

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ECONÓMICA, ESTADÍSTICA Y CIENCIAS SOCIALES



"IDENTIFICACIÓN DE INTENTOS DE CAPTURA DE PRESA USANDO DATOS DE ACELEROMETRÍA EN LOS LOBOS MARINOS FINOS SUDAMERICANOS"

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ESTADÍSTICO
POR LA MODALIDAD DE TESIS

ELABORADO POR

VILMA SUSANA ROMERO ROMERO

Lima - Perú
2014

Digitalizado por:

Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse

*A mis padres, Vilma y Alfredo, quienes son mi
fuente de inspiración y quienes a lo largo de mi
vida me han brindado su amor, apoyo
incondicional y confianza.*

*A ustedes por siempre mi corazón,
los quiero mucho mamá y papá.*

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a las instituciones IMARPE (Instituto del Mar del Perú) e IRD (Institut de Recherche pour le Développement) por el apoyo brindado en la realización de esta tesis. Gracias a IMARPE por permitirme utilizar sus instalaciones y al IRD por financiar mi tesis.

Un profundo y sincero agradecimiento a mi asesor Yann Tremblay por haberme dado la oportunidad de realizar mi tesis con él. Gracias por su orientación, apoyo en la programación, paciencia y buen humor durante el desarrollo de esta tesis. Gracias también por sus interesantes y entretenidas enseñanzas, principalmente sobre los lobos marinos y ecología marina, temas desconocidos para mí, pero muy importantes para la culminación satisfactoria de este proyecto.

Adicionalmente, quiero agradecer a todos los que participaron directa e indirectamente en la fase de recolección de datos de este proyecto: Al equipo de la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH) que trabaja en Punta San Juan, al equipo del Proyecto TOPINEME, a John Arnould por proporcionar los acelerómetros y a todos los voluntarios que fueron parte del trabajo de campo.

No puedo dejar de mencionar a mis amigos con los que conviví y compartí no solo varias horas de trabajo, sino también alegres y divertidos momentos como Erick, Rocío, Daniel, Omar, Giannina, Marie, Cori, Katisha, Andrea y Rémi. Gracias sinceramente por escucharme y brindarme su amistad. Gracias Rocío y Daniel por mostrarme los estudios que realizan, por su confianza y por presentarme a quien sería mi asesor. A Rocío por todos los papers que me dio y a Daniel por su ayuda en mis inicios con la teoría de los wavelets. Además, gracias a Erick por su ayuda con la programación en Matlab, por las divertidas e intensas discusiones sobre Estadística, y sobre todo por ser el mejor compañero y amigo que he tenido.

Un agradecimiento muy especial a quienes han estado siempre a mi lado dándome su amor, apoyo y comprensión, mi familia. Gracias mamá y papá por todo su amor, por estar siempre a mi lado tanto en mis momentos de alegría como de desesperación, por motivarme a ser la mejor y por querer siempre lo mejor para mi hermano y para mí. Saben que aunque hayan momentos en los que no estemos de acuerdo, al final siempre nos entendemos, pues los sentimientos pueden más que la razón. Gracias a mi hermano Luis, que aunque en la mayoría de las veces no pensamos igual, cuando se trata de cumplir nuestros sueños dejamos de lado nuestras diferencias y nos unimos para lograrlos. Asimismo, gracias a mi tía Normelia por siempre cuidarme, preocuparse por mí y por compartir mis alegrías.

Finalmente, gracias a la Universidad Nacional de Ingeniería y a sus profesores por sus enseñanzas hacia mi formación académica durante los años de pregrado. A las profesoras Magen Infante y Amélica Pinedo por sus últimos comentarios y sugerencias para la finalización de esta tesis. A mis amigas y amigos de la UNI con quienes he compartido agradables y gratificantes momentos, y a todas aquellas demás personas que de alguna u otra forma están presentes siempre en mi vida.

A todos ellos, muchas gracias.

