecológicas que con los datos de presencia-ausencia (Elith *et al.*, 2011).

La utilización de estos métodos de SDM representa un avance significativo en estudios con cetáceos, teniendo en cuenta las limitantes que posee el muestreo sistemático de cetáceos en el ambiente marino, reflejado muchas veces, en la heterogeneidad espacial y temporal de los datos, metodologías y esfuerzo de muestreo, éste último requerido en los modelos de regresión (Redfern *et al.*, 2006; MacLeod, 2010; CPPS & PNUMA, 2012).

Estudios que han modelado la distribución de Ballena azul en Chile con MaxEnt y GAMs (CPPS & PNUMA, 2012) muestran un área de idoneidad de hábitat amplia a lo largo de todo Chile, sin embargo, los resultados obtenidos en el presente trabajo logran definir con más precisión las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia de la especie. Esto se puede atribuir a todas las ventajas mencionadas anteriormente, lo que permitió llevar a cabo una metodología robusta de selección de variables y ensamble de técnicas.5v

Relación entre el resultado de SDM y biogeografía de Chile

Desde el punto de vista biogeográfico, resaltan tres aspectos que determinan las características oceanográficas chilenas actuales: los patrones de circulación oceánica; las surgencias costeras que, enriquecidas en nutrientes, serían las responsable de la alta productividad primaria costera; y las anomalías oceanográficas y atmosféricas ligadas a la dinámica de la circulación atmosférica global, particularmente la Oscilación del Sur cuyas fases se asocian a los eventos de El Niño y La Niña (Camus, 2001).

En cuanto a los patrones de circulación oceánica, existe una influencia predominante de una masa de agua superficial subantártica, de baja temperatura y salinidad, asociada a la Corriente de Deriva del Oeste (CDO), la cual se aproxima a Chile entre los 35°S y ~45°S (Thiel *et al.*, 2007), dividiéndose antes de alcanzar la costa en la Corriente del Cabo de Hornos hacia el sur y la Corriente Chileno-Peruana hacia el norte, la cual es dividida por la Contracorriente Ecuatorial (~100–300 kms de la costa, Thiel *et al.*, 2007), en una rama oceánica y la Corriente de Humboldt (Camus, 2001).

Mientras que el sector de aproximación de la CDO coincide con la zona sur de alta probabilidad de ballenas azules (37°S-46°S), la zona norte (26°-36°S) de alta probabilidad del modelo, coincide con el Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH), uno de los ecosistemas marinos más productivos del planeta, el cual se extiende a lo largo de la costa oeste de Sudamérica desde el sur de Chile (~42°S) hasta cerca de la línea del ecuador (Figura 9). Este sistema se caracteriza por un flujo predominante (~75-85°O) de aguas superficiales hacia el norte, de origen subantártico y por fuertes afloramientos de aguas subsuperficiales de origen ecuatorial, frías y ricas en nutrientes (Thiel *et al.*, 2007).

A lo largo de la costa chilena, el aporte de nutrientes a través de los afloramientos provoca una extremadamente alta productividad primaria que alimenta al zooplancton, peces y niveles tróficos superiores, incluyendo grandes poblaciones de aves y mamíferos marinos. Los afloramientos están localizados a lo largo de la costa de Chile y su ocurrencia es más bien continua durante todo el año en el norte (21–23°S, costa de Iquique y Antofagasta), con valores ligeramente más altos en invierno e inicios de primavera, mientras que en el área centro-sur (30-40°S) las surgencias son estacionales, concentrándose en primavera-verano (Strub *et al.* 1998; Thiel *et al.*, 2007; Thomas *et al.* 2001), cuando los rangos de Chl-a están entre los 3.8 y 26 mg m³ (Montecino *et al.* 2004; Thiel *et al.*, 2007).

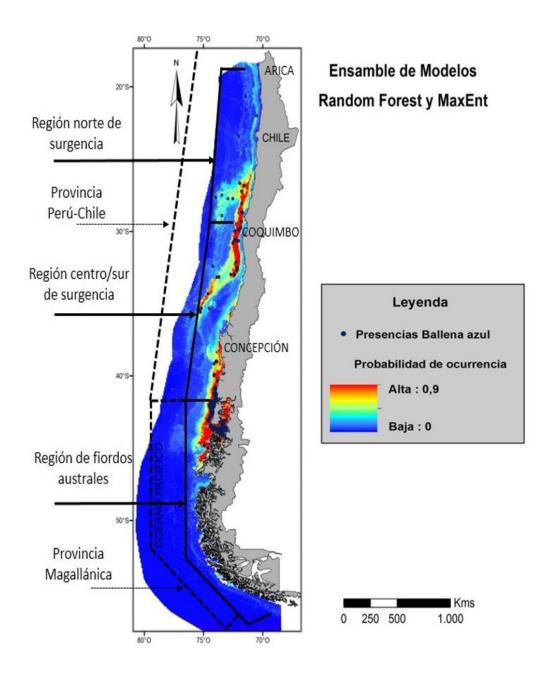


Figura 9. Relación entre el modelo de distribución de Ballena azul y las unidades biogeográficas del escosistema marino chileno, según se define en Escribano *et al.* (2003), las regiones de surgencias norte, centro/sur y fiordos australes corresponden a zonas separadas por discontinuidades oceanográficas y características biológicas distintivas del sistema pelágico. Mientras que las provincias Perú-Chile y Magallánica corresponden a los compartimentos biogeográficos del sitema bentónico.

5.3 Implicancias en conservación y planificación espacial

En general, para el estudio de cetáceos, los muestreos deben llevarse a cabo a escalas geográficas amplias (Redfern *et al.*, 2006). De aquí la importancia de generar análisis a gran escala incorporando datos de estudios en distintas zonas del país, tal como se realizó en este trabajo, lo cual permite avanzar hacia una eficiente planificación para la conservación marina en todo Chile.

El Ministerio del Medio Ambiente ha destacado, a través de su informe "Las Áreas Protegidas de Chile", la existencia de solo un 4,3% de superficie marina protegida dentro de la ZEE, del cual el 99% corresponde solo a un Parque Marino perteneciente a la Isla Sala y Gómez (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).

