



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



Evaluación de la condición corporal de la ballena azul en el Golfo de California: Índices visual y fotogramétrico

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN
MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

PRESENTA

JASIVI ARCOS DÍAZ

LA PAZ, BCS., ENERO DEL 2022



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de **La Paz, B.C.S.**, siendo las **12:00** horas del día **07** del mes de **Diciembre** del **2021** se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: **CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS** para examinar la tesis titulada: **“Evaluación de la condición corporal de la ballena azul en el Golfo de California: Índices visual y fotogramétrico”** del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	ARCOS	Apellido Materno:	DIAZ	Nombre (s):	JASIVI
-------------------	-------	-------------------	------	-------------	--------

Número de registro: **A 2 0 0 4 2 4**

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 2% de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI** **NO** **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:

El % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

“SATISFACE LOS REQUISITOS SEÑALADOS POR LAS DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS VIGENTES”

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

DRA. DIANE GENDRON LANIEL

Director de Tesis
Nombre completo y firma

DRA. CLAUDIA JANETL HERNÁNDEZ CAMACHO

Nombre completo y firma

DR. GUILLERMO MARTÍNEZ FLORES

Nombre completo y firma

DR. MARIO ANDRÉS PARDO RUEDA

Director de Tesis
Nombre completo y firma

DRA. ERICA CARONE

Nombre completo y firma

DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO

Nombre completo y firma
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



Arcos-Díaz_Tesis_2021-12-07.pdf

8 dic 2021

11601 palabras/63182 caracteres

Dr. Mario Alberto Castillo Soria

Arcos-Díaz_Tesis_2021-12-07.pdf

Resumen de fuentes

2%

SIMILITUD GENERAL

1	iefectividad.conanp.gob.mx INTERNET	<1%
2	tesis.ipn.mx INTERNET	<1%
3	es.scribd.com INTERNET	<1%
4	repositoriodigital.ipn.mx INTERNET	<1%
5	issuu.com INTERNET	<1%
6	www.vetmeduni.ac.at INTERNET	<1%
7	www.repositoriodigital.ipn.mx INTERNET	<1%
8	archive.org INTERNET	<1%
9	doczz.net INTERNET	<1%
10	ourarchive.otago.ac.nz INTERNET	<1%
11	revistas.unal.edu.co INTERNET	<1%
12	www.cienciasmarinas.com.mx INTERNET	<1%

Se excluyeron los depósitos de búsqueda:

Ninguno

Excluido del Informe de Similitud:

Bibliografía

Citas textuales

Citas

Coincidencias menores (10 palabras o menos)

Se excluyeron las fuentes:

Ninguno

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M.A. Castillo Soria', written in a cursive style.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 07 del mes de Diciembre del año 2021

El (la) que suscribe BM. JASIVI ARCOS DIAZ Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro A200424 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DRA. DIANE GENDRON LANIEL y DR. MARIO ANDRÉS PARDO RUEDA

y cede los derechos del trabajo titulado:

“Evaluación de la condición corporal de la ballena azul en el Golfo de California:
Índices visual y fotogramétrico”

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: jasarcosdiaz@gmail.com - dgendron@ipn.mx -

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

BM. JASIVI ARCOS DIAZ

Nombre y firma del alumno

DEDICATORIA

Este proyecto para mi fui un gran reto el cual nunca lo hubiera podido lograr sin el apoyo constante de todos ustedes. Gracias por siempre creer en mí y nunca dejarme caer.

A mi papá por todo el esfuerzo que ha hecho y darlo todo desde el día número uno en el que empezó este sueño de los dos. A mi mamá por siempre amarme y cuidarme a pesar de todas las dificultades. A mi hermano por ser mi más grande orgullo y mi mayor inspiración te amo de aquí al infinito.

A mis amigas que me han demostrado desde hace mucho que ya somos familia Karla, Moni y Andy no tengo palabras para agradecerles por siempre estar, pero sobre todo por permanecer en mis peores momentos.

A mi mejor amiga por siempre estar y a mi pedacito de cielo por inspirarme a ser una mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN) por darme la oportunidad de completar mis estudios de maestría en su excelente programa de posgrado. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por mi beca otorgada para realizar toda mi maestría, así como al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI), Beca Institucional de Posgrado del Instituto Politécnico Nacional y al proyecto SIP: 20200710, Condición corporal vs marcadores fisiológicos y bioquímicos en ballenas.

A mi directora de tesis la Dra. Diane Gendron, no hay forma de agradecerle la oportunidad que me diste, así como la confianza que depositaste en mí para realizar este proyecto. Gracias por enseñarme a ver de otra forma a las ballenas y lo increíble que puede ser el mar con ellas. A mi codirector de tesis el Dr. Mario Pardo, gracias por todo el interés que demostraste en este proyecto y por toda la paciencia que me tuviste de verdad aprendí muchas cosas. Al comité revisor la Dr. Claudia, Dra. Erica Carone y Dr. Guillermo Martínez, gracias por todas sus observaciones a este proyecto de verdad fueron muy valiosas para mí.

A mis padres por siempre apoyarme en todo y ser mi gran pilar. A mi hermano porque a pesar la distancia que hay entre nosotros sé que siempre podré contar contigo, así como tu conmigo. A toda mi familia, mis abuelos, mis tíos y primos por siempre preocuparse por mí en la distancia.

A mi familia paceña que se ha ido construyendo durante los últimos 8 años: Moni, Karla, Nishma, mi príncipe, la mochila, Clari, Cinthya, Chris, Migui, Andy, Kiko, Mely, Dorina, Geral, Regi, no existen las palabras para agradecerles por todos los momentos que hemos pasado, gracias por seguir acompañándome en esta etapa de mi vida, los extraño como no tienen idea.

A mis compañeros de maestría: Pacho, Fanny, Clau, Kike, Dámaris, Perla; por todas las risas y por todo el apoyo durante estos dos años. Gracias por darme la oportunidad de conocerlos y por su bonita amistad.

A mis amixes de laboratorio Cyndell y Vladir por toda la ayuda durante las clases, en campo y por acompañarme en todas las crisis existenciales y por cuidar a Patricia.

A la amiga que no sabía que necesitaba pero que llegó en el momento correcto: Mariana, amix tqm gracias por ser mi gran confidente en este último año.

A todos mis profesores del CICIMAR por todo lo aprendido en sus clases y al personal administrativo por toda la ayuda con los trámites necesarios.

Por último, pero no menos importante...a mi gran azul porque trabajar con el animal más grande del planeta es algo inexplicable y no tiene comparación alguna, sin duda es lo mejor que me ha pasado en la vida.

ÍNDICE

GLOSARIO	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
1 INTRODUCCIÓN	XI
2 ANTECEDENTES.....	XIII
2.1 Método de evaluación visual	XIII
2.2 Método fotogramétrico	XIV
3 JUSTIFICACIÓN.....	XVI
4 HIPÓTESIS.....	XVII
5 OBJETIVOS	XVIII
5.1 General.....	XVIII
5.2 Específicos.....	XVIII
6 METODOLOGÍA.....	XIX
6.1 Identificación y clasificación de los individuos	XIX
6.2 Evaluación visual de la condición corporal	XIX
6.3 Evaluación de la condición corporal mediante fotogrametría aérea	XXI
6.4 Comparación entre los métodos.....	XXIV
7 RESULTADOS.....	XXV
7.1 Evaluación de la condición corporal mediante evaluación visual	XXV
7.1.1 Comparación entre evaluadores.....	XXV
7.1.2 Evaluación visual durante el periodo 2006-2021	XXVI
7.1.3 Evaluación visual a nivel individual.....	XXVII
7.1.4 Diferencia entre sexos mediante el método de evaluación visual	XXVII
7.2 Evaluación de la condición corporal mediante fotogrametría aérea	XXIX
7.2.1 Sesgo del altímetro del VANT.....	XXIX
7.2.2 Análisis de fotografías aéreas.....	XXX
7.2.3 Índice de la condición corporal mediante fotogrametría aérea.....	XXXII
8 DISCUSIÓN	XXXIX
9 CONCLUSIONES	XLIV
10 RECOMENDACIONES.....	XLV
11 BIBLIOGRAFÍA	XLVI
10. ANEXOS	LV

Índice de Figuras

Figura 1. Ejemplo de fotografía seleccionada para la toma de mediciones morfométricas con visibilidad clara del largo (A) y ancho (B) del individuo.	XXI
Figura 2. Medidas morfométricas estimadas con el software MorphoMetriX.	XXII
Figura 3. Comparación de las evaluaciones visuales realizadas durante el periodo 2015-2017 por Casillas-López y Arcos-Díaz.....	XXV
Figura 4. Proporción de individuos por categoría de CC durante el periodo 2006-2021.....	XXVI
Figura 5. Evaluación visual a nivel individual de 18 individuos durante el periodo 2006-2021. Los colores indican la CC _{CV} : buena (verde), regular (amarillo) y mala (rojo). H=hembra, M=macho, c/c =hembras lactantes.....	XXVII
Figura 6. Proporción de la CC mediante evaluación visual de hembras y machos.	XXVIII
Figura 7. Sesgo del altímetro del VANT. Cada punto representa un objeto y su color varía en función a la altura a la que fue fotografiado, la línea gris punteada indica una relación 1:1.	XXIX
Figura 8. Desviación estándar (m) de los anchos de los individuos de ballena azul entre 10 réplicas de las estimaciones.	XXXI
Figura 9. Desviación estándar (m ²) de las áreas de los individuos de ballena azul entre 10 réplicas de las estimaciones.	XXXII
Figura 10. Desviación estándar (m) interindividual de las áreas de los individuos de ballena azul.	XXXII
Figura 11. Modelo 1: área media en función de la longitud total. Modelo 2: área media en función de la longitud del área media. Los puntos representan a los individuos, la línea continua indica la media, mientras que el área sombreada representa las predicciones en los cuantiles 2.5% y 97.5%.	XXXIII
Figura 12.. Índice de la CC mediante el método de fotogrametría aérea. El eje x corresponde al ID de cada individuo, mientras que el eje y representa el índice de la CC. Las etiquetas indican la longitud total de cada individuo y los colores diferencian el sexo de los individuos.....	XXXIV
Figura 13. Diferencia del índice de CC _{FA} entre hembras (color rojo) y machos (color azul).	XXXV
Figura 14. Comparación del individuo con el residuo positivo más alto (A = 1.61 m ²) contra el individuo con el residuo positivo más bajo (B = -1.82 m ²).....	XXXVI
Figura 15. Comparación entre los índices de la CC. El eje x corresponde al ID de cada individuo, mientras que el eje y representa el índice de la CC. Las etiquetas indican la longitud total de cada individuo y los colores diferencian CC de cada individuo asignada con el método de evaluación visual.	XXXVII
Figura 16. Diferencia de residuos obtenidos mediante CC _{FA} en individuos categorizados con una CC _{CV} buena y una CC _{CV} regular.....	XXXVIII
Figura 17. Comportamiento asociado a la actividad de alimentación de la ballena azul.	XLIII
Figura 18. Fotografías de vertebras según el grado de exposición: a) valor de 1, b) valor de 2 y c) valor de 3.	LV
Figura 19. Fotografías de la depresión poscraneal según el grado de exposición: a) valor de 1, b) valor de 2 y c) valor de 3.	LV
Figura 20. Fotografías de la escápula y los flancos laterales según el grado de exposición: a) valor de 1, b) valor de 2.	LVI

Índice de tablas

Tabla I. Combinaciones obtenidas y clasificadas en las cuatro categorías de CC (Tomado de Casillas-López, 2016).....	XX
Tabla III. Resumen de las distribuciones posteriores de las proporciones de la CC mediante evaluación visual de hembras y machos.	XXVIII
Tabla IV. Número de individuos fotografiados con el VANT durante el periodo de estudio.	XXX
Tabla V. Sexo, clase reproductiva y edad mínima estimada de los individuos fotografiados con el VANT y fotoidentificados dentro del catálogo de ballena azul del CICIMAR-IPN..	XXX
Tabla VI. Resumen de las distribuciones posteriores de las medias (m ²) del índice de CC mediante fotogrametría aérea de hembras y machos.....	XXXV
Tabla VII. Resumen de las distribuciones posteriores de las medias (m ²) del índice de CC mediante CC _{FA} por categoría de CC _{CV}	XXXVIII

GLOSARIO

Área: Medida de un espacio bidimensional delimitado por un contorno al que se denomina perímetro.

Altímetro: Instrumento para medir la altura de un objeto por encima de un nivel determinado o una superficie de referencia.

Condición corporal: Cantidad o proporción del tejido de reserva que dispone un animal.

Crecimiento alométrico: Crecimiento diferencial de diferentes partes del cuerpo.

Fotogrametría: Técnica que tiene como objetivo obtener las dimensiones y posición de objetos en el espacio, a través de medidas realizadas a partir de fotografías.

Fotoidentificación: Técnica de estudio que permite la identificación de individuos a través de fotografías. Suele fotografiarse alguna característica física única en cada individuo, que se encuentre presente durante toda su vida.

Longitud: Dimensión de un cuerpo considerando su extensión en una línea recta.

Misticetos: Organismos pertenecientes al orden Cetacea que se alimentan de krill a través de la filtración con ayuda de las barbas que presentan.

Pixel: Unidad básica de una imagen digitalizada en pantalla a base de puntos de color o en escala de grises.

RESUMEN

La condición corporal (CC) es una medida relativa de la cantidad de grasa subcutánea que poseen los organismos. Existen dos métodos para su evaluación en cetáceos: la cualificación visual (CC_{CV}) y la fotogrametría aérea (CC_{FA}). Se ha observado un decremento de la CC de las ballenas azules (*Balaenoptera musculus*) que migran anualmente al Golfo de California en 2015 y 2016 con respecto al periodo 2006-2014 de acuerdo con la CC_{CV}. Por lo anterior, se plantea evaluar la CC de la especie utilizando y comparando ambas metodologías. Se realizó la CC_{CV} de 104 individuos para el periodo 2017-2021 completando un periodo de 15 años, en donde se detectó una tendencia negativa en la proporción de individuos con CC_{CV} buena. Por otra parte, se obtuvieron fotografías aéreas de 26 individuos de ambos sexos entre 2016 y 2021, de los cuales se tomaron 21 mediciones morfométricas mediante el software MorphoMetriX. Para estimar la CC_{FA}, se usó el área con mayor variación entre los individuos, la cual fue denominada como área media y correspondió a la sección entre el 30% y el 60% desde la punta la punta del rostro hasta la muesca de la cola (longitud total); posteriormente se realizó una regresión lineal generalizada bayesiana del área media como una función de la longitud total. Los residuos individuales de dicha regresión representaron su CC_{FA}. El mejor modelo presentó un R² bayesiano de 0.947 (0.945-0.948). De 26 ballenas evaluadas, 14 presentaron residuos positivos, mientras que 12 presentaron residuos negativos. La probabilidad de que las hembras tuvieran una mayor CC_{FA} que los machos fue del 100% con una diferencia promedio de 0.67 m². La comparación de métodos indicó que ballenas categorizadas con una CC_{CV} buena obtuvieron un CC_{FA} medio de +0.69 m² (0.61 – 0.77), mientras que las que fueron categorizados con una CC_{CV} regular obtuvieron una media de -0.49 m² (-0.59 – -0.40). La probabilidad de que las dos categorías de CC_{CV} presenten CC_{FA} diferentes fue de 100% con una diferencia de 1.19 m² xx. Esto indica que la CC_{CV} es estadísticamente confiable al compararla con la cuantitativa CC_{FA}.