Resumen

Los lobos marinos finos, *Arctocephalus Australis*, en el Perú, aprovechan de un ambiente con alta productividad originado en el Sistema de la Corriente de Humboldt. Entender el comportamiento de forrajeo de estos mamíferos marinos permite monitorear las condiciones ambientales, ya que los animales elaboran sus estrategias en base a su adaptación al medio. Sin embargo, dado que esto se desarrolla debajo del mar no se puede analizar directamente. Es así que, con ayuda de grabadores electrónicos colocados en la cabeza y espalda de los animales, se obtienen registros de medidas de aceleración en tres ejes y datos de buceos. Se identifican intentos de captura de presa en las señales de aceleración mediante un análisis espectral basado en la transformada wavelet continua. Posteriormente, se modela el éxito del buceo (al menos un intento de captura de presa) en base a los perfiles de buceo. El modelo logístico obtenido muestra que valores mayores, principalmente, del ratio de descenso y ascenso sugieren un aumento importante en la creencia del éxito del buceo. Adicionalmente, el promedio de energía estimada mediante el indicador de aceleración dinámica global del cuerpo (ODBA) difiere significativamente entre los buceos con posibles intentos de captura de presa y aquellos que no los presentan. Este estudio muestra que es posible identificar el probable éxito de forrajeo en base al perfil del buceo.

Palabras clave: Captura de presa, Aceleración, Wavelets, Regresión Logística, ODBA, Lobo Marino Fino.

Abstract

Fur seals, *Arctocephalus Australis*, in Peru, benefit from an environment with high productivity originated in the Humboldt Current System. Understanding the foraging behaviour of these marine mammals allow us to monitor environmental conditions because the animals develop their strategies based on their adaptation to the environment. However, since this takes place under the sea, it can not be analyzed directly. Thus, using data loggers placed on the head and back of the animal, acceleration measures in three axes and dives data can be obtained. Prey capture attempts can be identified in the acceleration signals by spectral analysis based on the continuous wavelet transform. Subsequently, the dive success (at least one prey capture attempt) is modelled based on dive profiles. The logistic model obtained shows that higher values, mainly, of the descent and ascent rate suggest a significant increase in the belief of dive success. Additionally, the estimated average energy by the overall dynamic body acceleration index (ODBA) differs significantly between the dives with possible prey capture attempts and those that do not have. This study shows that it is possible to identify the likely foraging success based on the dive profile.

Keywords: Prey capture, Acceleration, Wavelets, Logistic Regression, ODBA, Fur Seal.

Índice general

Carátula	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	V
Lista de Cuadros	VIII
Lista de Figuras	X
Introducción	1
1. Planteamiento del Problema	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Descripción del Problema	8
1.3. Formulación del Problema de Investigación	9
1.4. Objetivos e Hipótesis	10
1.4.1. Objetivos	10
1.4.2. Hipótesis	10
1.5. Limitaciones y Delimitaciones	11
1.6. Importancia y Justificación	11
2. Marco Teórico	13
2.1. Ecosistema Marino	13
2.1.1. Clasificación del Ecosistema Marino	14
2.1.2. Organización del Ecosistema Marino	15
2.2. Rol de la Energía	18
2.2.1. Obtención y Gasto Energético mediante el forrajeo	18
2.2.2. Cuantificación del Gasto Energético	22
2.3. Observación del Comportamiento Animal	24
2.4. Análisis Wavelets	25
2.4.1. Wavelets	25
2.4.2. Transformada Wavelet Continua	26
2.4.3. Amplitud Espectral	27
2.4.4. Reconstrucción de la Señal	27
2.5. Regresión Logística	28
2.5.1. Definición del Modelo	28
2.5.2. Estimación de Parámetros	29
2.5.3. Interpretación de los Coeficientes	31