Además, el informe indica que de las siete ecorregiones marinas, seis poseen menos del 1% de su superficie bajo protección, incluidas la Ecorregión Humboldtiana y la Chiloense, lo que refleja una gran desigualdad de protección entre los distintos ecosistemas representativos de las biodiversidad nacional.

El área de 167.204 km², definida como hábitat idóneo para Ballena azul a través de la SDM de este estudio, correspondería a hábitats críticos para actividades de alimentación de la especie y solo un 0,009% de esta área se encuentra bajo algún nivel de protección (Tabla 7).

Del mismo modo, solo un 0,01% (191,8 km²) de la ZEE continental se encuentra protegida y solo un 8% de dicha superficie (16,58 km²) coinciden con las zonas definidas en este estudio como hábitat idóneo para Ballena azul, lo cual muestra el bajo nivel de representatividad que poseen estas zonas dentro del sistema de áreas protegidas existentes (Tabla 7).

Estas cifras reflejan la gran brecha que existe entre los niveles de protección marina y los compromisos nacionales e internacionales adoptados por Chile en materia de conservación marina.

A nivel nacional, se puede destacar lo establecido por la Ley N° 20.293 (Chile, M.Economía, Subpesca, 2008), cuyo Artículo 3° se refiere a velar por la protección efectiva de las diversas especies de cetáceos que habitan y circulan en los espacios marítimos de soberanía y jurisdicción nacional, la conservación de la biodiversidad relacionada, así como de los ecosistemas de los cuales dependen, protegiendo los espacios claves para el desarrollo de sus ciclos de vida (ej. alimentación), para lo cual se fomentará la creación de áreas marinas protegidas, parques o reservas.

La planificación espacial marina destinada a proteger mamíferos marinos, es un tema de debate a nivel internacional y muchos países han adoptado medidas de planificación para definir el uso futuro de los océanos (Hoyt, 2015).

En Chile, son necesarios más esfuerzos de investigación en ballenas azules y cetáceos en general. Dentro de los resultados de la SDM, se pueden distinguir áreas de probabilidad de ocurrencia media y alta en zonas donde no se incorporó registros de presencia, principalmente en la región de fiordos australes (Figura 9). Esta capacidad predictiva de los modelos se puede utilizar para destinar proyectos de investigación a zonas pobremente estudiadas, de este modo ir fortaleciendo y ajustando los modelos de distribución, disminuyendo el sesgo por falta de información y aumentando el conocimiento acerca de la especie.

Junto con aumentar esta información, ésta debe ponerse a disposición de los organismos encargados de la planificación y gestión adaptativa, de este modo se ayudará a canalizar los esfuerzos de protección hacia zonas prioritarias para una efectiva planificación espacial marina (Hoyt, 2015). Las ballenas se pueden beneficiar de la protección otorgada a ciertas zonas, donde, a través de medidas de gestión, se regulan las actividades humanas que pueden amenazar su estado de conservación (CPPS & PNUMA, 2012).

Con los resultados de la SDM, es posible distinguir claramente las áreas con potencial de inclusión dentro de futuros análisis, procesos de planificación sistemática marina y propuestas de áreas protegidas. Con esta información se puede contribuir a la disminución de las brechas existentes en cuanto a esfuerzos de conservación y protección de distintas ecorregiones a nivel nacional, como sucede con la Ecorregión Humboldtiana y la Chiloense.

La obtención de mayores índices de riesgo en la zona sur del país, debido en parte, al mayor desarrollo de centros de cultivos marinos en estas regiones, refleja la importancia de aumentar los esfuerzos de investigación acerca de la interacción entre actividades antropogénicas y ballenas azules en esta zona, más aún si este estudio solo incluyó una parte de las potenciales amenazas para la especie.

Los planes de acción para especies amenazadas deben incluir acciones que puedan ser usadas para enfrentar las amenazas y promover la recuperación de sus poblaciones, asi como la protección de habitats críticos (Corrigan *et al.*, 2014).

En todo el mundo existen más de 1.066 AMP y santuarios para mamíferos marinos, una de las más grandes es la Gran Barrera de Coral en Autralia con 340.000 km², la cual, además del arrecife coralino, alberga una gran variedad de especies de cetáceos, incluyendo áreas de reproducción de ballenas jorobadas (Hoyt, 2011). Mientras que, a nivel nacional, la AMP que contiene al Parque Marino Francisco Coloane, en la Región

de Magallanes y la Antártica Chilena alberga diversas especies de mamíferos y aves marinas en sus más de 600 km² de superficie (Hoyt, 2005, 2011).

Los criterios para identificar áreas importantes para mamíferos marinos (IMMAs, por su sigla en inglés) pueden desarrollarse en base a criterios globales existentes. Es así como Corrigan *et al.* (2014) destaca dos criterios globales para identificar áreas importantes para la persistencia de la biodiversidad marina: Áreas Ecológica o Biológicamente Significativas (EBSA, por su sigla en inglés), desarrollado a través de la Convención sobre la Diversidad Biológica (CDB); y las Áreas Clave de Biodiversidad (KBA, por su sigla en inglés) en revisión por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por su sigla en inglés).

Para definir las EBSA se consideran criterios como la importancia espacial para la historia de vida de las especies, hábitats relevantes para especies amenazadas, asi como poblaciones disminuidas y de lenta recuperación. Mientras que, entre los criterios propuestos bajo los nuevos estándares de las KBA (IUCN, 2013), se encuentran la identificación de sitios que contribuyan significativamente a la persistencia global de biodiversidad amenazada y procesos ecológicos críticos.

La identificación continua de las EBSA ofrece la base ideal sobre la cual considerar las IMMAs. Los criterios de las EBSA, así como aquellos para guiar el desarrollo de redes de AMPs, adoptados durante la 9^{na} Conferencia de las Partes de la CDB en el 2008 (CDB, 2008, Anexos I y II), son utilizados igualmente para identificar áreas dentro de jurisdicción nacional, lo cual permite a los países avanzar hacia el logro de los objetivos de las Estrategias Nacionales de Biodiversidad de la CDB y de los Planes de Acción, reportar progresos en las "Metas Aichi" (CDB, 2010), reforzar y promover el estatus de áreas de protección a nivel nacional y poder obtener acceso a fuentes de financiamiento para iniciativas de conservación (Dunn *et al.*, 2014; Corrigan *et al.*, 2014).