ABSTRACT

Body condition (BC) is a relative measure of the amount of subcutaneous fat that organisms have. There are two methods for cetaceans: visual qualification (BC_{VC}) and aerial photogrammetry (BC_{AF}). There has been a decrease in the BC of blue whales (*Balaenoptera musculus*) that migrate annually to the Gulf of California during 2015 and 2016 compared to the 2006-2014, according to the BC_{VC} . Given this, we aimed to assess the species' BC using and comparing both methods. The BC_{VC} of 104 individuals was carried out during 2017-2021, completing a 15-year period, during which a negative trend was detected in the proportion of individuals with good BC_{VC} . On the other hand, aerial photographs of 26 individuals were obtained between 2016 and 2021, from which 21 morphometric measurements were taken using the MorphoMetriX software. To estimate the BC_{AF} , the dorsal area of the section between 30% and 60% of the total length of the animal was used as a function of its total length. The individual residuals of that model represented the BC_{AF} . The best model presented a Bayesian R^2 of 0.947 (0.945-0.948). Of 26 whales, 14 had positive residuals and 12 were negative. The probability that females had higher BC_{AF} than males was 100% with a difference of 0.67 m² xx. The comparison of methods indicated that whales categorized with a good BC_{VC} obtained a mean BC_{AF} of +0.69 m² (0.61 – 0.77), while those with a regular BC_{VC} obtained a mean of -0.49 m² (-0.59 – -0.40). The probability that the two BC_{VC} categories presented different BC_{AF} was 100% with a positive mean difference of 1.19 m². This indicates that the BC_{VC} is statistically reliable when compared to the quantitative BC_{AF} .

1 INTRODUCCIÓN

Las ballenas barbadas o misticetos llevan a cabo largas migraciones (Lockyer & Brown, 1981), para lo cual desarrollaron una importante capa de grasa con funciones de aislamiento térmico (Parry, 1949), flotabilidad e hidrodinámica (Nousek-McGregor *et al.*, 2014), protección de los órganos internos (Iverson, 2009) y depósito de energía (Lockyer, 1987). Esta capa de grasa se asocia con el éxito reproductivo (Lockyer, 1986; Vikingsson, 1995; Haug *et al.*, 2002), ya que cuando disminuye su grosor, la tasa de fecundidad también disminuye, lo cual tiene repercusiones en la dinámica poblacional de las especies (Lockyer, 1986; Williams *et al.*, 2013). La relación anterior se encontró a partir de datos morfométricos de animales cazados, pero a partir de su protección en 1986 (CBI, 1986), se han promovido métodos no invasivos para medir de manera indirecta sus reservas de energía. A esto se le denomina la evaluación de la condición corporal (CC) (Edmoson *et al.*, 1989), la cual se ha llevado a cabo mediante cualificación visual (CC_{CV}) (Pettis *et al.*, 2004; Bradford *et al.*, 2012) y fotogrametría aérea (CC_{FA}) (Perryman & Lynn, 2002; Miller *et al.*, 2012).

Para varias especies de cetáceos, la CC_{CV} obtenida a partir de acervos fotográficos de identificación individual, se basa en un índice que evalúa una o más partes del cuerpo visibles en superficie, como la región cervical, la columna vertebral, la escápula o los flancos laterales (Pettis *et al.*, 2004; Bradford *et al.*, 2012). Sin embargo, la CC_{FA} permite medir y analizar imágenes para determinar el tamaño y forma de los objetos (Guo *et al.*, 2010). Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) se han usado recientemente como herramienta no invasiva para llevar a cabo varios tipos de muestreos biológicos, gracias a su rápido desarrollo y bajo costo (p. ej. Adame *et al.*, 2017; Apprill *et al.*, 2017; Pirotta *et al.*, 2017; Aniceto *et al.*, 2018; Domínguez-Sánchez *et al.*, 2018; Torres *et al.*, 2018). En particular, se ha demostrado la capacidad de monitorear con precisión el tamaño y la CC de algunas especies de cetáceos (Durban *et al.*, 2015; Christiansen *et al.*, 2016).

La ballena azul (*Balaenoptera musculus*) es actualmente el animal viviente más grande y se encuentra catalogado en la IUCN (Unión Internacional para la

Conservación de la Naturaleza) como en peligro de extinción (Cooke, 2018). Esta especie presenta una distribución cosmopolita, realizando migraciones anuales desde sus zonas de alimentación hacia sus zonas de reproducción y crianza (Yochem & Leatherwood, 1985). Específicamente en el Pacífico noreste, las ballenas azules se encuentran desde el Golfo de Alaska hasta las costas de la Península de Baja California (Calambokidis *et al.*, 1990; Sears & Calambokidis, 2002) y el Domo de Costa Rica (Bailey *et al.*, 2009). Parte de esta población migra hacia el Golfo de California (Anexos figura 18) de otoño a primavera, siendo considerada un área importante de reproducción, crianza y de alimentación (Gendron, 2002; Busquets-Vass *et al.*, 2020). Esta región se caracteriza por su alta productividad primaria, gracias a diferentes mecanismos como la mezcla por mareas y las surgencias estacionales, que permiten que el Golfo de California sea un hábitat permanente o estacional para la reproducción y crianza de diversas poblaciones de invertebrados, peces, aves y mamíferos marinos (Álvarez-Borrego & Lara-Lara, 1991; Lluch-Cota *et al.*, 2007).

Dado el decremento de la CC_{CV} observado en animales fotografiados en 2015 y 2016, comparado con el periodo de 2006-2014 en el suroeste del Golfo de California (Casillas López *et al.*, 2018), se propone en la presente tesis desarrollar un índice con medidas morfométricas obtenidas a partir de CC_{FA} para complementar el método de CC_{CV} desarrollado para esta especie. Con lo anterior, se espera obtener un monitoreo cuantitativo de la CC de los individuos que migran anualmente al Golfo de California.

2 ANTECEDENTES

La CC de un animal representa el estado nutricional o de las reservas de energía con las que cuenta cada organismo (Schulte-Hostedde *et al.*, 2001). Para poder cuantificar dichas reservas se han desarrollado diferentes índices de CC, los cuales se basan en análisis morfológicos, bioquímicos o fisiológicos (Peig & Green, 2009).

Los primeros estudios que evaluaron la CC en cetáceos se basaron en medidas morfométricas como el grosor de la grasa en diferentes partes del cuerpo (Lockyer *et al.*, 1985). Se ha encontrado que, al disminuir el alimento, disminuye el grosor de grasa, afectando las reservas de energía y disminuyendo los cuerpos lúteos en las hembras (Williams *et al.*, 2013)

2.1 Método de evaluación visual

El método de CC_{CV} comenzó a implementarse en especies terrestres de importancia comercial como lo son las vacas (Edmoson *et al.*, 1989). En cetáceos, se ha llevado a cabo por medio de fotografías tomadas a organismos de vida libre. Uno de los primeros estudios en cetáceos utilizando esta metodología, fue desarrollado para la ballena franca del Atlántico Norte (*Eubalaena glacialis*), esta evaluación se llevó a cabo mediante un sistema de puntuación basado en la estimación de la cantidad relativa de grasa subcutánea en la región cervical (Pettis *et al.*, 2004). El mismo sistema de puntuación fue replicado en otras especies como la ballena gris (*Eschrichtius robustus*), en este caso se tomaron en cuenta tres regiones corporales: el área poscraneal, la región escapular y los flancos laterales. Los resultados de dicho estudio realizado en una zona alimentación en las costas de Rusia, sugieren que la CC de las ballenas grises mejora significativamente a medida que la temporada de alimentación avanzaba (Bradford *et al.*, 2012). Por otra parte, con base en el mismo índice, se evaluó la CC de la misma especie en un área de reproducción y crianza en las costas de Baja California Sur México durante el periodo 2008-2011, encontrándose un decremento significativo de la CC en 2009 y

2010, dichos cambios pudieron estar relacionados con el evento El Niño de 2009 (Calderón-Yáñez, 2013).

Así mismo, se ha evaluado la CC_{CV} en algunas especies pertenecientes a la familia Balaenopteridae, como la ballena de aleta (*Balaenoptera physalus*) (Arcos-Díaz, 2018) y la ballena azul (Casillas-López, 2016). Ambos estudios se realizaron en el Golfo de California y se evaluó la CC de estas especies a lo largo de largas series de tiempo 2003-2016 y 2006-2015 respectivamente, logrando detectar cambios significativos a través de los años. Específicamente para ballena azul, durante la mayor parte del periodo de estudio, se observó que el 60% de los individuos presentaron una CC buena. Sin embargo, a partir de 2011 y particularmente en 2015, se observó una mayor proporción de individuos con una CC mala o comprometida.

2.2 Método fotogramétrico

La fotogrametría se ha utilizado para obtener medidas morfométricas como la longitud total, circunferencia y masa corporal de diferentes especies de pinnípedos como el elefante marino del sur (Bell *et al.*, 1997) (*Mirounga leonina*), la foca monje de Hawái (McFadden *et al.*, 2006) (*Neomonachus schauinslandi*), el lobo marino de Galápagos (*Zalophus wollebaeki*) (Meise *et al.*, 2014) y la foca leopardo (*Hydrurga leptonyx*) (Krause *et al.*, 2017).

En cetáceos, el uso de la técnica de fotogrametría se ha llevado a cabo principalmente mediante fotografías aéreas. Inicialmente las fotografías utilizadas se obtenían desde helicópteros y avionetas (Perryman & Lynn, 2002; Fearnbach *et al.*, 2011; Miller *et al.*, 2012). Con el advenimiento de los VANT se ha facilitado el monitoreo de la CC de diferentes especies y poblaciones. Por ejemplo, dentro del grupo de odontocetos, se evaluó la CC de individuos pertenecientes a la población de orcas (*Orcinus orca*) residentes del sur de la Isla de Vancouver, antes y después de la temporada de la migración de su presa preferencial el salmón; observándose un decline de la CC que sugería una baja disponibilidad de presas (Durban *et al.*, 2015). En mysticetos, se ha observado cambios intraestacionales (Christiansen *et al.*, 2016),

interanuales (Christiansen *et al.*, 2021) e interpoblaciones (Christiansen *et al.*, 2020) de la CC de ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*), ballena gris (*E. robustus*) y ballena franca (*Eubalaena sp.*), respectivamente. Específicamente para la ballena azul, se ha estimado su longitud total y el ancho del cuerpo al 40% de dicha longitud, a partir de imágenes de 22 individuos. Con esta última medida se logró observar una variabilidad en el ancho del cuerpo de las ballenas, lo que se asume refleja la CC de los individuos demostrando así el éxito de los VANT para el monitoreo de los cambios en la CC de la especie (Durban *et al.*, 2016).

3 JUSTIFICACIÓN

El decremento reportado en la CC de las ballenas azules que migran hacia el Golfo de California posiblemente está relacionado con cambios en la abundancia y distribución de sus presas. Lo anterior puede deberse a que en años recientes (2015-2016) se ha registrado un aumento de la temperatura superficial del mar y un decremento notorio en la biomasa de eufáusidos en la costa occidental de Baja California (Lavaniegos *et al.*, 2019), uno de los lugares de alimentación de la ballena azul (Fiedler *et al.*, 1998; Nickels *et al.*, 2018). El estrés nutricional en mysticetos también puede ser consecuencia de actividades antropogénicas, como el incremento del ruido (McDonald *et al.*, 2006). Sin embargo, se desconoce el efecto de estas fuentes de estrés y su incremento sobre la salud de esta población de ballenas azules (McDonald *et al.*, 2006).

La CC_{CV} para esta especie ha sido de gran ayuda para monitorear los cambios en la CC, sin embargo, es necesario implementar técnicas cuantitativas no subjetivas que permitan analizar en detalle el aparente decremento en la CC de las ballenas azules que migran al Golfo de California, que podría estar afectando su tasa reproductiva (Valenzuela-Molina *et al.*, 2018; Atkinson *et al.*, 2019).

4 HIPÓTESIS

Dada la aparente CC deficiente de las ballenas azules en los últimos años en el suroeste del Golfo de California (Casillas-López, 2018), se espera una tendencia similar en la CC_{CV} en individuos fotografiados en el periodo 2017-2021. Por otra parte, dado el éxito que ha mostrado CC_{FA} para el monitoreo de diferentes clases reproductivas en diferentes especies de cetáceos (Durban *et al.*, 2015; Christiansen *et al.*, 2016; 2019; 2020; 2021), se espera que el índice desarrollado para esta especie aporte resultados más precisos para complementar un mejor análisis de la CC de los individuos de ballena azul que migran al Golfo de California.

5 OBJETIVOS

5.1 General

Evaluar la CC de las ballenas azules que migran hacia el Golfo de California mediante índice visual y fotogrametría aérea.

5.2 Específicos

1) Evaluar la tendencia temporal de la CC de la ballena azul mediante el método de evaluación visual durante el periodo 2017-2021 y compararlo con el periodo 2006-2016.

2) Estimar las fuentes de sesgo existentes en las estimaciones de CC_{FA} y CC_{CV} .

3) Desarrollo de un índice de CC para la especie a partir de CC_{FA} .

4) Comparación de los resultados obtenidos en individuos evaluados con ambos índices de CC.

6 METODOLOGÍA

6.1 Identificación y clasificación de los individuos

Para identificar a los individuos de ballena azul se utilizó un método de foto-identificación donde primero se clasifica la forma de la aleta dorsal del individuo y posteriormente se identifica el patrón único de pigmentación de la piel, lo cual agiliza la comparación entre fotografías (Gendron & Ugalde de la Cruz, 2012).

La información del sexo de los individuos fue obtenida de la base de datos del Laboratorio de Ecología de Cetáceos del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR). Esta información proviene de análisis moleculares, tanto de la piel descamada como de la piel de biopsias (Enríquez-Paredes, 2005). Este procedimiento se ha realizado de manera sistemática en colaboración con el Laboratorio de Genética de Poblaciones de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

Los individuos fueron clasificados en cuatro categorías reproductivas: 1) crías, 2) hembras lactantes, 3) individuos sexualmente maduros e 4) individuos sexualmente inmaduros. Las hembras lactantes y las crías se categorizaron considerando su acercamiento y asociación entre ellas. De acuerdo a su registro fotográfico, los individuos maduros fueron aquellos mayores a 8 años, edad en la que una hembra foto-identificada desde cría tuvo su primera cría (Valenzuela Molina *et al.*, 2018). La edad mínima de cada individuo se determinó como el tiempo transcurrido entre el primer avistamiento hasta el último.