2.5.4.	Bondad de Ajuste del Modelo	32
2.5.5.	Significancia del Modelo	33
2.5.6.	Estrategias de Modelización	34
2.5.7.	Criterios de Selección del Modelo	35
2.5.8.	Capacidad Predictiva del Modelo	36
2.5.9.	Análisis de Residuales	37
3.	Metodología	38
3.1.	Diseño de Investigación	38
3.1.1.	Tipo de Estudio	38
3.1.2.	Área de Estudio	38
3.1.3.	Sujetos de estudio	38
3.1.4.	Población y Muestra	42
3.2.	Operacionalización de las Variables	42
3.2.1.	Movimiento en el Buceo	42
3.2.2.	Perfil del Buceo	43
3.3.	Recolección y Tratamiento de los datos	45
3.3.1.	Recolección de datos	45
3.3.2.	Pre-Procesamiento de los Datos	48
3.3.3.	Procesamiento de los Datos	51
3.4.	Metodología de Análisis	54
3.4.1.	Identificación de intentos de captura de presa	55
3.4.2.	Cálculo de la Variable Dependiente	55
3.4.3.	Modelamiento de la predicción del éxito del buceo	57
4.	Resultados	58
4.1.	Perfil General de los Buceos	58
4.2.	Ocurrencia de Intentos de Captura de Presa	60
4.3.	Aceleración Dinámica Global del Cuerpo (ODBA)	65
4.4.	Modelos de Predicción de Buceos con Captura de Presa	66
4.4.1.	Modelo basado en el acelerómetro de la cabeza	67
4.4.2.	Modelo basado en el acelerómetro de la espalda	72
4.4.3.	Modelo seleccionado	76
4.5.	Predicción de los probables buceos con captura de presa	78
5.	Discusión	80
5.1.	Eventos de Intentos de captura de presa	80
5.2.	Estrategia de Forrajeo	81
6.	Conclusiones	82
	Bibliografía	85

Índice de cuadros

2.1. Tabla de Clasificación basada en el Modelo de Regresión Logística	36
3.1. Operacionalización del Movimiento en el Buceo	42
3.2. Operacionalización del Perfil del Buceo	44
4.1. Principales características de los buceos.	59
4.2. Intentos de captura de presa según el acelerómetro en la cabeza	60
4.3. Intentos de captura de presa según el acelerómetro en la espalda	60
4.4. Comparación de la clasificación de buceos según ambos acelerómetros	64
4.5. Variables incorporadas al modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la cabeza	67
4.6. Resumen de los parámetros obtenidos en el modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la cabeza	68
4.7. Indicadores estadísticos de la bondad de ajuste del modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la cabeza	68
4.8. Tabla de clasificación del modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la cabeza	69
4.9. Variables incorporadas al modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la cabeza	69
4.10. Resumen de los parámetros obtenidos en el modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la cabeza	70
4.11. Indicadores estadísticos de la bondad de ajuste del modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la cabeza	71
4.12. Tabla de clasificación del modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la cabeza	71
4.13. Variables incorporadas al modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la espalda	72
4.14. Resumen de los parámetros obtenidos en el modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la espalda	73
4.15. Indicadores estadísticos de la bondad de ajuste del modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la espalda	73
4.16. Tabla de clasificación del modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la espalda	74
4.17. Variables incorporadas al modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la espalda	74
4.18. Resumen de los parámetros obtenidos en el modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la espalda	75
4.19. Indicadores estadísticos de la bondad de ajuste del modelo con interacciones, según el acelerómetro en la espalda	76
4.20. Tabla de clasificación del modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la espalda	76

4.21. Predicción de los buceos con intentos de captura de presa restantes, según el modelo logit seleccionado para el acelerómetro en la cabeza	79
4.22. Predicción de los buceos con intentos de captura de presa restantes, según el modelo logit seleccionado para el acelerómetro en la espalda	79
4.23. Comparación de la predicción según ambos acelerómetros	79