Consecuentemente, los resultados de estudios de SDM, como el presente, contribuyen a la entrega de bases científicas para seleccionar los hábitats marinos más adecuados para proteger (Hoyt, 2011) y, de este modo, cumplir con los compromisos nacionales e internacionales de conservación marina.

Tabla 7. Superficies de áreas protegidas existentes y propuestas a nivel nacional.

	Superficie Protegida (Km²)	% de Protección
ZEE Total	151.078,49	4,3
ZEE Continental	191,81	0,01
SDM	16,6	0,009

5.4 Limitaciones y recomendaciones

La Conferencia Internacional de Áreas Protegidas para Mamíferos Marinos (ICMMPA, por su sigla en inglés) ha puesto énfasis en la importancia de contar con bases de datos globales de especies, que ayuden a identificar hábitats críticos y contribuyan al diseño de las AMP (Williams *et al.*, 2011b, Hoyt, 2015).

De esta forma, plataformas como el Sistema de Información sobre Biodiversidad Marina y Áreas Protegidas del Pacífico Sudeste (SIBIMAP) a nivel regional, es un claro ejemplo de la importancia de compartir, de manera útil y eficiente, información georeferenciada de las especies estudiadas. Al respecto, sería beneficioso para la conservación de cetáceos en general, que investigadores a nivel nacional aprovecharan estas instancias o se generaran nuevas, ya que tanto el aumento del esfuerzo de investigación en áreas menos estudiadas (Williams *et al.*, 2011b), como el acceso eficiente a información actualizada, pueden ayudar a disminuir el sesgo y aumentar la fortaleza de los modelamientos de hábitat y, de este modo, ir ajustando las recomendaciones de áreas de protección según corresponda (Cañadas *et al.*, 2005).

Debido a que la información recolectada proviene de diversas fuentes de datos, con metodologías de muestreo heterogéneas, este trabajo no incorporó un análisis de abundancia, ni un análisis de distribución estacional y anual, lo cual permitiría estudiar, en futuras investigaciones, la influencia del Fenómeno de Oscilación del Sur, sobre la distribución de la especie en Chile (Pardo *et al.*, 2015).

A pesar del buen desempeño general de algunos modelos, muchas veces no logran capturar los patrones de distribución espacial de la especie estudiada (Becker *et al.*, 2010). Si bien, el presente estudio incorporó nuevas variables a la SDM, se recomienda, en futuros trabajos, incluir otras variables oceanográficas y bióticas (ej. interacciones

interespecíficas) que permitan ir mejorando las predicciones de preferencia de hábitat y avanzar hacia un mayor entendimiento de la ecología de la Ballena azul y otras especies marinas.

Para avanzar hacia una planificación espacial efectiva, también es necesario, en futuros estudios, realizar un análisis incorporando otras fuentes de amenzas, de más difícil acceso, como el tránsito marítimo y zonas de pesca, ya que las iniciativas de planificación debieran centrarse en la identificación de áreas de alto potencial de amenaza para los mamíferos marinos y utilizar esos *hotspots* para guiar el mejoramiento de la modelación (Hoyt, 2015).

6. CONCLUSIONES

A partir de técnicas de SDM, con notables ventajas metodológicas, se definen dos zonas que reunen características de hábitats críticos para ballenas azules en Chile. La primera, una zona centro/norte entre los 26°S y 36°S con una distribución costera y pelágica (~1-250 kms de la costa). La segunda, una zona sur entre los 37°S y 46°S aproximadamente, donde las mayores probabilidades se concentran cerca de la costa (distancia máxima ~50-60 kms).

Esta área, con una superficie total de 167.204 km², coincide con los patrones de circulación oceánica y surgencias costeras que caracterizan las productivas aguas chilenas. El presente trabajo, logra identificar variables relacionadas con la productividad primaria, la mayoría usadas por primera vez en modelación de cetáceos, como las que más contribuyen al modelo final, destacando su importancia para la definición y predicción de las áreas de alimentación que utilizarían las ballenas azules durante la época estival y otoñal en el país.

Solo un 0,009% de las zonas definidas como hábitats críticos se encuentran bajo algún nivel de protección, lo que hace necesario su potencial incorporación en futuras investigaciones, procesos de protección, planificación y manejo, que no solo beneficiarían a esta especie, sino a todo un ecosistema sustentado por zonas de alta productividad primaria e importancia ecológica.

7. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Araujo, M.B. and New, M. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. Trends in Ecology and Evolution 22:42-47.
- 2) Barlow, J., Ferguson, M.C., Becker, E.A., Redfern, J.V., Forney, K.A., Vilchis, I.L., Fiedler, P.C., Gerrodette, T. and Balance, L.T. 2009. Predictive Modeling of Marine Mammal Density from Existing Survey Data and Model Validation Using Upcoming Surveys. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR- May 2009. 230 p.
- 3) Becker, E.A., Forney, K.A., Ferguson, M.C., Foley, D.G., Smith, R.C., Barlow, J. and Redfern, J.V. 2010. Comparing California current cetacean-habitat models developed using in situ and remotely sensed sea surface temperature data. Marine Ecology Progress Series 413:163-183.
- 4) Behrenfeld, M.J., Boss, E., Siegel, D.A., and Shea, D.M. 2005. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space, Global Biogeochemical Cycles 19 (1).
- 5) Behrenfeld, M.J., Westberry, T.K., Boss, E.S., O'Malley, R.T., Siegel, D.A., Wiggert, J.D., Franz, B.A., McClain, C.R., Feldman, G.C., Doney, S.C., Moore, J.K., Dall'Olmo, G., Milligan, A. J., Lima, I. AND Mahowald N. 2009. Satellite-detected fluorescence reveals global physiology of ocean phytoplankton. Biogeosciences 6: 779-794.
- 6) Branch, T.A., Stafford, K.M., Palacios, D.M., Allison, C., Bannister, J.L., Burton, C.L.K., Cabrera, E., Carlson, C., Galletti Vernazzani, B., Gill, P.C., Hucke-Gaete, R., Jenner, K.C.S., Jenner, M-N.M., Matsuoka, K., Mikhalev, Y.A., Miyashita, T., Morrice, M.G., Nishiwaki, S., Sturrock, V.J., Tormosov, D., Anderson, R.C., Baker, A.N., Best, P.B., Borsa, P., Brownell JR, R.L., Childerhouse, S., Findlay, K.P., Gerrodette, T., Ilangakoon, A.D., Joergensen, M., Kahn, B., Ljunglad, D.K., Maughn, B., McCauley, R.D., McKay, S., Norris, T.F., Rankin, S., Samaran, F., Thiele, D., Van Waerebeek, K. and Warneke, R.M. 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.
- 7) Breiman, L. 2001. Random forest. Machine Learning. 45(1):5-32.
- 8) Camus, P. 2001. Biogeografía Marina de Chile Continental. Revista Chilena de Historia Natural 74:587-617.
- 9) Cañadas, A., Sagarminaga, R., DE Stephanis, R., Urquiola, E. and Hammond, P. S. 2005. Habitat preference modelling as a conservation tool: Proposals for marine protected areas for cetaceans in southern Spanish waters. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 15(5):495–521.
- 10) Carr, M.E., Friedrichs, M.A.M., Schmeltz, M., Aita, M.N., Antoine, D., Arrigo, K. R., Asanuma, I., Aumont, O., Barber, R., Behrenfeld, M., Bidigare, R., Buitenhuis, E. T., Campbell, J., Ciotti, A., Dierssen, H., Dowell, M., Dunne, J., Esaias, W., Gentili, B., Gregg, W., Groom, S., Hoepffner, N., Ishizaka, J., Kameda, T., Le

- Quere, C., Lohrenz, S., Marra, J., Melin, F., Moore, K., Morel, A., Reddy, T. E., Ryan, J., Scardi, M., Smyth, T., Turpie, K., Tilstone, G., Waters, K., and Yamanaka, Y.. 2006. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 53:741–770.
- 11) Cerdeira-Estrada, S. and López-Saldaña, G. 2011. A novel Satellite-based Ocean Monitoring System for Mexico. Ciencias Marinas 37(2): 237–247.
- 12) Chile. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, Subsecretaria de Pesca. 2008. Ley 20.293: Protege a los Cetáceos e Introduce Modificaciones a la Ley Nº 18.892 General de Pesca y Acuicultura, octubre 2008.
- 13) Chile. Ministerio Secretaria General de la Presidencia. 2009. DS N°75 Aprueba y Oficializa el Cuarto Proceso de Clasificación de Especies según Estado de Conservación, mayo 2009. 2p.
- 14) Clarke, C., Aguayo, A. and Basulto, S. 1978. Whale observation and whale marking off the coast of Chile in 1964. The Scientific Reports of the Whales Research Institute, Tokyo 30:117–177.
- 15) Clark, J., Dolman, S.J. and Hoyt, E. 2010. Towards marine protected areas for cetaceans in Scotland, England and Wales: a scientific review identifying critical habitat with key recommendations. Chippenham, UK, Whale and Dolphin Conservation Society. 178p.
- 16) Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS). Sistema de Información sobre Biodiversidad Marina y Áreas Protegidas del Pacífico Sudeste, SIBIMAP [en línea] <www.sibimap.net> [consulta: 08 mayo 2014]
- 17) Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2012. Atlas sobre distribución, rutas migratorias, hábitats críticos y amenazas para grandes cetáceos en el Pacífico oriental. Guayaquil, Ecuador. 75p.
- 18) Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES). 2016. Apéndices I, II y III. 47p.
- 19) Convención sobre la Conservación de Especies Migratorias de Animales Silvestres (CMS). Apéndice I. 2015. 13p.
- 20) Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB). 2008. [en línea http://www.cbd.int/decisions/cop/?m=cop-09/>. [consulta 27 Noviembre 2015]
- 21) Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB). 2010. Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020, que incluye las Metas de Aichi para la Diversidad Biológica https://www.cbd.int/sp/. [consulta 15 Diciembre 2015]
- Corrigan, C.M., Ardron, J.A., Comeros-Raynal, M.T., Hoyt, E., Notarbartolo Di Sciara, G. and Carpenter K.E. 2014. Developing important marine mammal area criteria learning from ecologically or biologically significant areas and key biodiversity areas. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 24(2):166–183.

- 23) Croll, D., Marinovic, B., Benson, S., Chavez, F., Black, N., Ternullo, R. and Tershy, B. 2005. From wind to whales: trophic links in a coastal upwelling system. Marine Ecology Progress Series 289:117-130.
- Donovan, G. 2008. Marine protected areas and large cetaceans.: Proceedings of the ECS/ASCOBANS/ACCOBAMS workshop, selection criteria for marine protected areas for cetaceans. San Sebastian, Spain, 22 April 2007. P.G.H. Evans Editions. ECS Special Publication Series. 104p.
- Dunn, D.C., Ardron, J., Bax, N., Bernal, P., Cleary, J., Cresswell, I., Donnelly, B., Dunstan, P., Gjerde, K., Johnson, D., Kaschner, K., Lascelles, B., Rice, J., Von Nordheim, H., Wood, L., Halpin, P.N. 2014. The Convention on Biological Diversity's Ecologically or Biologically Significant Areas: Origins, Development, and Current Status. Marine Policy. Article in Press., http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2013.12.002i
- 26) Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudik, M., Chee, Y.E. and Yates, C.J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and Distributions 17:43–57.
- 27) Escribano, R., Fernández, M. & Aranís, A. 2003. Physical-chemical processes and patterns of diversity of the Chilean eastern boundary pelagic and benthic marine ecosystems: an overview. Gayana 67:190–205.
- 28) ESRI. 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- 29) Etnoyer, P., Canny, D., Mate, B.R., Morgan, L.E., Ortega-Ortiz, J.G. and 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 II 53:340–358.
- 30) Everson, I. 2008. Krill: biology, ecology and fisheries. John Wiley & Sons Editions. 373p
- 31) Félix, F. and Escobar, G. 2011. Efforts in developing spatial planning analysis for the southeast pacific right whale (*Eubalaena australis*). SC/S11/RW21. Scientific Committee. International Whaling Commission.
- 32) Félix, F. and Haase, B. 2001. The humpback whale off the coast of Ecuador, population parameters and behavior. Revista de Biología Marina y Oceanografía 36(1):61-74.
- 33) Fiedler, P.C., Reilly, S.B., Hewitt, R.P., Demer, D., Philbrick, V.A., Smith, S., Armstrong, W., Croll, D. A., Tershy, B.R. and Mate, B.R. 1998. Blue whale habitat and prey in the California Channel Islands. Deep-Sea Research Part I-Topical Studies in Oceanography 45: 1781-1801.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2005-2016. Visión general del sector acuícola nacional- Chile. National Aquaculture Sector Overview Fact Sheets. Texto de Norambuena, R. & González, L. <u>In:</u> FAO.