6.2 Evaluación visual de la condición corporal

Para evaluar la CC_{CV} de los individuos de ballena azul en las temporadas 2017-2021, se utilizó el mismo método aplicado entre 2006 y 2016 (Casillas-López, 2016). Este índice se basa en la evaluación en conjunto del grado de visibilidad de tres partes anatómicas: 1) vértebras, 2) depresión poscraneal y 3) escápula y flancos laterales. A cada una de estas partes se le asignó un valor numérico según el grado de visibilidad. Tanto para las vértebras (Anexos, figura 19) como para la

depresión poscraneal (Anexos, figura 20), el valor asignado varió de 1 a 3, correspondiendo 1 a la nula exposición de la región, 2 a la visibilidad de la región y 3 cuando las regiones eran prominentes. Para la escápula y los flancos laterales (Anexos, figura 21), los valores asignados fueron: 1 si eran evidentes o 2 si no eran evidentes. Si no se tenía la fotografía correspondiente a alguna de las regiones corporales se asignaba X. Según el valor registrado para cada región del cuerpo, se obtuvo una combinación numérica, a partir de la cual se categorizó cada individuo dentro de una de las cuatro categorías propuestas: 1) Buena, 2) Regular, 3) Mala y 4) Desconocida (Tabla I).

Tabla I. Combinaciones obtenidas y clasificadas en las cuatro categorías de CC (Tomado de Casillas-López, 2016).

Buena	1111, 1112, 11X1, 1X11, 1X12, 1XX1, 1XX2, 1XXX, 2111
Regular	2112, 2121, 2122, 2211, 2212, 212X, 21X1, 2X21, 2221
Mala	3121, 3221, 3321, 3322, 3X21, 3X2X, 3XX1, 3XX2
Desconocida	2XX1, 2XXX, X121, XX1X, XXXX.

Se obtuvo el número de individuos evaluados en cada una de las categorías de CC_{cv} para analizar los cambios a través del tiempo. Para lo anterior se realizó una regresión lineal generalizada bayesiana (BGLM) en donde primero se definió el proceso de verosimilitud del número de individuos por categoría (N) en cada temporada (q), proveniente de una distribución binomial la cual presenta dos parámetros: la proporción de individuos por categoría (P) y el total de individuos (T) en cada uno de los años:

$$1) N_q \sim Bin(P_q, T_q)$$

Tales proporciones se estimaron en función de cada año del periodo de estudio (Y):

$$2) P_q = \varpi + \tau \cdot Y_q$$

Por otra parte, se monitoreó la CC_{CV} a nivel individual de 18 ballenas (8 machos y 10 hembras), las cuales presentan fidelidad al sitio siendo vistos con mayor frecuencia en el periodo de estudio.

Por último, para medir el nivel de concordancia entre los dos evaluadores participantes, se comparó el número de individuos por categoría de CC_{CV} (2015-2017) mediante un test de Kendall. Esta prueba arroja un coeficiente entre 0 y 1 donde valores cercanos a 0 indican un nivel bajo de concordancia mientras que valores cercanos a 1 indican un nivel alto.

6.3 Evaluación de la condición corporal mediante fotogrametría aérea

Para evaluar la CC_{FA} , se usó el VANT Phantom 3 Standard con autonomía de vuelo de aproximadamente 21 minutos. Primero se llevó a cabo la foto identificación del individuo durante un seguimiento focal para identificar su patrón de buceo e intentar predecir *in situ* el momento del próximo intervalo en superficie (Domínguez Sánchez *et al.*, 2018). Luego, se procedió a lanzar el VANT cuando el individuo se encontraba a una distancia de 100 a 300 m de la embarcación, para tomar fotografías completamente verticales a una altura de 20 a 40 m.

Para llevar a cabo las mediciones, se seleccionaron las fotografías en las que se contaba con claridad visual de todo el animal y el individuo se encontraba más cercano a la superficie con su cuerpo totalmente extendido (p. ej. Figura 1).

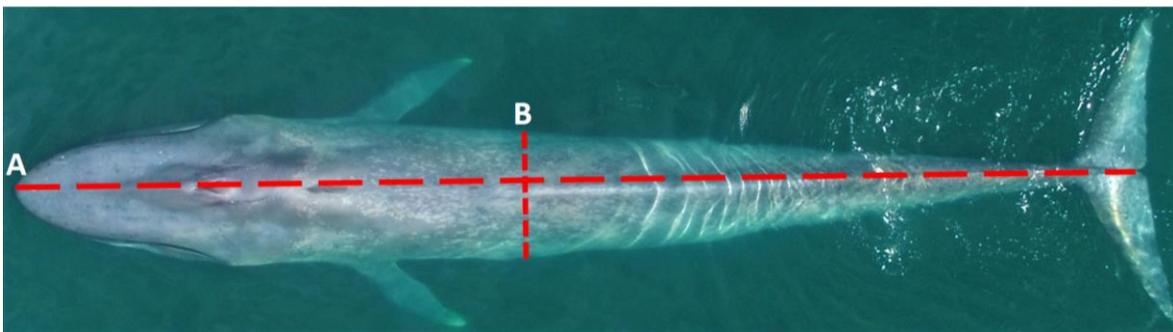


Figura 1. Ejemplo de fotografía seleccionada para la toma de mediciones morfométricas con visibilidad clara del largo (A) y ancho (B) del individuo.

Para convertir las medidas relativas originales (píxeles) a medidas absolutas (metros), se utilizó el software MorphoMetriX (Torres & Bierlich, 2020), el cual utiliza la apertura del lente (mm), altura del VANT (m) y dimensión del píxel (mm/píxel). El software usa como referencia la longitud total del individuo, establecida manualmente desde la punta del rostro hasta la muesca de la cola. Luego, de manera automática, el software dividió el cuerpo del animal transversalmente en 10 segmentos de igual longitud y calcula sus áreas dibujándose manualmente como un trapecio entre los límites de cada segmento y cómo un triángulo el primer y último segmento. La sumatoria de todas las áreas fue interpretada como el área dorsal de cada individuo (Figura 2).

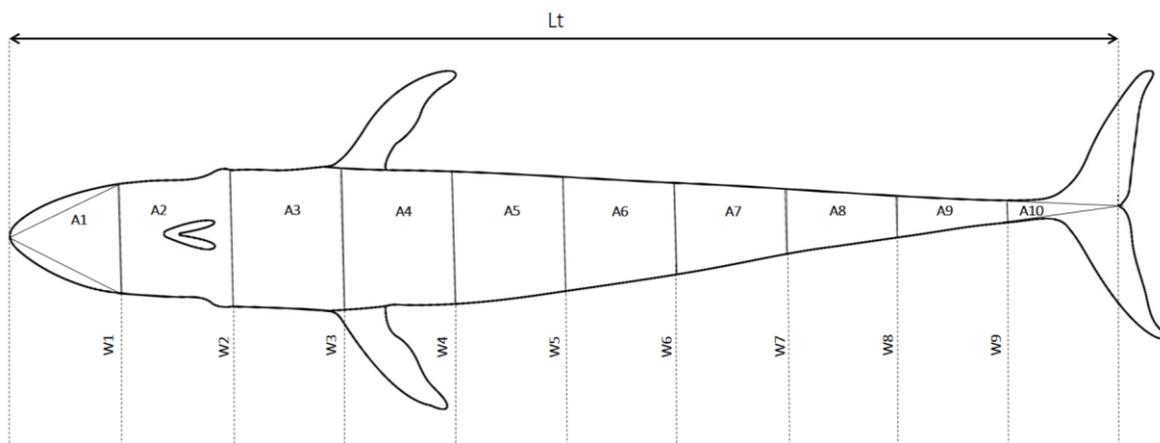


Figura 2. Medidas morfométricas estimadas con el software MorphoMetriX.

Para considerar el sesgo del error humano al utilizar el software, se llevaron a cabo 10 repeticiones de cada medición, para cada individuo y se obtuvo la media y la desviación estándar de cada medida morfométrica.

Por otra parte, para tener en cuenta el sesgo en la estimación en la altura registrada por el VANT, se tomaron fotografías a diferentes alturas de diversos objetos de longitud conocida para luego estimarlas con el procedimiento referido. Para resolver el sesgo, se definió el proceso de verosimilitud de las distancias reales (r) de cada objeto (q), proveniente de una distribución normal con una media y una varianza (σ^2):

$$3) r_q \sim N(\mu_q, \sigma^2_q)$$

Se realizó una BGLM para estimar las medias de las longitudes reales de objetos de medida conocida (μ) en función de la longitud estimada por el software (lt) y de la altura a la cual se tomaron las fotografías (hd):

$$4) \mu_p = \omega + \theta \cdot lt_p + \lambda \cdot hd_p$$

Con las distribuciones posteriores de los coeficientes obtenidos en la regresión anterior, se predijeron las longitudes totales reales ($ltrs$) para cada individuo (m) a partir de la longitud total estimada por el software (ls) y las lecturas de la altura del VANT ($hd2$):

$$5) ltrs_m = \omega + \theta \cdot ls_m + \lambda \cdot hd2_m$$

Se adecuó el modelo de CC_{FA} de la especie para lo cual se definió el proceso de verosimilitud de las áreas de mayor variación (a) de cada individuo (m), proveniente de una distribución normal con una media (μa) y una varianza (σ^2):

$$6) a_m \sim N(\mu a_m, \sigma^2_m)$$

Las medias de las áreas de mayor variación (μa) se estimaron como una función polinómica de segundo grado de la longitud total real estimada ($ltrs$), después de probar dos niveles de complejidad de curva se eligió el mejor modelo según el criterio de desviación de la información (DIC):

$$7) \mu a_m = \delta + \beta \cdot ltrs_m + \beta 2 \cdot ltrs_m^2$$

Se interpretaron los residuos (r) de esta función como una medida cuantitativa de la CC de la especie:

$$8) r = a_m - \mu a_m$$

Dado el crecimiento alométrico de la ballena azul (una parte del cuerpo crece más rápido que otra) y que individuos crías y juveniles tienen algunas partes del cuerpo en diferentes proporciones en comparación con individuos adultos (Ortega-Ortiz *et al.*, 2018), se ajustó el polinomio anterior, reemplazando la longitud total por la longitud de las áreas de mayor variación (la).

$$9) \mu a_m = \delta + \beta \cdot la_m + \beta_2 \cdot la_m^2$$

Todas las distribuciones posteriores de los parámetros de interés para ambas metodologías de CC se estimaron mediante un procedimiento iterativo de 3 cadenas independientes de Markov Monte Carlo (MCMC), implementado en el lenguaje JAGS (Plummer, 2003) en R (R Development Core Team, 2019). Cada cadena constó de 1'000,000 de iteraciones, de las cuales se descartó una fase inicial de calentamiento del 10% y se hizo un filtrado manteniendo una de cada 20 iteraciones para evitar autocorrelación de las cadenas.

6.4 Comparación entre los métodos

Para comparar ambas metodologías, la CC_{FA} con la CC_{CV} , de los individuos que se evaluaron con ambos índices. Se obtuvieron y compararon las distribuciones posteriores de las medias de los residuos para cada clasificación de CC_{CV} . Para esto, se calculó la probabilidad que la diferencia entre ambas adoptara un valor positivo o negativo según el caso, con base en la proporción de la distribución posterior mayores o menores a cero, respectivamente (Gelman *et al.*, 2014).

7 RESULTADOS

7.1 Evaluación de la condición corporal mediante evaluación visual

7.1.1 Comparación entre evaluadores

La comparación entre los dos evaluadores participantes arrojó que la mayor diferencia se encuentra en los individuos categorizados con una CC_{CV} buena, mientras que la menor discrepancia se observa en los individuos con CC regular (Figura 3). Por otra parte, la prueba de Kendall arrojó un valor de 1, lo cual indica que existe un alto nivel de concordancia entre los evaluadores.

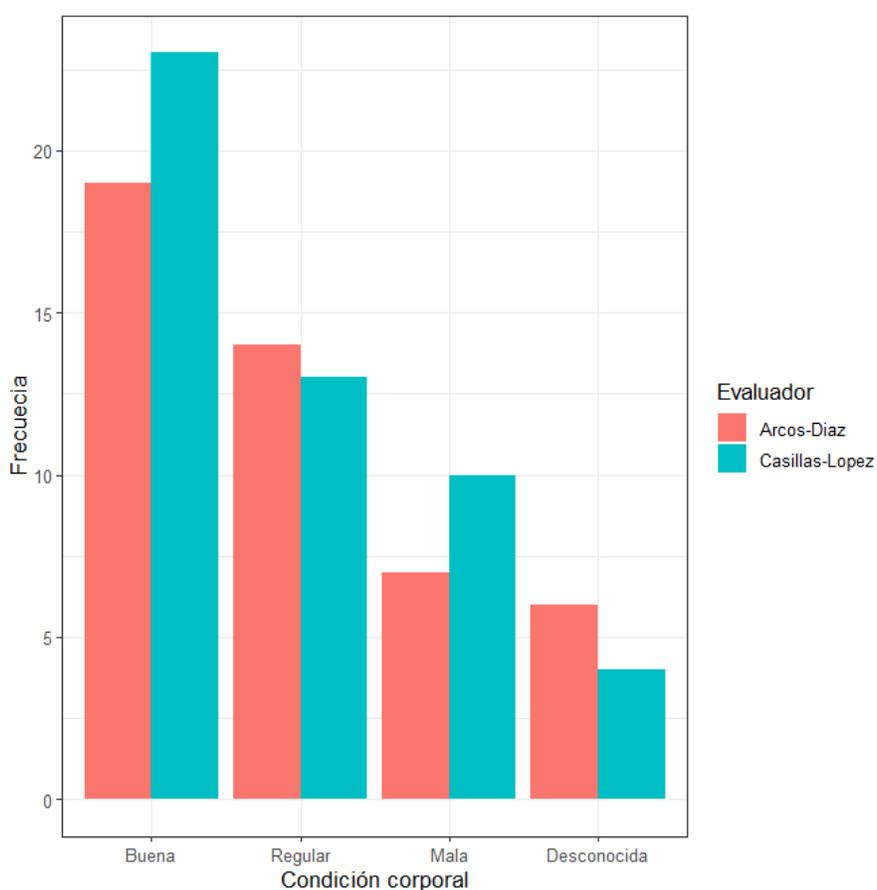


Figura 3. Comparación de las evaluaciones visuales realizadas durante el periodo 2015-2017 por Casillas-López y Arcos-Díaz.

7.1.2 Evaluación visual durante el periodo 2006-2021

Las evaluaciones visuales de 2017 a 2021 completan un periodo de 15 años en el que se detectó una tendencia a la disminución de individuos con una CC buena, en contraste con un aumento de individuos con CC regular y una proporción constante de individuos con mala condición (Figura 4). Lo anterior se confirma con el valor negativo de la pendiente para la categoría de CC buena (-0.13) y las pendientes positivas para la CC regular (0.09) y mala (0.03).