Índice de figuras

2.1. Esquema general de los ambientes marinos. Fuente: Los ecosistemas marinos [Lara-Lara et al., 2008].	15
2.2. Ejemplo de una pirámide trófica marina. Fuente: El mar a fondo [Caixa, 2014] . . .	17
2.3. Curva de obtención de energía en función del tiempo. Fuente: Optimal Foraging Theory - Constraints and Cognitive Processes [Sinervo, 2006].	19
2.4. Maximización de la ganancia de energía con respecto al tiempo. Fuente: Optimal Foraging Theory - Constraints and Cognitive Processes [Sinervo, 2006].	20
2.5. Ejemplos de tipos de Wavelets. Fuente: Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing [Lee Fugal, 2009]	26
3.1. Ubicación de Punta San Juan	39
3.2. Distribución de Lobos Marinos Finos Sudamericanos (sombreado en gris). Fuente: Prey Abundance and Population Dynamics of South American Fur Seal (<i>Arctocephalus Australis</i>) in Peru [Cárdenas-Alayza, 2012].	40
3.3. <i>Arctocephalus Australis</i> . Fuente: La Vida entre Mareas [Rodríguez and Bastida, 2004] 41	41
3.4. Acelerómetro X8M-3	45
3.5. Grabador de buceos (Time Depth Recorder)	46
3.6. Peso y traslado de la loba marina.	47
3.7. Instrumentación	47
3.8. (a) Colocación del acelerómetro en la espalda de la Loba Marina. (b) Loba Marina equipada con un acelerómetro y TDR en su espalda.	48
3.9. Ejemplo del perfil de un buceo.	50
3.10. Valores inconsistentes de aceleración marcados en rojo.	51
3.11. Dato atípico de aceleración marcado en verde.	52
3.12. El área de tolerancia está delimitada por las líneas de color rojo y lo sombreado representa la región fuera de estos límites. Los puntos de color verde son los datos atípicos detectados que caen fuera del área de tolerancia.	53
3.13. Los datos atípicos marcados de color verde en la señal de aceleración, en los valores de la mediana de la vecindad y en los valores del indicador h, respectivamente. . . .	53
3.14. Diagrama del algoritmo general de limpieza de datos	54

3.15. (a) Perfil de un buceo. (b) Aceleración vectorial correspondiente al buceo calculada de los datos del acelerómetro colocado en la cabeza. (c) Comportamiento Espectral de la señal de aceleración para estudiar su amplitud y periodicidad. La línea punteaguda corresponde a un periodo de 0.3 segundos (3 Hz). Donde se puede notar que en ciclos de 0.3 segundos y aquellos que duran menos presentan valores altos de amplitud (indicados en el gráfico por los colores más claros como verde, amarillo y rojo). (d) Señal de aceleración luego de realizar un filtro de paso alto de 3 Hz. Aquí, ya se puede distinguir algunos posibles eventos de comida. (e) Identificación de 8 posibles intentos de captura de presa mediante el cálculo de la varianza local considerando una ventana móvil de 1.5 segundos. La línea roja representa el límite considerado para la detección que toma el valor de 0.039.	56
3.16. Esquema general del análisis a seguir en el trabajo de investigación	57
4.1. Distribución de los buceos por hora	59
4.2. Relación de la profundidad con los intentos de comida por buceo.	61
4.3. Perfil de un buceo, Señales de aceleración de la cabeza y espalda con sus respectivos comportamientos espectrales. La línea punteaguda representa un periodo de 0.3 segundos (3 Hz).	62
4.4. Distribución de buceos con intentos de captura de presa por hora, según el acelerómetro en la cabeza.	63
4.5. Distribución de buceos con intentos de captura de presa por hora, según el acelerómetro en la espalda.	64
4.6. Duración del buceo (azul) y ODBA Total del buceo (verde) en función de la Profundidad Máxima. Se muestra además las curvas ajustadas para ambas series.	65
4.7. Comparación de ODBA Total respecto a buceo exitosos (azul) y buceos no exitosos (rojo).	66
4.8. Comparación del comportamiento observado y estimado de buceos con intentos de captura de presa por hora, según el acelerómetro en la cabeza	78
4.9. Comparación del comportamiento observado y estimado de buceos con intentos de captura de presa por hora, según el acelerómetro en la espalda	78

Introducción

El ecosistema marino es el conjunto de seres bióticos y abióticos que se interrelacionan en el ambiente de las aguas marinas. Dentro de este sistema complejo cada ser vivo cumple su rol manteniendo el equilibrio y la sostenibilidad del mismo. Como en cualquier otro ecosistema, la vida de los organismos acuáticos depende del intercambio de materia y energía que se presenta entre ellos, de los materiales disueltos en el agua y de la temperatura de la misma.