 Departamento de Pesca y Acuicultura.[enlínea] http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_chile/es [Consulta 27 Enero 2016].

- 35) Forney, K.A., Ferguson, M.C., Becker, E.A., Fiedler, P.C., Redfern, J.V., Barlow, J., Vilchis, I.L. and Ballance, L.T. 2012. Habitat-based spatial models of cetacean density in the eastern Pacific Ocean. Endangered Species Research 16:113-133.
- 36) Franklin, J. 2009. Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge, Cambridge University Press. 340p.
- 37) Galletti-Vernazzani, B., Carlson, C., Cabrera, E. and Brownell Jr., R.L. 2012. Chilean blue whales off Isla Grande de Chiloe, 2004-2010: distribution, site-fidelity and behaviour. Journal of Cetacean Research and Management 12(3): 353–360.
- 38) Gill, P. 2002. A blue whale (*Balaenoptera musculus*) feeding ground in a southern Australian coastal upwelling zone. Journal of Cetacean Research and Management 4(2): 179-184.
- 39) Gill, P.C., Morrice, M.G., Page, B., Pirzl, R., Levings, A.H. and Coyne, M. 2011. Blue whale habitat selection and within-season distribution in a regional upwelling system off southern Australia. Marine Ecology Progress Series 421:243-263.
- 40) González-Silvera, A., Santamaría-Del-Angel, E., Millán-Núñez, R. and Manzomonroy, H. 2004. Satellite observations of mesoscale eddies in the gulfs of Tehuantepec and Papagayo (Eastern Tropical Pacific). Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 51:587–600.
- 41) Guénette, J.S. and Villard, M.A. 2004. Do empirical thresholds truly reflect species tolerance to habitat alteration?. Ecological Bulletins 51:163–171.
- 42) Guisan, A. and Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology Letters 8:993-1009.
- 43) Guisan, A. and Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling 135:147-186.
- 44) Hijmans, R.J. and Elith, J. 2016. Species Distribution Modeling with R. 79p.
- 45) Hoyt, E. 2005. Marine Protected Areas for Whales, Dolphins and Porpoises: A World Handbook for Cetacean Habitat Conservation. 1st ed. London, Earthscan. 516p.
- 46) Hoyt, E. 2011. Marine Protected Areas for Whales, Dolphins and Porpoises: A world handbook for cetacean habitat conservation and planning. 2nd ed. Earthscan/Taylor & Francis, London and New York. 448p.
- 47) Hoyt, E. (editor). 2015. Summary Proceedings of the Third International Conference on Marine Mammal Protected Areas (ICMMPA, Adelaide, Australia, 9-11 Nov. 2014. 85p.
- 48) Hucke-Gaete, R. 2004. Distribución, preferencia de hábitat y dinámica espacial de la Ballena azul en Chile: 1997–2004. PhD. Universidad Austral de Chile.
- 49) Hucke-Gaete, R., Osman, L.P., Moreno, C.A., Findlay, K.P. and Ljungblad, D.K. 2004. Discovery of a blue whale feeding and nursing ground in southern Chile. Proc. R. Soc. Lond. B (Suppl.), Biology Letters 271: S170–413 S173.
- 50) International Union for Conservation of Nature (IUCN). 2013. Identifying sites that contribute significantly to the global persistence of biodiversity (Key Biodiversity Areas): criteria and delineation technical workshop report. International Union for Conservation of Nature. Gland, Switzerland.