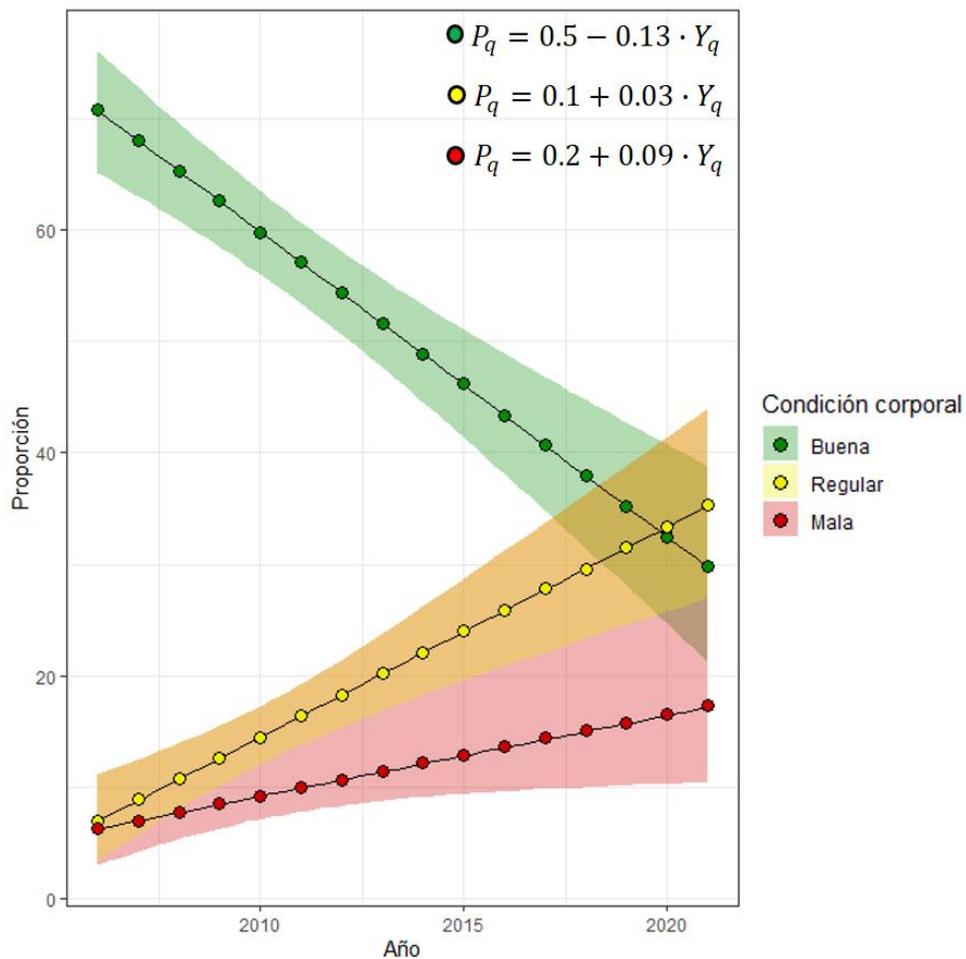


Figura 4. Proporción de individuos por categoría de CC durante el periodo 2006-2021.

7.1.3 Evaluación visual a nivel individual

La evaluación de la CC a nivel individual de las 18 ballenas seleccionadas muestra la misma tendencia que las evaluaciones a nivel poblacional, ya que se presenta una mayor proporción de individuos con una CC buena durante los primeros años del periodo de estudio. A partir de 2011 se observa un aumento en la proporción de individuos una CC regular o mala (Figura 5). Así mismo con este tipo de evaluación se detectaron individuos que desde los primeros años de análisis muestran una CC comprometida y que esta es constante durante todo el periodo de estudio, ejemplo de estos individuos son el macho 144, así como las hembras 266 y 667.

id	SEXO	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
12	M	Verde	Verde	Verde	Amarillo	Verde			Verde	Amarillo	Amarillo	Amarillo	Verde	Amarillo	Amarillo		
67	M							Verde			Amarillo			Amarillo	Amarillo		
144	M		Amarillo	Rojo	Rojo	Amarillo		Rojo	Rojo		Rojo	Rojo	Amarillo	Amarillo	Rojo	Amarillo	Rojo
240	M		Verde										Verde		Verde	Verde	Amarillo
249	M		Verde		Verde		Verde	Amarillo	Verde	Verde			Verde		Verde		
311	M	Verde	Verde	Verde					Verde								
321	M	Verde		Verde				Verde		Verde			Verde				
448	M		Verde		Rojo						Rojo				Amarillo		
49	H	Verde			Verde	Verde	Amarillo	Verde					Verde		Rojo	Verde	
59	H	Verde	Verde	Verde	Verde											Verde	
75	H	Verde			Rojo		c/c			Verde			Rojo			Amarillo	
119	H		Verde	Rojo	Verde	Verde	Amarillo	c/c			Amarillo						
124	H	Verde	Verde	Verde	Verde												
127	H	Verde		Verde			c/c			Amarillo	c/c	Rojo	Amarillo		Verde	Verde	
266	H				Amarillo	Amarillo		Rojo	Rojo	Amarillo	Rojo						
398	H	Verde	Amarillo		Verde					Verde					Verde	Verde	
477	H	Verde		Rojo	Amarillo			Amarillo		Verde						Amarillo	Verde
667	H			Verde				Rojo	Rojo	Amarillo	Amarillo			Amarillo		Amarillo	Amarillo

Figura 5. Evaluación visual a nivel individual de 18 individuos durante el periodo 2006-2021. Los colores indican la CC_{CV}: buena (verde), regular (amarillo) y mala (rojo). H=hembra, M=macho, c/c =hembras lactantes.

7.1.4 Diferencia entre sexos mediante el método de evaluación visual

Se observó una mayor proporción de hembras con una CC buena (75%), así como una mayor proporción de machos con una CC mala (75%) (Figura 6). Sin

embargo las distribuciones posteriores de la diferencia de proporciones, indicaron que la proporción de hembras con una CC buena fue mayor a la de los machos en un 48%, mientras que la proporción de machos con una CC mala fue mayor a la de las hembras en un 50% (Tabla III).

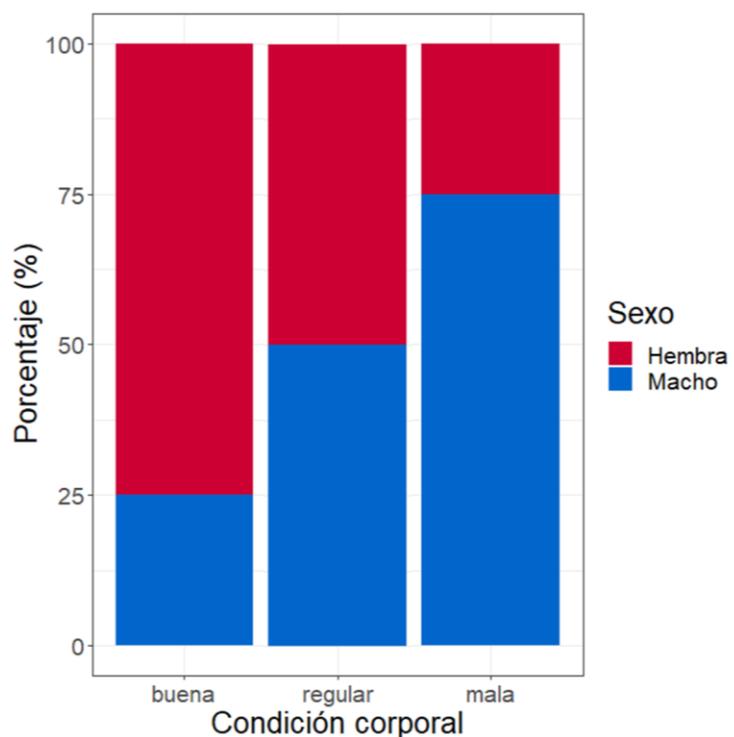


Figura 6. Proporción de la CC mediante evaluación visual de hembras y machos.

Tabla II. Resumen de las distribuciones posteriores de las proporciones de la CC mediante evaluación visual de hembras y machos.

Condición corporal	Sexo	Media	SD	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Dif.
Buena	Hembra	0.74	0.07	0.57	0.69	0.74	0.79	0.87	H-M = 0.48
	Macho	0.25	0.07	0.12	0.20	0.25	0.30	0.42	
Regular	Hembra	0.50	0.13	0.24	0.40	0.50	0.59	0.75	H-M = 0.001
	Macho	0.50	0.12	0.25	0.40	0.49	0.59	0.74	
Mala	Hembra	0.24	0.18	0.009	0.096	0.20	0.36	0.69	M-H = 0.50
	Macho	0.74	0.19	0.28	0.62	0.79	0.90	0.99	

7.2 Evaluación de la condición corporal mediante fotogrametría aérea

7.2.1 Sesgo del altímetro del VANT

Para la evaluación del sesgo de las medidas obtenidas con fotogrametría, se obtuvieron 227 fotografías pertenecientes a 30 objetos de longitud conocida. Las longitudes de los objetos oscilaron entre 1.5 a 30 m, mientras que la altura a la cual fueron fotografiados fue de entre 15 a 40 m.

La relación de las longitudes estimadas contra las longitudes reales indicó que existe un sesgo relacionado a la longitud del objeto y la altura a la cual se toma la fotografía. Conforme la longitud y la altura aumentan, el sesgo a la sobreestimación también crece (Figura 7). El valor del parámetro asociado a la altura del VANT, indica que esta no afecta sensiblemente la estimación de la longitud ($\lambda = -0.013$; 95%-CI: $-0.016 - -0.011$; Ecuación: 4). Por el contrario, la longitud real del objeto es la variable que más afecta la estimación ($\theta = 0.89$; 95%-CI: $-0.88 - 0.90$; Ecuación: 4), lo cual indica que la incertidumbre aumenta a medida que la longitud del objeto es mayor, tendiendo a la sobreestimación (Figura 7).

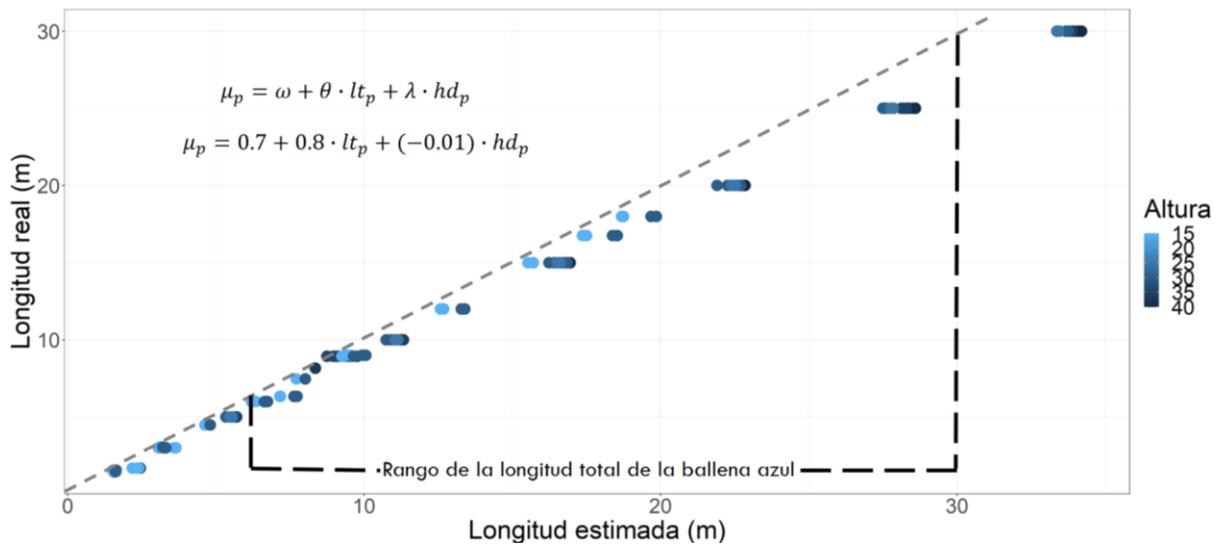


Figura 7. Sesgo del altímetro del VANT. Cada punto representa un objeto y su color varía en función a la altura a la que fue fotografiado, la línea gris punteada indica una relación 1:1.

7.2.2 Análisis de fotografías aéreas

En el periodo 2016-2021 se obtuvieron fotografías aéreas de 24 individuos de ballena azul, incluyendo dos recapturas (i.e. fotografías de un mismo individuo en dos ocasiones) (Tabla IV).

Tabla III. Número de individuos fotografiados con el VANT durante el periodo de estudio.

Año	Número de individuos
2016	2
2019	3
2020	15 (1 recaptura)
2021	6 (1 recaptura)
Total	24

De los 24 individuos fotografiados, 22 ya estaban registrados en el catálogo de ballena azul del CICIMAR-IPN (12 hembras, 8 machos y 2 de sexo desconocido). Por otra parte, la edad mínima estimada en 21 de los 22 individuos identificados fue mayor a ocho años (adultos), la excepción fue del individuo 840 cuya edad mínima estimada fue de 7 años (Tabla V).

Tabla IV. Sexo, clase reproductiva y edad mínima estimada de los individuos fotografiados con el VANT y fotoidentificados dentro del catálogo de ballena azul del CICIMAR-IPN.

ID	Sexo	Clase reproductiva	Año del primer avistamiento	Edad mínima estimada
49	Hembra	Maduro	1994	26
59	Hembra	Maduro	1985	35
75	Hembra	Maduro	1994	26
116	Hembra	Maduro	1991	29
127	Hembra	Maduro	1996	23
250	Hembra	Maduro	1997	23
276	Hembra	Maduro	1999	22
398	Hembra	Maduro	2002	18
477	Hembra	Maduro	2005	15

666	Hembra	Maduro	2007	14
667	Hembra	Maduro	2008	12
674	Hembra	Maduro	2008	13
12	Macho	Maduro	1990	30
18	Macho	Maduro	1990	30
36	Macho	Maduro	1990	30
60	Macho	Maduro	1994	27
144	Macho	Maduro	1996	24
240	Macho	Maduro	1998	21
249	Macho	Maduro	1997	22
487	Macho	Maduro	2005	15
702	Desconocido	Maduro	2009	12
840	Desconocido	Inmaduro	2013	7

El análisis de las fotografías aéreas usando el software MorphoMetriX consistió en un total de 21 mediciones morfométricas de los 24 individuos. Las desviaciones estándar de las réplicas de cada estimación, tanto de los anchos (Figura 8) como de las áreas (Figura 9), fueron menores a 0.1 m y 0.2 m², respectivamente. Estos bajos valores indican que el error humano al definir los puntos de referencia en el cuerpo de la ballena dentro del programa, es mínimo.

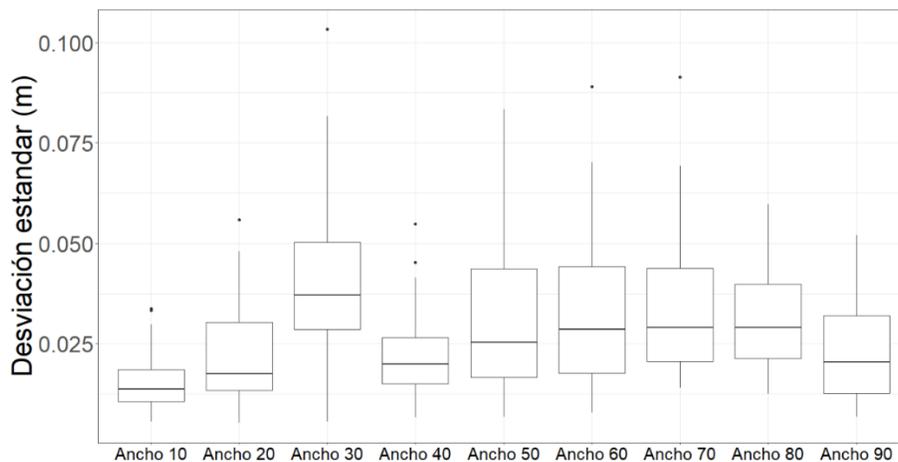


Figura 8. Desviación estándar (m) de los anchos de los individuos de ballena azul entre 10 réplicas de las estimaciones.