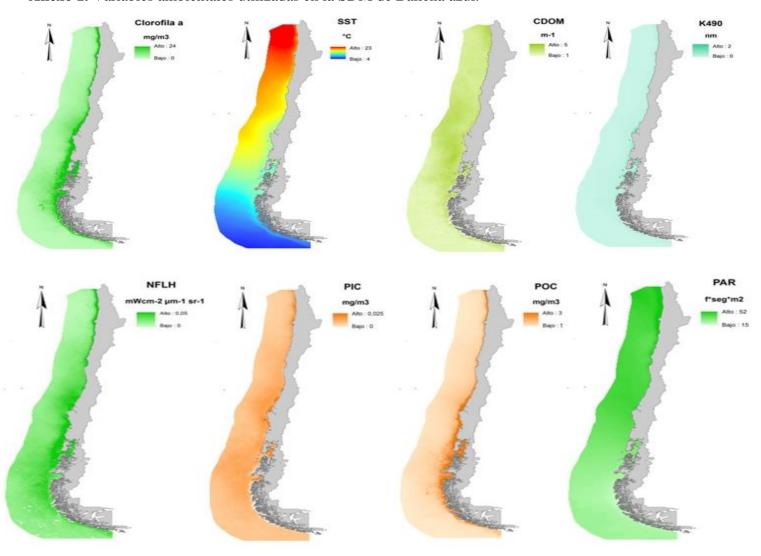
- 51) International Union for Conservation of Nature (IUCN). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2015.2. www.iucnredlist.org. [Downloaded on 26 May 2015]
- 52) International Whaling Commission (IWC). 2011. Report of the Joint IWC-ACCOBAMS Workshop on Reducing Risk of Collisions between Vessels and Cetaceans. IWC63, Conservation Committee. 42p.
- 53) International Whaling Commission (IWC). 2015. Whale Population Estimates. https://iwc.int/estimate#table. [Consulta 13 Diciembre 2015].
- 54) Iriarte, J.L. and González, H.E. 2004. Phytoplankton size structure during and after the 1997/1998 El Niño in a coastal upwelling area of the northern Humboldt Current System. Marine Ecology Progress Series 269:83–90.
- Jaquet, N. and Whitehead, H. 1996. Scale-dependent correlation of sperm whale distribution with environmental features and productivity in the South Pacific. Marine Ecology Progress Series 135:1-9.
- 56) Kaschner, K., Watson, R., Trites, A.W. and Pauly, D. 2006. Mapping world-wide distributions of marine mammal species using a relative environmental suitability (RES) model. Marine Ecology Progress Series 316:285-310.
- 57) Kieckhefer, T.R., Calambokidis, J., Steiger, G.H., and Black, N.A. 1995. Prey of humpback and blue whales off California based on identification of hard parts in feces. <u>In</u>: Eleventh Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, Orlando, Florida, 14-18 December 1995. Society for Marine Mammalogy, Lawrence, KA.
- 58) M^c Leod, C. 2010. Habitat representativeness score (HRS): a novel concept for objectively assessing the suitability of survey coverage for modelling the distribution of marine species. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 90(07): 1269-1277. Doi:10.1017/S0025315410000408
- 59) Mann, K. and Lazier, Jr. 2006. Dynamics of marine ecosystems: biological—physical interactions in the oceans. 3rd ed. Boston, MA, Blackwell Publishing. 85p.
- 60) Margules, C.R. and Pressey, R.L. 2000. Systematic conservation planning. Nature 405: 243-253.
- 61) Miller, B. 2012. Modeling blue whale (*Balaenoptera musculus*) habitat use and relative abundance: conservation implications in the Gulf of St. Lawrence, Canada. Thesis for the degree of Master of Research in Marine Mammal Science. UK, University of St Andrews Sea Mammal Research Unit Scottish Oceans Institute. 40p.
- 62) Ministerio del Medio Ambiente. 2015. Las Áreas Protegidas de Chile. Andros Ediciones. Santiago, Chile. 68p.
- Montecino, V., Astoreca, R., Alarcón, G., Retamal, L. and Pizarro, G. 2004. Biooptical Characteristics and Primary Productivity During Upwelling and Nonupwelling Conditions in a Highly Productive Coastal Ecosystem off Central Chile (~36°S). Deep-Sea Research II 51:2413–2426.

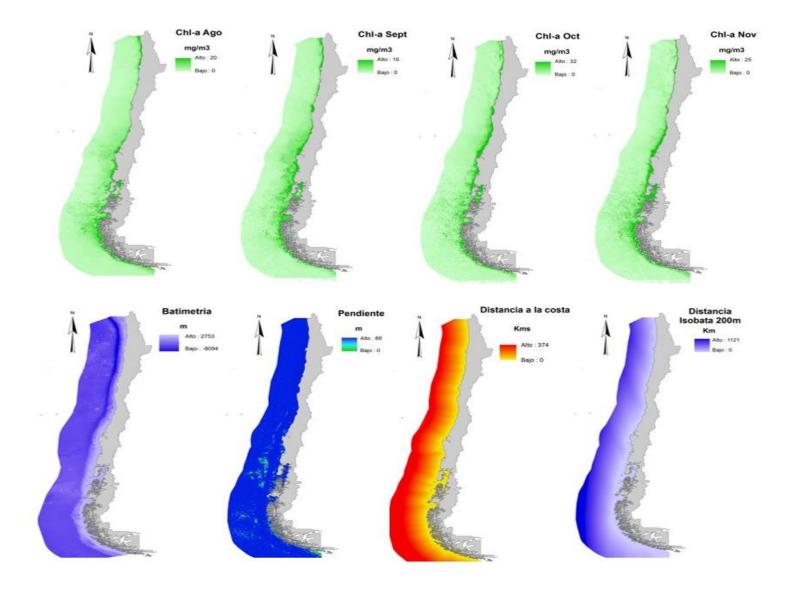
- 64) Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente. 1992. Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. España. 809p.
- Morales, C.E., Blanco, J.L., Braun, M., Reyes, H. and Silva, N. 1996. Chlorophylla distribution and associated oceanographic conditions in the upwelling region off northern Chile during the winter and spring 1993. Deep Sea Research Part I: Topical Studies in Oceanography 43, 267–289.
- 66) Munger, L.M., Camacho, D., Havron, A., Campbell, G., Calambokidis, J., Douglas, A. and Hildebrand, J. 2009. Baleen whale distribution relative to surface temperature and zooplankton abundance off southern California, 2004-2008. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports 50:155-168.
- 67) National Aeronautics and Space Administration (NASA). Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. MODIS-Aqua Ocean Color Data [en línea] http://dx.doi.org/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0 [consulta 10 mayo 2014]
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Geophysical Data Center [en línea] http://www.ngdc.noaa.gov/ [consulta: 21 junio 2014]
- 69) National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS). 2013. Report of the International Workshop to Develop Transboundary Approaches for Reducing Risks to Large Whales in the Eastern Pacific Basin. Salinas, Ecuador.
- 70) Palacios, D., Mate, B., Bailey, H., Irvine, L., Bograd, S. and Costa, D. 2011. Migration routes and ecology of the Northeast Pacific blue whale. CPPS/UNEP. [diapositivas].
- 71) Pardo, M.A., Gerrodette, T., Beier, E., Gendron, D., Forney, K.A., Chivers, S.J., Barlow, J. and 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):1-23.
- 72) Peterson, A.T. and Cohoon, K.P. 1999. Sensivity of distributional prediction algorithms to geographic data completeness. Ecological Modelling 117:159-164.
- 73) Peterson, A.T., Pape, M. and Eaton, M. 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: A comparison of GARP and Maxent. Ecography 30:550-560.
- 74) Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190:231–259.
- 75) Pompa, S., Ehrlich, P.R. and Ceballos, G. 2011. Global distribution and conservation of marine mammals. PNAS 108(33):13600–13605.
- 76) Prasad, A. M., Iverson, L. R., and Liaw, A. 2006. Newer classification and regression techniques: bagging and random forests for ecological prediction. Ecosystems 9: 181–199.
- 77) Pressey, R.L., Cabeza, M., Watts, M.E., Cowling, R.M. and Wilson, K.A. 2007. Conservation planning in a changing world. Trends in Ecology and Evolution 22: 583–592.