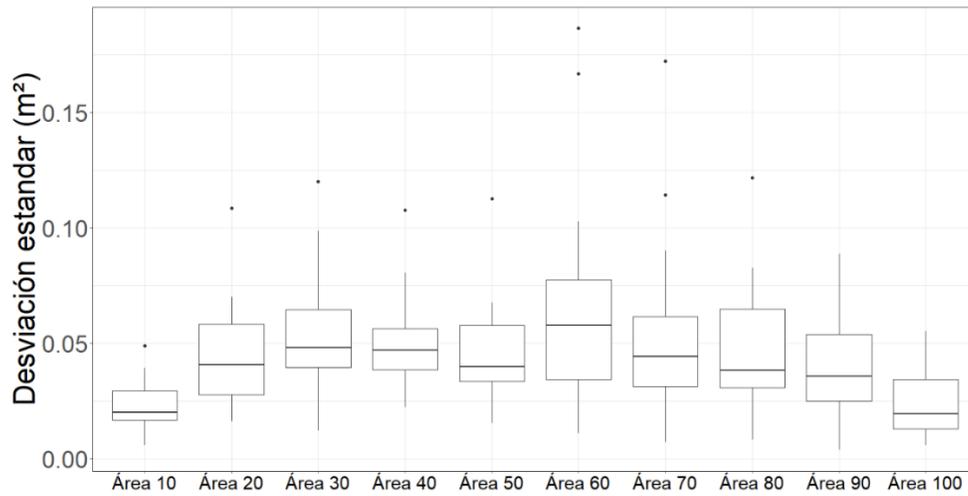


Figura 9. Desviación estándar (m²) de las áreas de los individuos de ballena azul entre 10 réplicas de las estimaciones.

7.2.3 Índice de la condición corporal mediante fotogrametría aérea

Para generar el índice de CC_{FA} , se tomaron en cuenta las áreas A30, A40, A50 y A60, ya que fueron las que presentaron una mayor desviación estándar entre los individuos (Figura 10). La sumatoria de estas áreas fue nombrada como el área media.

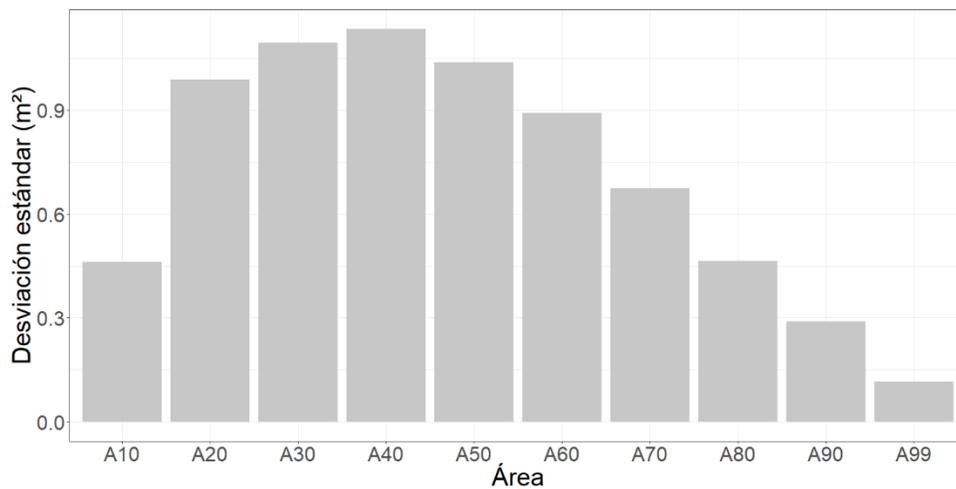


Figura 10. Desviación estándar (m) interindividual de las áreas de los individuos de ballena azul.

Los dos modelos probados en este estudio: área media en función la longitud total (modelo 1) y área media en función de la longitud del área media (modelo 2), presentaron un patrón similar en individuos mayores a 20 m. Sin embargo, para los tres individuos con longitudes menores, se observan diferencias ya que en el primer modelo dos de los tres individuos se encuentran por debajo de la curva, mientras que los tres individuos en el segundo modelo se encuentran por arriba de esta (Figura 11). Por otra parte, el valor de R^2 bayesiano (BR^2) en ambos modelos es de 0.9, lo que indica un buen ajuste en ambos modelos.

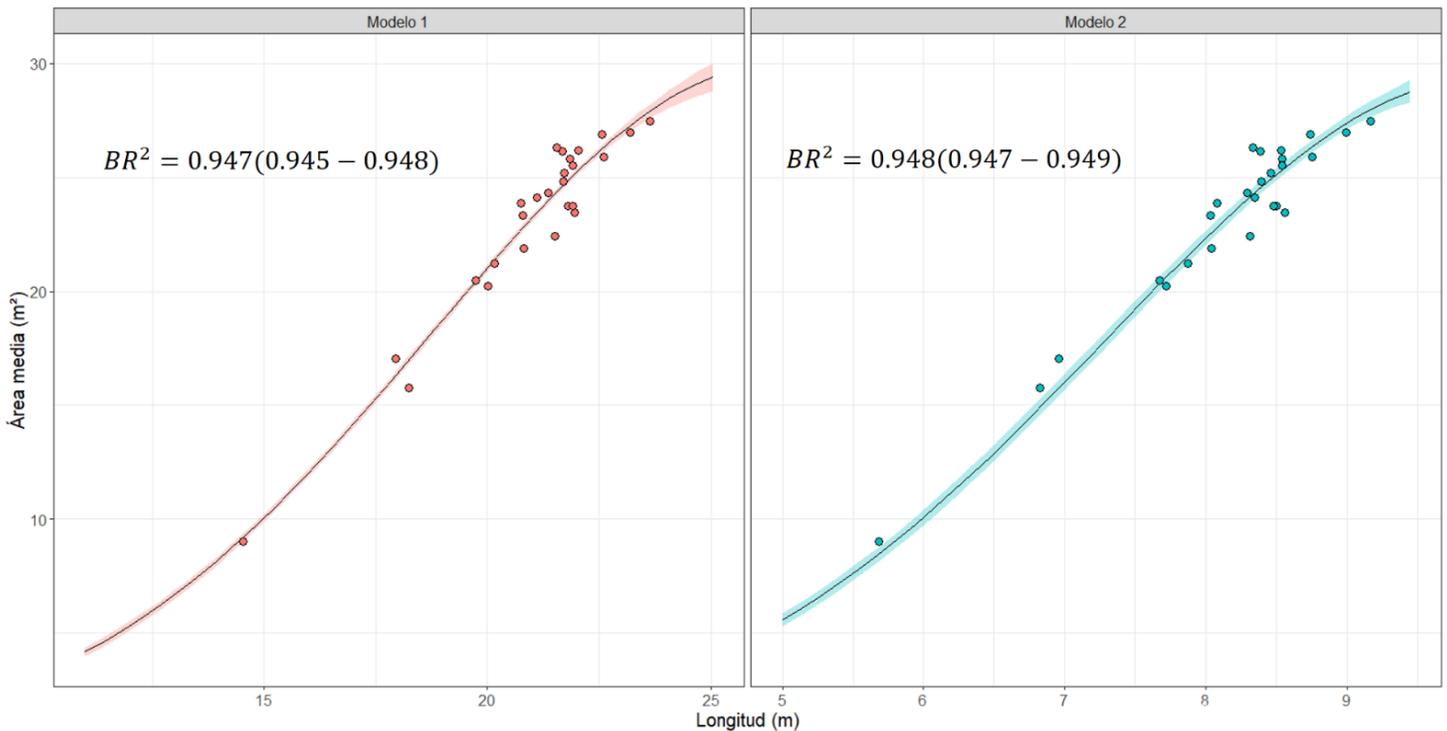


Figura 11. Modelo 1: área media en función de la longitud total. Modelo 2: área media en función de la longitud del área media. Los puntos representan a los individuos, la línea continua indica la media, mientras que el área sombreada representa las predicciones en los cuantiles 2.5% y 97.5%.

Dado que 21 de los 24 individuos fotografiados fueron identificados como individuos maduros, que no se tomaron fotografías aéreas de crías y que el valor medio de BR^2 de cada modelo fue similar, se optó por analizar los residuos del primer modelo. Catorce ballenas presentaron residuos con valor positivo (9 hembras, 3 machos y 2 de sexo desconocido). Por otra parte, 12 ballenas presentaron residuos con valor negativo (4 hembras, 6 machos y 2 de sexo desconocido) (Figura 12).

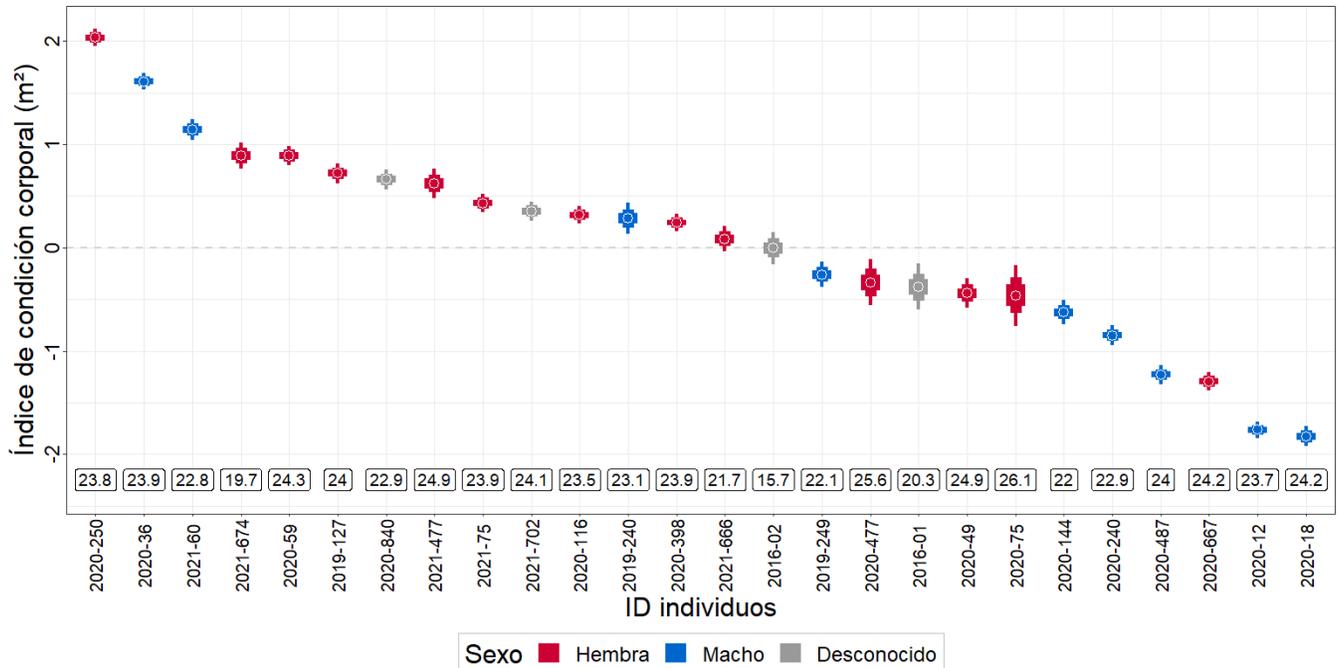


Figura 12.. Índice de la CC mediante el método de fotogrametría aérea. El eje x corresponde al ID de cada individuo, mientras que el eje y representa el índice de la CC. Las etiquetas indican la longitud total de cada individuo y los colores diferencian el sexo de los individuos.

Las hembras presentaron un índice de CC_{FA} promedio de $+0.28 \text{ m}^2$ (95% CI = $0.18-0.37$), mientras que los machos de -0.38 m^2 (95% CI = $-0.47- -0.30$). De acuerdo a las distribuciones posteriores de la diferencia entre ambos sexos, las hembras presentaron un mejor índice de CC_{FA} que los machos con un 100% de probabilidad (Figura 13) y una diferencia de $+0.67 \text{ m}^2$ (Tabla VI).

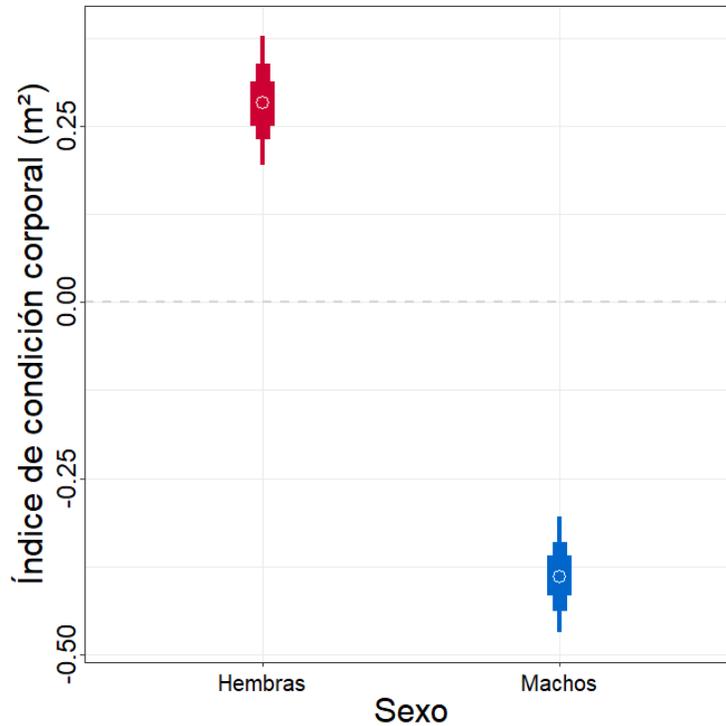


Figura 13. Diferencia del índice de CC_{FA} entre hembras (color rojo) y machos (color azul).

Tabla VI. Resumen de las distribuciones posteriores de las medias (m²) del índice de CC mediante fotogrametría aérea de hembras y machos.

Sexo	Media	SD	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Dif
Hembras	0.28	0.04	0.18	0.25	0.28	0.31	0.37	0.67
Machos	-0.38	0.04	-0.47	-0.41	-0.38	-0.36	-0.30	

Para visualizar la diferencia entre el individuo con el residuo positivo más alto (1.61 m², A = ID:250) con respecto al individuo con el residuo negativo más bajo (-1.82 m², B = ID:18), se muestran sus fotografías aéreas. La visibilidad de la columna vertebral del individuo ID:18 comienza a notarse desde la parte anterior en comparación con la del individuo ID:250 dónde la visibilidad de la columna vertebral se nota en la región posterior (Figura 14).