- 78) Quantum GIS Development Team. 2016. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. http://qgis.osgeo.org.
- 79) Ramírez, P. 1983. Capturas y observaciones de la Ballena azul *Balaenoptera musculus*, L., en Paita-Perú 1961–1966 y 1975–1982. Revista de la Comisión Permanente del Pacífico Sur 13:97–102.
- 80) R Development Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 81) Redfern, J.V., Ferguson, M.C., Becker, E.A., Hyrenbach, K.D., Good, C., Barlow, J., Kaschner, K., Baumgartner, M.F., Forney, K.A., Ballance, L.T., Fauchald, P., Halpin, P., Hamazaki, T., Pershing, A.J., Qian, S.S., Read, A., Reilly, S.B., Torres, L. and Werner, F. 2006. Marine Ecology Progress Series 310:271-295.
- Reeves R.R., Clapham, P.J., Brownell JR., R.L. and Silber, G.K. 1998. Recovery plan for the blue whale (*Balaenoptera musculus*). National Marine Fisheries Service, Silver Spring, MD. 42 p.
- 83) Reilly, S.B., Bannister, J.L., Best, P.B., Brown, M., Brownell Jr., R.L., Butterworth, D.S., Clapham, P.J., Cooke, J., Donovan, G.P., Urbán, J. & Zerbini, A.N. 2008. *Balaenoptera musculus*. <u>In</u>: The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2015.2. <www.iucnredlist.org>. [Downloaded on 26 May 2015]
- 84) Schoenherr, J.R. 1991. Blue whales feeding on high concentrations of euphausiids around Monterey Submarine Canyon. Canadian Journal of Zoology 69:583-594.
- 85) Sears, R. and Calambokidis, J. 2002. Update COSEWIC status report on the Blue Whale *Balaenoptera musculus* in Canada. <u>In:</u> COSEWIC assessment and update status report on the Blue Whale *Balaenoptera musculus* in Canada. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. Ottawa. pp.1-32.
- 86) Soberón, J. 2012. Modelación de Nicho y Manejo de la Biodiversidad. <u>En:</u> Simonetti, J. y Dirzo, R. (Eds.). La Conservación Biológica en América Latina. Conservación Biológica: Perspectivas desde América Latina. Santiago de Chile, Editorial Universitaria. pp.143-159.
- 87) Stramski, D., Reynolds, R. A., Babin, M., S. Kaczmarek, S., Lewis, M. R., Rottgers, R., Sciandra, A., Stramska, M., Twardowski, M.S., Franz, B.A and Claustre, H. 2008. Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans. Biogeosciences 5:171–201.
- 88) Strub, P.T., Mesías, J.M., Montecino, V., Rutllant, J. and Salinas, S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: Robinson, A.R. and Brink, K.H. The Sea. New York: John Wiley and Sons Editions. 273–314.
- 89) Thiel, M., Macaya, E., Acuña, E., Arntz, W.E., Bastias, H., Brokordt, K., Camus, P.A., Castilla, J.C., Castro, L., Cortés, M., Dumont, C., Escribano, R., Fernández, M., Gajardo, J., F. Gaymer, C., Gomez, I., González, A., González, H, Haye, P., Illanes, J., Iriarte, J., Lancellotti, D., Luna-Jorquera, G., Luxoro, C., Manriquez, P., Marín, V., Muñoz, P., Navarrete, S., Pérez, E., Poulin, E., Sellanes, J., Sepúlveda, H., Stotz, W., Tala, F., Thomas, A., Vargas, C., Vásquez, J. and Vega, J.M. 2007. The Humboldt Current System of Northern and Central Chile Oceanographic

- Processes, Ecological Interactions and Socioeconomic Feedback. Oceanography and Marine Biology: An Annual Review 45:195-344.
- 90) Thomas, A.C., Carr, M.E. and Strub, P.T. 2001. Chlorophyll Variability in Eastern Boundary Currents. Geophysical Research Letters 28:3421–3424.
- 91) Thuiller, W., Damien, G. and Engler, R., 2015. Manual Package Biomod2. Ensemble platform for species distribution modeling version 3.1-64
- 92) Thuiller, W., Georges, D. and Engler, R. 2014. Biomod2: Ensemble platform for species distribution modeling. R package version 3.1-64.
- 93) Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R. and Araújo, M.B. 2009. BIOMOD a platform for ensemble forecasting of species distributions. Ecography 32:369–373.
- 94) Trites, A.W., CHRISTENSEN, V. and PAULY, D. 1997. Competition between fisheries and marine mammals for prey and primary production in the Pacific Ocean. Journal of Northern Atlantic Fisheries 22:173-187.
- 95) Van Waerebeek, K., Pastene, L. A., Alfaro-Shigueto, J., Brito, J. L. and Mora-Pinto, D. 1997. The status of the blue whale *Balaenoptera musculus* off the west coast of South America. Paper SC/49/SH9. Scientific Committee. International Whaling Commission, Cambridge, United Kingdom.
- 96) Visser, F., Hartman, K.L., Pierce, G.J., Valavanis, V.D. and Huisman, J. 2011. Timing of migratory baleen whales at the azores in relation to the north atlantic spring bloom. Marine Ecology Progress Series 440:267-279.
- 97) Werdell, P.J. and Bailey, S.W. 2005. An improved in-situ bio-optical data set for ocean color algorithm development and satellite data product validation. Remote Sensing of Environment 98:122–140.
- Whitehead, H. 2002. Estimates of the current global population size and historical trajectory for sperm whales. Marine Ecology Progress Series 242:295-304.
- 99) Williams, R., Erbe, C., Ashe, E. and Clark, C.W. 2015. Quiet(er) marine protected areas. Marine Pollution Bulletin 100:154 –161.
- 100) Williams, R., Hedley, S. L., Branch, T. A., Bravington, M. V., Zerbini, A. N. and Findlay, K. P. 2011a. Chilean Blue Whales as a Case Study to Illustrate Methods to Estimate Abundance and Evaluate Conservation Status of Rare Species. Conservation Biology 25(3):526–535.
- 101) Williams, R., Hedley, S. L. and Hammond, P. S. 2006. Modeling distribution and abundance of Antarctic baleen whales using ships of opportunity. Ecology and Society 11(1).
- 102) Williams, R., Kaschner, K., Hoyt, E., Reeves, R. and Ashe, E. 2011b. Mapping Large-scale Spatial Patterns in Cetacean Density: Preliminary work to inform systematic conservation planning and MPA network design in the northeastern Pacific. Chippenham, UK, Whale and Dolphin Conservation Society. 51p.
- 103) Yochem, P.K. and Leatherwood, S. 1985. Blue whale (*Balaenoptera musculus*, Linnaeus, 1758). <u>In</u>: Ridgway, S.H. and Harrison, R. (Eds.). Handbook of Marine Mammals, Vol. 3: The Sirenians and Baleen Whales. Academic Press, London. pp. 193-240.