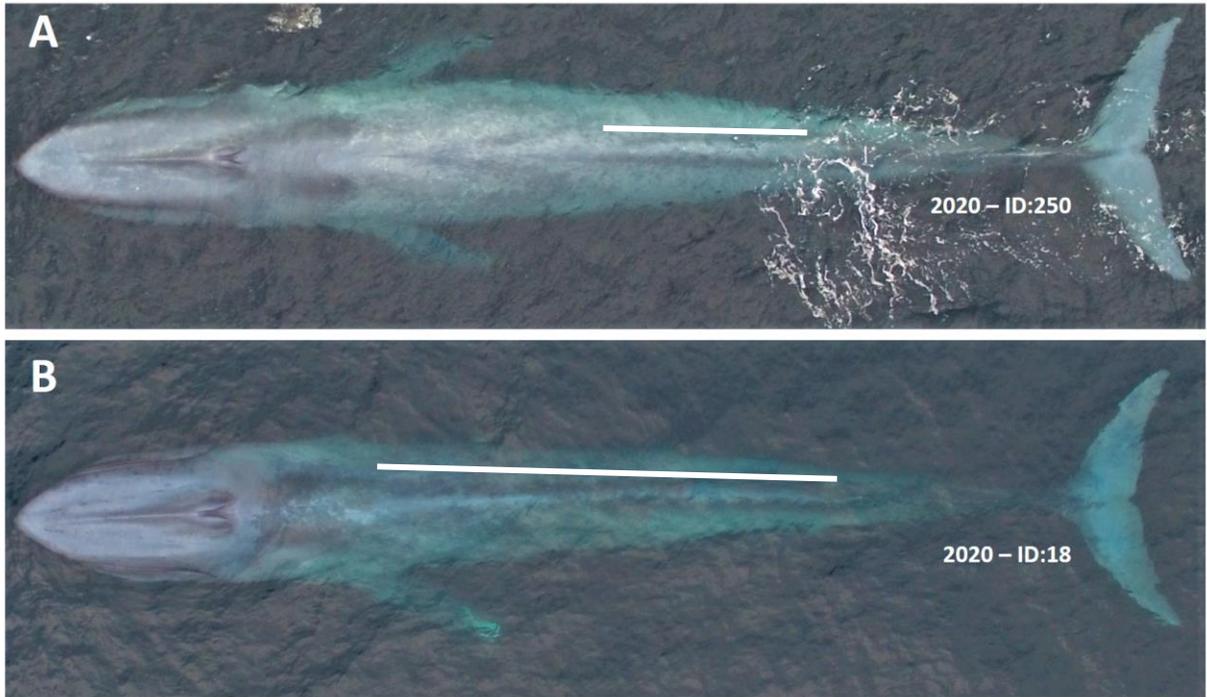


Figura 14. Comparación del individuo con el residuo positivo más alto ($A = 1.61 \text{ m}^2$) contra el individuo con el residuo positivo más bajo ($B = -1.82 \text{ m}^2$).

Para comparar los dos índices de CC se tomó en cuenta que individuos con residuos mayores a 0.5 m^2 fueron categorizados con una CC_{FA} buena, individuos con residuos entre 0.5 m^2 y -0.5 m^2 con una CC_{FA} normal e individuos con residuos menores a -0.5 m^2 con una CC_{FA} mala. Con lo anterior se observó que 7 de las 8 ballenas con residuo mayor a 0.5 m^2 fueron categorizadas con una CC_{CV} buena, mientras que 5 de las 6 ballenas con residuo menor a -0.5 m^2 se categorizaron con una CC_{CV} regular. Por otra parte, 12 individuos presentaron residuos entre 0.5 m^2 y -0.5 m^2 , de los cuales 5 fueron categorizados con una CC_{CV} buena y 5 con una CC_{CV} regular (Figura 15). Con base al CC_{CV} , ningún individuo fue categorizado con una CC_{CV} mala.

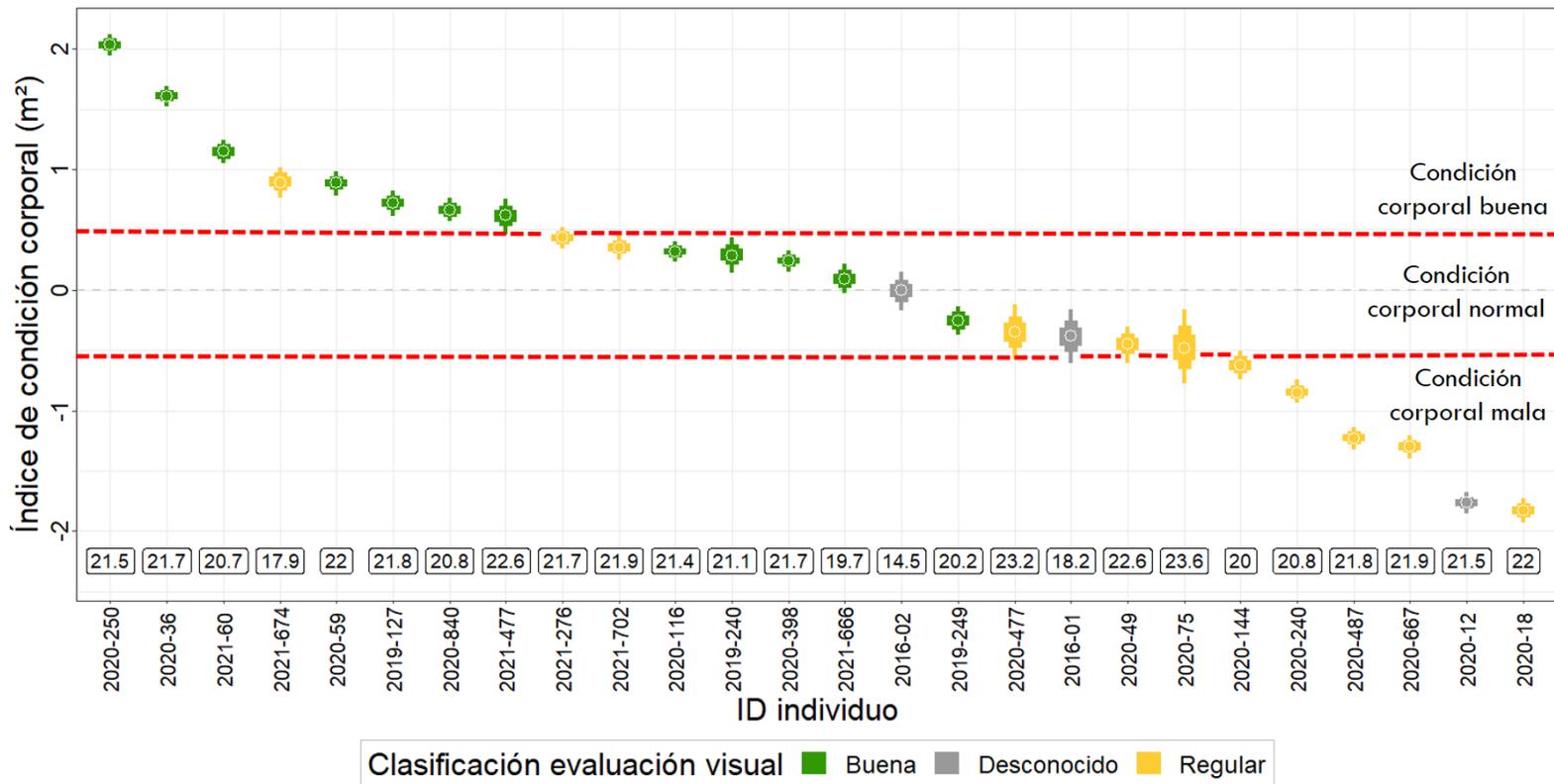


Figura 15. Comparación entre los índices de la CC. El eje x corresponde al ID de cada individuo, mientras que el eje y representa el índice de la CC. Las etiquetas indican la longitud total de cada individuo y los colores diferencian CC de cada individuo asignada con el método de evaluación visual.

Los individuos con CC_{CV} buena y regular tuvieron un residuo promedio mediante CC_{FA} de 0.69 m^2 (95% CI = $0.61 - 0.77$) y de -0.49 m^2 (95% CI = $-0.59 - 0.40$) respectivamente (Tabla VII). Las distribuciones posteriores de la diferencia entre ambas categorías de CC indican que la media de los residuos de individuos con una CC_{CV} buena es mayor en un 100% a la media de los residuos de los individuos categorizados con una CC_{CV} regular (Figura 16).

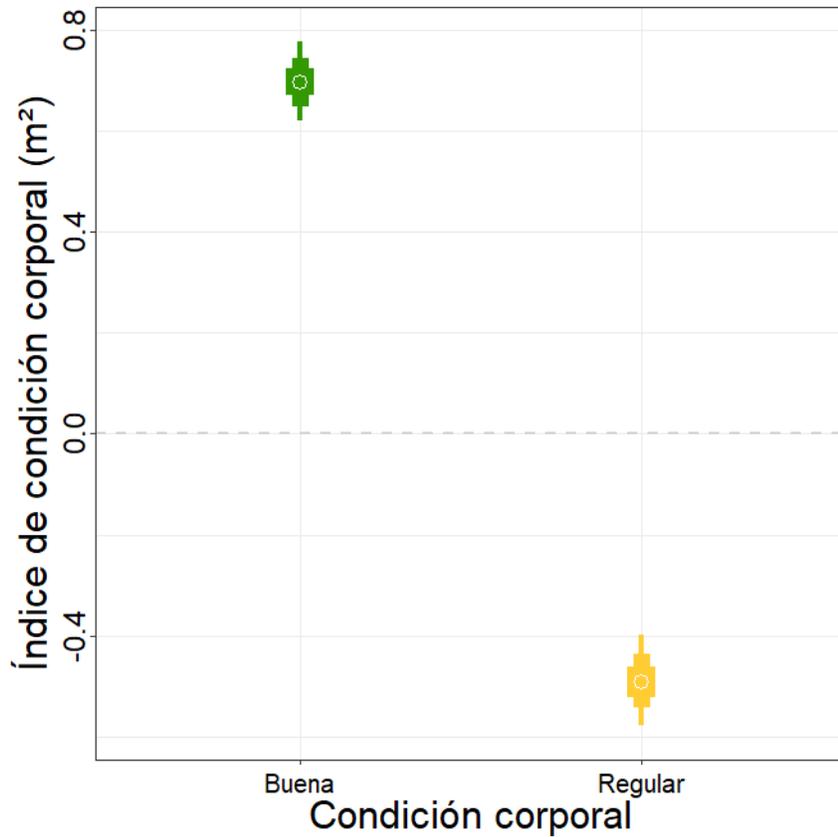


Figura 16. Diferencia de residuos obtenidos mediante CC_{FA} en individuos categorizados con una CC_{CV} buena y una CC_{CV} regular.

Tabla VII. Resumen de las distribuciones posteriores de las medias (m^2) del índice de CC mediante CC_{FA} por categoría de CC_{CV} .

CC_{CV}	Media	SD	2.5%	25%	50%	75%	97.5%	Dif
Buena	0.69	0.04	0.61	0.67	0.69	0.72	0.77	1.19
Regular	-0.49	0.04	-0.59	-0.52	-0.49	-0.46	-0.40	

8 DISCUSIÓN

Las evaluaciones visuales realizadas durante este trabajo comprenden un periodo de 15 años de monitoreo de la CC de la ballena azul en el Golfo de California. Lo anterior confirma que el uso de esta técnica permite tener un monitoreo del estado nutricional durante largas series de tiempo como se ha llevado a cabo para la ballena franca del Atlántico Norte, la cual cuenta con un monitoreo fotográfico de 28 años (1980- 2008) (Rolland *et al.*, 2016).

La tendencia de un decline en la CC desde la década de los 2000 de la ballena azul también se ha observado en otras especies como la ballena gris (Akmiajan *et al.*, 2004) y la ballena franca del Atlántico Norte (Rolland *et al.*, 2016; Pettis *et al.*, 2017) durante los periodos de 2007-2010 y 2000-2008 respectivamente. Se atribuye como principal causa apunta a una disminución en la abundancia de sus presas, ya que ésta afecta directamente el grosor de la capa grasa, disminuyendo las reservas de energía (Williams *et al.*, 2013). En la región de la Corriente de California, zona de alimentación para la ballena azul durante la temporada de verano (Fiedler *et al.*, 1998; Nickels *et al.*, 2018), se ha presentado una disminución en la producción y biomasa de fitoplancton durante el periodo 2003-2016, siendo particularmente mayor durante el periodo 2013-2016 (Gómez-Ocampo *et al.*, 2018). Así mismo, se ha reportado un decremento en la biomasa de su presa, el krill, de hasta un 95% durante 2015 y 2016 (Lavaniegos *et al.*, 2019). Lo anterior puede explicar el decremento en la CC de la especie reportado en este trabajo.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el aumento de la interacción con factores antropogénicos como el ruido marino o enmalles severos pudieran estar causando o contribuyendo al estrés nutricional de las ballenas (Rolland *et al.*, 2016; Pettis *et al.*, 2017). En la zona de la Corriente de California se han logrado identificar varias zonas de importancia para la alimentación de esta especie que presentan ruido alto como consecuencia del tráfico marino (Redfern *et al.*, 2017), lo cual pudiera afectar el tiempo de forrajeo como se ha observado en ballena jorobada (Blair *et al.*, 2016), una especie que utiliza una estrategia de alimentación similar a la ballena azul. Así mismo, el aumento de éste ruido posiblemente tenga efecto en

las concentraciones de hormonas de estrés, ya que se ha encontrado relación positiva entre el tráfico y ruido marino con el aumento en dichas concentraciones en otros misticetos (Lemos *et al.*, 2021), lo cual pudiera llevar a un estrés nutricional.

Las áreas medias de los individuos de ballena azul (entre 30-60% de su longitud total) fueron las que presentaron mayor variación. Lo anterior difiere de otras especies como la ballena jorobada en donde se muestra que la mayor variación en el ancho de individuos maduros fue entre 50-65% de la longitud total (Christiansen *et al.*, 2016), mientras que para la ballena franca la porción del ancho del cuerpo que más varió fue al 60% (Miller *et al.*, 2012). Lo anterior podría indicar que el depósito de grasa a lo largo del cuerpo de misticetos difiere entre especies. En un estudio en el que se estima el coeficiente volumétrico como una medida alternativa a la robustez del cuerpo, posicionan a la ballena azul con el coeficiente volumétrico más bajo (5.72), mientras que la ballena franca presenta el más alto (13.74) (Woodward *et al.*, 2006).

El valor de BR^2 para ambos modelos desarrollados en este estudio arrojó un valor muy cercano a uno, lo cual indica un buen ajuste. Sin embargo, el diferente patrón observado en la posición de los tres individuos de menor tamaño, pudiera deberse al crecimiento alométrico negativo que presentan las crías y los juveniles de esta especie, ya que la región del pedúnculo de estos individuos es más grande respecto a su longitud total, presentando diferencia en las proporciones con respecto a individuos adultos (Ortega-Ortiz, 2004).

La probabilidad de que las hembras presenten un mayor índice de CC que los machos fue de un 100% para la CC_{FA} y de un 48% para CC_{CV} . Esta diferencia entre sexos (siendo las hembras las que presentan una capa de grasa más ancha), ha sido reportada para la ballena de aleta (Lockyer, 1985; 1986) y la ballena de Sei (Lockyer *et al.*, 1985). Lo anterior se ha relacionado con el gasto energético que conlleva la reproducción ya que las hembras deben tener las suficientes reservas de energía para el desarrollo del feto (Christiansen *et al.*, 2014) y el proceso de lactancia (Lockyer *et al.*, 1985). Por lo cual, la diferencia encontrada en esta especie puede relacionarse con dichas reservas necesarias para lograr con éxito todo el

ciclo reproductivo. Así mismo, la diferencia en machos puede estar relacionada con la reproducción. Se ha reportado una disminución significativa en la CC de individuos maduros de ballena jorobada durante la temporada reproductiva, en donde la mayor parte de estos individuos fueron machos (Christiansen *et al.*, 2016). Esto pudiera atribuirse al gasto de energía invertido en los grupos de competencia, donde el comportamiento de los machos suele ser agresivo y físicamente desgastante (Lane *et al.*, 2010). Para ballena azul también existen registros de comportamientos de competencia entre al menos dos machos siguiendo una hembra (Schall *et al.*, 2019). De igual forma, dichos comportamientos pudieran afectar la CC de los machos de esta especie.

En este estudio se presenta por primera vez la comparación de índices desarrollados mediante dos metodologías de evaluación: la CC_{CV} y la CC_{FA} . Se encontró una diferencia del 100% entre los residuos promedios obtenidos mediante CC_{FA} para los individuos clasificados con una CC_{CV} buena y regular. También se observó que individuos con residuos mayores a 0.5 m^2 (CC_{FA} buena) y menores a -0.5 m^2 (CC_{FA} mala), presentan en su mayoría una CC_{CV} buena y regular, respectivamente. A pesar de que la CC_{CV} es un método cualitativo y que la CC_{FA} es un método cuantitativo, la diferencia de medias muestra una concordancia entre ambos métodos. Cabe recalcar que la CC_{CV} sigue siendo un método subjetivo lo cual se observa tanto en la nula presencia de individuos con una CC_{CV} mala, así como en los individuos con un residuo promedio obtenido mediante CC_{FA} entre 0.5 m^2 y -0.5 m^2 (CC_{FA} normal) en donde no se presenta una clara diferencia en su CC_{CV} como sucede cuando los residuos mediante CC_{FA} son mayores a 0.5 m^2 y -0.5 m^2 . Así mismo, la diferencia entre sexos obtenida mediante ambos métodos hace evidente la concordancia entre estas, pero la diferencia en porcentaje (100% para CC_{FA} y 48% para el CC_{CV}) sigue evidenciando la subjetividad de este último.

El método de evaluación visual tiene como ventaja la posibilidad de llevar a cabo un monitoreo de la CC a través de largas series de tiempo logrando la detección de cambios interanuales (Pettis *et al.*, 2004; Rolland *et al.*, 2016) e intraestacionales (Akmiajan *et al.*, 2004). Así mismo, este método permite una

mayor tasa de recaptura de los individuos y considerando la fidelidad de algunos individuos al área de estudio, es factible llevar a cabo un monitoreo de la CC a nivel individual a través de los años en esta región. Además, los resultados de dichas evaluaciones pueden complementarse con otros criterios como la presencia de lesiones cutáneas para lograr una evaluación más robusta del estado de salud de las poblaciones (Pettis *et al.*, 2004; Casillas-López, 2016; Pettis *et al.*, 2017; Arcos-Díaz, 2018).

Por otra parte, diferentes índices de CC desarrollados a partir del método de CC_{FA}, han funcionado para monitorear cambios intraestacionales en diferentes especies de cetáceos (Christiansen *et al.*, 2016; Fearnbach *et al.*, 2019). A pesar de que el uso de VANT para este tipo de aplicaciones es reciente, ya se tienen estudios comparativos de la CC de la ballena gris, en los que se ha detectado (durante al menos tres años) una disminución en su CC (Lemos *et al.*, 2020; Christiansen *et al.*, 2021). Así mismo, mediante esta técnica se ha logrado estimar la masa corporal, un parámetro que no se había podido estimar para individuos de vida libre (Christiansen *et al.*, 2019). A pesar de que existe una subestimación en las mediciones, la principal ventaja del método de fotogrametría aérea es que, al ser un método cuantitativo, esta subestimación puede ser modelada y tomada en cuenta como se realizó en el presente trabajo.

Específicamente para el caso de ballena azul, se observaron comportamientos relacionados con la alimentación como los giros en superficie (Figura 17A) y/o alimentación cerca de superficie (Figura 17B) lo cual complica la toma correcta de fotografías aéreas ya que es indispensable tener el cuerpo recto para obtener la longitud total, mientras que la expansión de los pliegues gulares distorsiona las medidas del ancho del cuerpo.

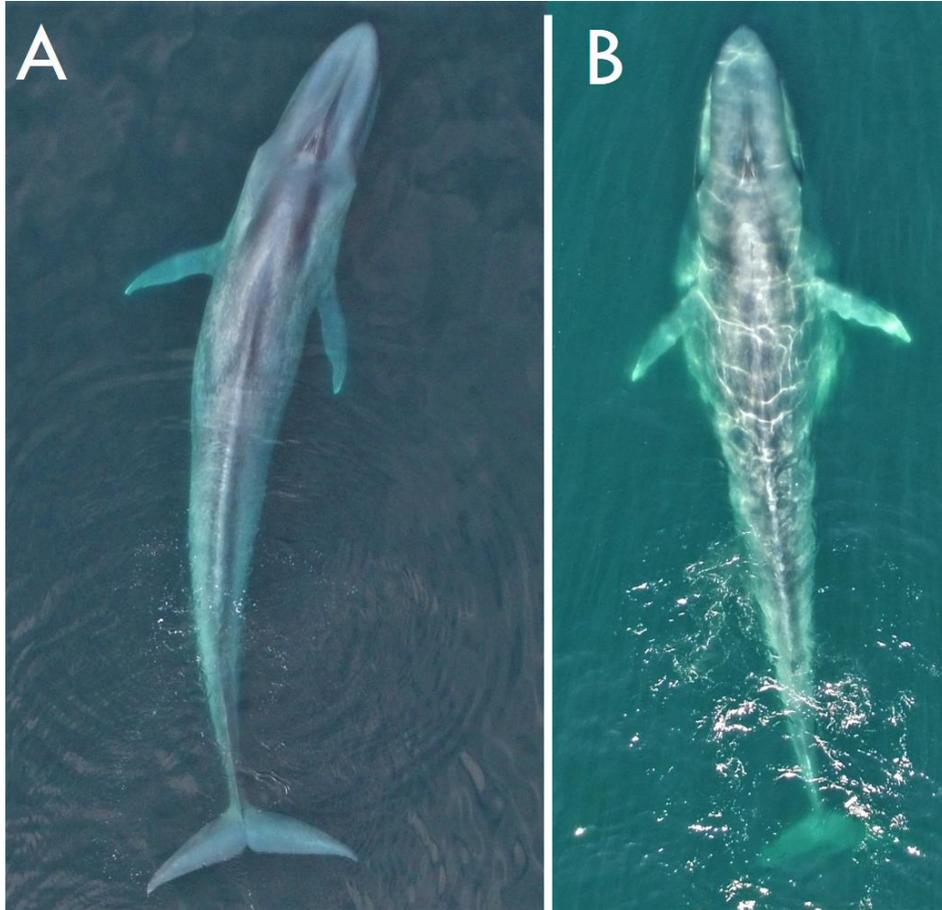


Figura 17. Comportamiento asociado a la actividad de alimentación de la ballena azul.

9 CONCLUSIONES

- El método de evaluación visual permitió evaluar la CC durante una serie de tiempo de 15 años en la que se evidencia un decremento paulatino en la CC de los individuos de ballena azul que migran al Golfo de California.
- El área media fue la que presentó una mayor variación entre los individuos de ballena azul.
- Los resultados de ambas metodologías indican que las hembras presentan una mejor CC que los machos, con una certeza del 100% para la CC_{FA} , y de un 48% para la CC_{CV} .
- La comparación de los índices de ambos métodos muestra que la media de los residuos de individuos con una CC_{CV} buena es mayor en un 100% a la media de los residuos de los individuos categorizados con una CC_{CV} regular.

10 RECOMENDACIONES

- Debido a que el número de individuos evaluados con CC_{CV} desconocida fue diferente entre los evaluadores se recomienda revisar los criterios para decidir que fotografías no pueden ser utilizadas para evaluar la CC_{CV}
- El sesgo del error humano al utilizar el software MorphoMetiX fue bajo, sin embargo, se recomienda que otra persona realice estos ejercicios dentro del software para saber si este sesgo crece entre diferentes evaluadores o se mantiene con valores mínimos.
- Es recomendable tener un número suficiente de baterías para utilizar el VANT ya que estas solo duran en vuelo 15 minutos y por lo regular solo se pueden obtener datos de una ballena por vuelo o en dado caso se recomienda tener una planta de luz para cargar las baterías en campo. También se recomienda el uso de filtros para que el reflejo del agua no impida obtener fotografías de buena calidad para medir a los individuos.
- Se debe de incrementar el número de muestra de individuos fotografiados con VANT para comenzar a analizar los posibles cambios entre años. Además de fotografiar crías y juveniles para tener un mejor análisis de la CC_{FA} para esta población.

11 BIBLIOGRAFÍA

Abrahms B., Welch H., Brodie S., Jacox M.G., Becker E.A., Bograd S.J., Irvine L.M., Palacios D.M., Mate B.R. & Hazen E.L. 2019. Dynamic ensemble models to predict distributions and anthropogenic risk exposure for highly mobile species. *Divers. Distrib.* 25: 1182–1193.

Adame K., Pardo M.A., Salvadeo C., Beier E. & Elorriaga-Verplancken F.R. 2017. Detectability and categorization of California sea lions using an unmanned aerial vehicle. *Mar. Mammal Sci.* 33: 913–925.

Álvarez-Borrogo S. & Lara-Lara J.R. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. En: Dauphin, J.P. y B.R. Simoneit. *The Gulf and peninsular province of the Gulf of California. AAPG Memories.* 47: 555-567.

Aniceto A.S., Biuw M., Lindstrøm U., Solbø S.A., Broms F. & Carroll J. 2018. Monitoring marine mammals using unmanned aerial vehicles: quantifying detection certainty. *Ecosphere.* 9: e02122.

Aprill A., Miller C.A., Moore M.J., Durban J.W., Fearnbach H. & Barrett-Lennard L.G. 2017. Extensive Core Microbiome in Drone-Captured Whale Blow Supports a Framework for Health Monitoring. *mSystems.* 2.

Arcos-Díaz J. 2018. Evaluación del estado de salud del rorcual común (*Balaenoptera physalus*) en el Golfo de California durante el periodo 2003-2016. Tesis de licenciatura Departamento Académico de Ciencias Marinas y Costeras, Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, 64 p.

Atkinson S., Gendron D., Branch T.A., Mashburn K.L., Melica V., Enriquez-Paredes L.E. & Brownell R.L. 2019. Pregnancy rate and biomarker validations from the blubber of eastern North Pacific blue whales. *Mar. Mammal Sci.* 36: 6–28.

Bailey H., Mate B.R., Palacios D.M., Irvine L., Bograd S.J. & Costa D.P. 2009. Behavioural estimation of blue whale movements in the northeast Pacific from state-space model analysis of satellite tracks. *Endang. Species Res.* 10: 93–106.

Bell C.M., Hindell M.A. & Burton H.R. 1997. Estimation of body mass in the southern elephant seal, *Mirounga leonina*, by photogrammetry and morphometrics. *Mar. Mammal Sci.* 13: 669–682.

Berman-Kowalewski M., Gulland F.M.D., Wilkin S., Calambokidis J., Mate B., Cordaro J., Rotstein D., Leger J.St., Collins P., Fahy K. & Dover S. 2010. Association Between Blue Whale (*Balaenoptera musculus*) Mortality and Ship Strikes Along the California Coast. *Aquat. Mamm.* 36: 59–66.

Blair H.B., Merchant N.D., Friedlaender A.S., Wiley D.N. & Parks S.E. 2016. Evidence for ship noise impacts on humpback whale foraging behaviour. *Biol. Lett.* 12: 20160005.

Bradford A.L., Weller D.W., Punt A.E., Ivashchenko Y.V., Burdin A.M., VanBlaricom G.R. & Brownell R.L. 2012. Leaner leviathans: body condition variation in a critically endangered whale population. *J. Mammal.* 93: 251–266.

Busquets-Vass G., Newsome S.D., Pardo M.A., Calambokidis J., Aguíñiga-García S., Páez-Rosas D., Gómez-Gutiérrez J., Enríquez-Paredes L.M. & Gendron D. 2020. Isotope-based inferences of the seasonal foraging and migratory strategies of blue whales in the eastern Pacific Ocean. *Mar. Environ. Res.* 163: 105201.

Calambokidis J., G.H. Steiger, J.C. Cabbage, K.C. Balcomb, C. Ewald, S. Kruse, R. Wells & R. Sears. 1990. Sightings and movements of blue whales off Central California 1986-1988 from photo-identification of individuals. *Rep. int. Whal. Commn (special issue). Whal. Commn. Spec. Iss.* 12: 343-348.

Casillas-López C. 2016. Condición corporal de la ballena azul (*Balaenoptera musculus*) con base en un índice visual a partir de fotografía. Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, 62 p.

Christiansen F., Víkingsson G.A., Rasmussen M.H. & Lusseau D. 2014. Female body condition Affects foetal growth in a capital breeding mysticete. *Funct. Ecol.* 28: 579–588.

Christiansen F., Dawson S., Durban J., Fearnbach H., Miller C., Bejder L., Uhart M., Sironi M., Corkeron P., Rayment W., Leunissen E., Haria E., Ward R., Warick H., Kerr I., Lynn M., Pettis H. & Moore M. 2020. Population comparison of right whale body condition reveals poor state of the North Atlantic right whale. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 640: 1–16.

Christiansen F., Dujon A.M., Sprogis K.R., Arnould J.P.Y. & Bejder L. 2016. Noninvasive unmanned aerial vehicle provides estimates of the energetic cost of reproduction in humpback whales. *Ecosphere.* 7.

Christiansen F., Sironi M., Moore M.J., Di Martino M., Ricciardi M., Warick H.A., Irschick D.J., Gutierrez R. & Uhart M.M. 2019. Estimating body mass of free-living whales using aerial photogrammetry and 3D volumetrics. *Methods Ecol. Evol.* 10: 2034–2044.

Christiansen F., Rodríguez-González F., Martínez-Aguilar S., Urbán J., Swartz S., Warick H., Vivier F. & Bejder L. 2021. Poor body condition associated with an unusual mortality event in gray whales. *Mar Ecol Prog Ser.* 658:237-252.

Domínguez-Sánchez C.A., Acevedo-Whitehouse K.A. & Gendron D. 2018. Effect of drone-based blow sampling on blue whale (*Balaenoptera musculus*) behavior. *Mar. Mammal Sci.* 34: 841–850.

Durban J.W., Fearnbach H., Barrett-Lennard L.G., Perryman W.L. & Leroi D.J. 2015. Photogrammetry of killer whales using a small hexacopter launched at sea. *J. Unmanned Veh. Syst.* 3: 131–135.

Durban J.W., Moore M.J., Chiang G., Hickmott L.S., Bocconcelli A., Howes G., Bahamonde P.A., Perryman W.L. & LeRoi D.J. 2016. Photogrammetry of blue whales with an unmanned hexacopter. *Mar. Mammal Sci.* 32: 1510–1515.