Anexo 1. Variables ambientales utilizadas en la SDM de Ballena azul.





Anexo 2. Lista de expertos consultados.

\mathbf{N}°	Institución	Cargo	Línea de investigación	N° Publicaciones/IP*	Respuesta
1	Cascadia Research, Estados Unidos	Biólogo investigador senior	Estudios en mamíferos marinos en el Pacífico Norte. Director de estudios a largo plazo relacionados al status, movimientos y comportamiento de ballenas azules, jorobadas y grises.	163/315.56	Sí
2	Universidad de Washington, Estados Unidos	Profesor e investigador asociado	Modelamiento ecológico, estadística. Conservación marina, redes tróficas marinas, cuotas de captura de pesca, grandes cetáceos	107/457.13	Sí
3	Centro suroeste de Ciencias de la Pesca, Servicio Nacional de Pesca de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), Estados Unidos	Biólogo investigador senior	Conservación de cetáceos, evaluación y mitigación de impactos antropogénicos en cetáceos y pinnípedos	176/272.81	Sí
4	Centro suroeste de Ciencias de la Pesca, Servicio Nacional de Pesca de la NOAA, Estados Unidos	Investigadora	Muestreo de transecto lineal aéreo, tendencias poblacionales y abundancias de cetáceos, modelación de distribución de cetáceos, pesca incidental		Sí

8	Instituto de Ciencias Oceanwide, Hawaii, Estados Unidos	Investigadora senior	Monitoreo acústico en ecosistemas marinos, uso de hábitat de cetáceos.	28/35.31	Sí
7	Centro suroeste de Ciencias de la Pesca, Servicio Nacional de Pesca de la NOAA, Estados Unidos	Líder del Programa Hábitat para Mamíferos Marinos y Riesgos	Modelos estadísticos para manejo de fauna silvestre, uso de datos ecosistémicos para predecir distribución de mamíferos marinos, identificación de hábitats críticos, evaluación espacial de riesgos e interpretación de tendencias y abundancias poblacionales.		Sí
6	Centro suroeste de Ciencias de la Pesca, Servicio Nacional de Pesca de la NOAA, Estados Unidos	Bióloga investigadora	Modelos predictivos de hábitat basados en densidad de cetáceos, correlaciones oceanográficas de abundancia y distribución de cetáceos	14/30.26	Sí
5	Centro de Estudio de Ballena azul, Universidad de Deakin, Victoria, Australia	Director investigador	Ecología y migración de Ballena azul, dinámica de surgencias y cambio climático, modelación de hábitat para Ballena azul, interacciones entre cetáceos y actividades industriales	30/55.38	Sí

9	Programa Hábitat para Mamíferos Marinos y Riesgos, Centro suroeste de Ciencias de la Pesca, NOAA, Estados Unidos	Oceanógrafo investigador	Oceanografía biológica y física, monitoreo de ballenas y delfines, estudio de patrones espaciales y temporales de variables oceanográficas para predecir distribución y abundancia de cetáceos	62/132.02	Sí
10	Programa Hábitat para Mamíferos Marinos y Riesgos, Centro suroeste de Ciencias de la Pesca, NOAA, Estados Unidos	Investigador y analista GIS	Sistemas de información geográfica, modelamiento geoespacial, técnicas de análisis y programación. Impactos antropogénicos en mamíferos marinos, sistemas de identificación automática, conservación y planificación marina.		Sí
11	Instituto Politécnico Nacional de México	Bióloga investigadora	Biodiversidad y dinámica de ecosistemas marinos	47/71.86	No
12	Proyecto "Sea Around Us", Unidad de Investigación en Mamíferos Marinos, Universidad de British Columbia, Canadá. Universidad de Freiburg, Alemania	Bióloga investigadora	Conservación, biogeografía y macroecología de organismos marinos, impactos antropogénicos en mamíferos marinos, planificación espacial y áreas marinas protegidas, modelación de distribución de especies y meta análisis.	65/126.07	No

13	NOAA, College of Charleston, Estados Unidos	Biólogo investigador	Investigación y manejo de ecosistemas costeros	58/45.65	No
14	Independiente, asociado a WDC, Reino Unido	Investigador senior asociado a WDC, Reino Unido. Director de campaña global de Áreas Marinas Protegidas	Conservación marina y cetáceos. Áreas marinas protegidas para mamíferos marinos	67/39.02	No
15	Unidad de Investigación en Mamíferos Marinos, Universidad de British Columbia, Vancouver, Canadá	Profesora y directora de la unidad de investigación de mamíferos marinos. Departamento de Zoología	Biología de mamíferos marinos, dinámica de poblaciones, bioenergética, pesquerías, análisis de datos.	243/359.69	No

^{*}Número de publicaciones e índice de impacto obtenidos desde Research Gate (https://www.researchgate.net).