Edmonson A.J., Lean I.J., Weaver L.D., Farver T. & Webster G. 1989. A Body Condition Scoring Chart for Holstein Dairy Cows. *J. Dairy Sci.* 72: 68–78.

Enríquez-Paredes, L. M. 2005. Identidad genética de la población de ballena azul (*Balaenoptera musculus*) en el Pacífico Nororiental: agregaciones mexicanas. Tesis de Doctorado. UABC. Ensenada, Baja California, México. 198 p.

Fearnbach H., Durban J., Ellifrit D. & Balcomb K. 2011. Size and long-term growth trends of Endangered fish-eating killer whales. *Endanger. Species Res.* 13: 173–180.

Fearnbach H., Durban J., Ellifrit D. & Balcomb K. 2018. Using aerial photogrammetry to detect changes in body condition of endangered southern resident killer whales. *Endanger. Species Res.* 35: 175–180.

Fearnbach H., Durban J.W., Barrett-Lennard L.G., Ellifrit D.K. & Balcomb K.C. 2019. Evaluating the power of photogrammetry for monitoring killer whale body condition. *Mar. Mammal Sci.* 36: 359–364.

Fiedler P.C., Reilly S.B., Hewitt R.P., Demer D., Philbrick V.A., Smith S., Armstrong W., Croll D.A., Tershy B.R. & Mate B.R. 1998. Blue whale habitat and prey in the California Channel Islands. *Deep-Sea Res.* 45: 1781–1801.

Gelman A., Carlin J.B., Stern H.S., Dunson D.B., Vehtari A. & Rubin D.B. 2014. *Bayesian Data Analysis: Third Edition*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida, USA. 675.

Gendron D. 2002. Ecología poblacional de la ballena azul, *Balaenoptera musculus*, de la Península de Baja California. Tesis de doctorado. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, 112 p.

Gendron D. & A. Ugalde de la Cruz. 2012. A new classification method to simplify blue whale photo-identification technique. *J. Cet. Res. Manag.* 12: 79-84.

Gómez-Ocampo E., Gaxiola-Castro G., Durazo R. & Beier E. 2018. Effects of the 2013-2016 warm anomalies on the California Current phytoplankton. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 151: 64–76.

Guo X., Liang J., Xiao Z. & Cao B. 2010. Precision control of scale using in industrial close-range photogrammetry. Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation. doi:10.1117/12.885678

Haug T., Lindstrøm U. & Nilssen K.T. 2002. Variations in Minke Whale (*Balaenoptera acutorostrata*) Diet and Body Condition in Response to Ecosystem Changes in the Barents Sea. *Sarsia*. 87: 409–422.

Iverson S.J. 2009. Blubber. En: Perrin, W.F., B.G. Würsig y J.G.M. Thewissen. Encyclopedia of Marine Mammals: second edition. Academic Press. United States of America 433-437.

Lane J.E., Boutin S., Speakman J.R. & Humphries M.M. 2010. Energetic costs of male reproduction in a scramble competition mating system. *J. Anim. Ecol.* 79: 27-34.

Lavaniegos B.E., Jiménez-Herrera M. & Ambriz-Arreola I. 2019. Unusually low euphausiid biomass during the warm years of 2014–2016 in the transition zone of the California Current. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 169–170: 104638.

Lemos L.S., Burnett J.D., Chandler T.D., Sumich J.L. & Torres L.G. 2021. Intra- and inter-annual variation in gray whale body condition on a foraging ground. *Echospere*. 11:4: e03094. 10.1002/ecs2.3094.

Lemos L.S., Haxel J.H., Olsen A., Burnett J.D., Smith A., Chandler T.E., Nieukirk S.L., Larson S.E., Hunt K.E. & Torres L.G. 2021. Sounds of Stress: Assessment of Relationships between Ambient Noise, Vessel Traffic, and Gray whale Stress Hormone. *Res. Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-923450/v1>

Lockyer, C.H. & S.G. Brown. 1981. The migration of whales. En: Aidley, D.J. *Animal migration*. Society for Experimental Biology 13: 105-107 pp.

Lockyer C.H., McConnell L.C. & Waters T.D. 1985. Body condition in terms of anatomical and biochemical assessment of body fat in North Atlantic fin and sei whales. *Can. J. Zool.* 63: 2328-2338.

Lockyer C. 1986. Body Fat Condition in Northeast Atlantic Fin Whales, *Balaenoptera physalus*, and Its Relationship with Reproduction and Food Resource. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43: 142–147.

Lockyer C.H. 1987. Evaluation of the role of fat reserves in relation to the ecology of North Atlantic fin and sei whales. En: Huntley, A.C., D.P. Costa, G.A.J. Worthy y M.A. Castellini. *Cetacean Bioenergetic. Society for Marine Mammalogy* 1:183-203.

McDonald M.A., Hildebrand J.A. & Wiggins S.M. 2006. Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *J. Acoust. Soc. Am.* 120: 711–718.

McFadden K.W., Worthy G.A.J. & Lacher T.E. 2006. Photogrammetric Estimates of Size and Mass in Hawaiian Monk Seals (*Monachus schauinslandi*). *Aquat. Mamm.* 32: 31-40.

Meise K., Mueller B., Zein B. & Trillmich F. 2014. Applicability of Single-Camera Photogrammetry to Determine Body Dimensions of Pinnipeds: Galapagos Sea Lions as an Example. *PLoS ONE.* 9: e101197.

Miller C., Best P., Perryman W., Baumgartner M. & Moore M. 2012. Body shape changes associated with reproductive status, nutritive condition and growth in right whales *Eubalaena glacialis* and *E. australis*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 459: 135–156.

Monnahan C.C., Branch T.A. & Punt A.E. 2015. Do ship strikes threaten the recovery of endangered eastern North Pacific blue whales?. *Mar. Mammal Sci.* 31: 279–297.

Nickels C.F., Sala L.M. & Ohman M.D. 2018. The morphology of euphausiid mandibles used to assess selective predation by blue whales in the southern sector of the California Current System. *J. Crustac Biol.* 38: 563–573.

Nousek-McGregor A.E., Miller C.A., Moore M.J. & Nowacek D.P. 2014. Effects of Body Condition on Buoyancy in Endangered North Atlantic Right Whales. *Physiol. Biochem. Zool.* 87: 160–171.

Ortega-Ortiz C.D. 2004. Morfometría de la ballena azul (*Balaenoptera musculus*) de Baja California mediante fotografías aéreas. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN, La Paz, Baja California Sur, México, 67 p.

Ortega-Ortiz C., Gómez-Muñoz V. & Gendron D. 2018. Allometry and morphometry of blue whales photographed in the Gulf of California: insights into subspecies taxonomy in the Eastern North Pacific. *Endanger. Species Res.* 37: 183–194.

Parry D.A. 1949. The Structure of Whale Blubber, and a Discussion of its Thermal Properties. *J. Micros. Sci.* 90:13-25.

Peig J. & Green A.J. 2009. New perspectives for estimating body condition from mass/length data: the scaled mass index as an alternative method. *Oikos.* 118: 1883-1891.

Perryman W.L. & Lynn M.S. 2002. Evaluation of nutritive condition and reproductive status of migrating gray whales (*Eschrichtius robustus*) based on analysis of photogrammetric data. 10.

Pettis H., Rolland R., Hamilton P., Knowlton A., Burgess E. & Kraus S. 2017. Body condition changes arising from natural factors and fishing gear entanglements in North Atlantic right whales *Eubalaena glacialis*. *Endanger. Species Res.* 32: 237–249.

Pettis H.M., Rolland R.M., Hamilton P.K., Brault S., Knowlton A.R. & Kraus S.D. 2004. Visual health assessment of North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*) using photographs. *Can. J. Zool.* 82: 8–19.

Pirotta V., Smith A., Ostrowski M., Russell D., Jonsen I.D., Grech A. & Harcourt R. 2017. An Economical Custom-Built Drone for Assessing Whale Health. *Front. Mar. Sci.* 4: 425.

Plummer M. 2003. A program for analysis of Bayesian graphical models using Gibbs sampling. In Proceedings of the 3rd International Workshop on Distributed Statistical Computing. 20–22.

R Development Core Team. 2019. R: a language and environment for statistical computing. R Found Stat Comput Vienna, Austria. doi: 10.1007/978-3-540-74686-7. Redfern J., Hatch L., Caldow C., DeAngelis M., Gedamke J., Hastings S., Henderson L., McKenna M., Moore T. & Porter M. 2017. Assessing the risk of chronic shipping noise to baleen whales off Southern California, USA. *Endanger. Species Res.* 32: 153–167.

Rolland R., Schick R., Pettis H., Knowlton A., Hamilton P., Clark J. & Kraus S. 2016. Health of North Atlantic right whales *Eubalaena glacialis* over three decades: from individual health to demographic and population health trends. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 542: 265–282.

Schall E., Di Iorio L., Berchok C., Filún D., Bedriñana-Romano L., Buchan S.J., Van Opzeeland I., Sears R. & Hucke-Gaete R. 2019. Visual and passive acoustic observations of blue whale trios from two distinct populations. *Mar. Mammal Sci.* DOI: 10.1111/mms.12643.

Schulte-Hostedde A.I., Millar J.S. & Hickling G.J. 2001. Evaluating body condition in small mammals. *Can. J. Zool.* 79: 1021–1029

Sears R. & J. Calambokidis. 2002. Update COSEWIC status report on the blue whales *Balaenoptera musculus* in Canada. En: COSEWIC assessment and update status report on the blue whales *Balaenoptera musculus* in Canada. Committee on the status of endangered wildlife in Canada. Ottawa. 1-32.

Torres W. & Bierlich K. 2020. MorphoMetriX: a photogrammetric measurement GUI for morphometric analysis of megafauna. *J. Open Source Softw.* 5: 1825.

Torres L.G., Nieukirk S.L., Lemos L. & Chandler T.E. 2018. Drone Up! Quantifying Whale Behavior From a New Perspective Improves Observational Capacity. *Front. Mar. Sci.* 5: 319.

Valenzuela-Molina M., Atkinson S., Mashburn K., Gendron D. & Brownell R.L. 2018. Fecal steroid hormones reveal reproductive state in female blue whales sampled in the Gulf of California, Mexico. *Gen. Comp. Endocrinol.* 261: 127–135.

Vikingsson G.A. 1995. Body condition of fin whales during summer off Iceland. En: Blix, A.S., L. Walløe, y Ø. Ulltang. *Whales, seals, fish and man.* Elsevier Sci. 1: 361– 369.

Williams R., Vikingsson G.A., Gislason A., Lockyer C., New L., Thomas L. & Hammond P.S. 2013. Evidence for density-dependent changes in body condition and pregnancy rate of North Atlantic fin whales over four decades of varying environmental conditions. *ICES J. Mar. Sci.* 70: 1273–1280.

Woodward B.L., Winn J.P. & Fish F.E. 2006. Morphological specializations of baleen whales associated with hydrodynamic performance and ecological niche. *J. Morphol.* 267: 1284-1294.

Yochem P.K. & S. Leatherwood. 1985. Blue whale, *Balaenoptera musculus* (Linnaeus, 1758). En: Ridgeway S.H. y R. Harrison. *Handbook of marine mammals.* Vol. 3. The sirenians and baleen whales. Academic Press, London.

10. ANEXOS

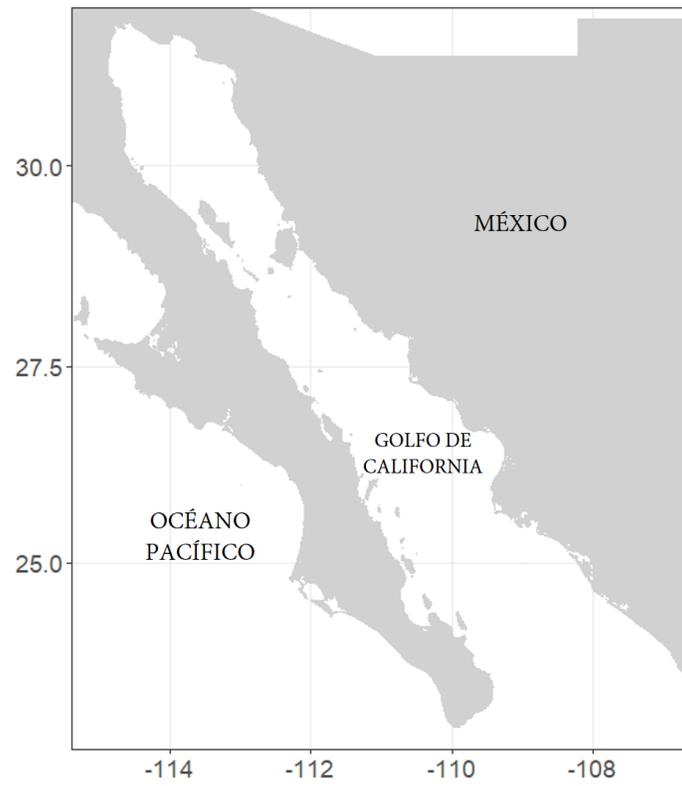


Figura 18. Golfo de California.



Figura 19. Fotografías de vertebras según el grado de exposición: a) valor de 1, b) valor de 2 y c) valor de 3.

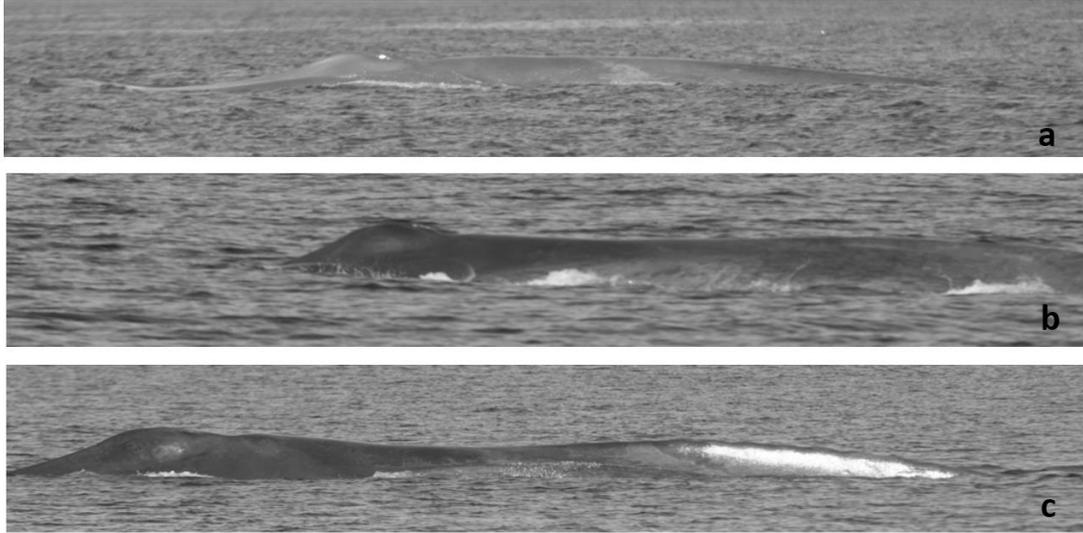


Figura 20. Fotografías de la depresión poscraneal según el grado de exposición: a) valor de 1, b) valor de 2 y c) valor de 3.



Figura 21. Fotografías de la escápula y los flancos laterales según el grado de exposición: a) valor de 1, b) valor de 2.