La energía juega un rol muy importante en el desenvolvimiento de las actividades de las diferentes especies, principalmente en su desarrollo, reproducción y crianza. Una manera de obtener la energía necesaria es mediante la alimentación. Sin embargo, realizar el forrajeo involucra también un desgaste de energía. Motivo por el cual, los animales marinos deben tener la capacidad de balancear la energía que tienen entre el forrajeo en el mar y la energía que involucra su reproducción y supervivencia. Es decir, gastar lo menos posible de energía para alimentarse para poder tener lo máximo para su crecimiento, desarrollo y reproducción.

En este contexto, surge la necesidad de analizar el comportamiento de forrajeo de los depredadores marinos superiores, ya que juegan un papel de control en la dinámica trófica del ecosistema marino. Sin embargo, resulta dificultoso dado que no se puede observar tal comportamiento de manera directa. La rama científica de Biologging puede ayudar a solucionar estos problemas, ya que permite utilizar pequeños aparatos electrónicos en el animal y registrar información acerca de su movimiento, comportamiento, fisiología y ambiente [Rutz and Hays, 2009]. Entre los aparatos más utilizados se encuentran el GPS (Global Positioning System) para registrar desplazamientos, el TDR (Time Depth Recorder) para determinar profundidades de buceo, el ECG (Electrocardiogram) para el registro de ritmo cardiaco, el acelerómetro que registra la aceleración hasta en tres ejes, entre otros.

En los últimos años, el uso de acelerómetros se ha vuelto una herramienta muy útil en el análisis del comportamiento de los depredadores marinos superiores. Lo cual ha permitido a diferentes investigadores identificar patrones de comportamiento en una variedad de animales tanto terrestres como marinos, utilizando diversas técnicas de análisis de señales y estadísticas [Yoda et al., 2001, Watanabe et al., 2005, Shepard et al., 2008, Sakamoto et al., 2009, Soltis et al., 2012, Nathan et al., 2012]. Algunos estudios científicos se centran en estudiar solo el comportamiento de forrajeo identificando eventos de intento de captura de presa en los registros de las aceleraciones de los mamíferos marinos [Gallon et al., 2013, Suzuki et al., 2009, Viviant et al., 2009]. Adicionalmente, las medidas de aceleración tienen el potencial de estimar el desgaste de energía en animales marinos. Así, lo demuestran estudios recientes en diferentes especies de mamíferos y aves marinos [Wilson et al., 2006, Halsey et al., 2009], donde se obtienen altas correlaciones entre la Aceleración Dinámica Global del Cuerpo, ODBA por sus siglas en inglés “Overall Dynamic Body Acceleration”, con el ratio de consumo de oxígeno.

En este trabajo, se estudia el comportamiento de forrajeo del lobo marino fino *Arctocephalus Australis* que habita en el Perú. Su presencia se debe al adecuado ambiente que genera el flujo de las aguas frías y productivas en la costa oeste de América del Sur [Majluf, 1987]. Esto surge debido al fenómeno de afloramiento peruano característico del Sistema de la Corriente de Humboldt, el cual crea un ecosistema de alta productividad.

Los lobos marinos finos transcurren su vida tanto en la tierra como en el mar. En la tierra se aparean, cuidan de las crías, mudan y descansan, mientras que, en el mar pasan periodos para forrajear y/o migrar. Dentro de las actividades en el mar se encuentran los nados, buceos, descansos y aseos [Dassis et al., 2012]. Debido a que su forrajeo se desarrolla en ambientes alejados y dentro de las aguas marinas, su análisis se torna complicado. Por ello, es necesario emplear pequeños aparatos electrónicos para el registro de información relacionada a sus buceos, medio por el cual forrajean. Es así que, para este estudio, se cuenta con medidas de aceleración en tres dimensiones (Surge¹, Sway² y Heave³), datos de las profundidades de los buceos y diferentes características de los mismos

¹Eje Longitudinal (delante/espalda).

²Eje Lateral (lado a lado).

³Eje Vertical (arriba/abajo).

relacionadas a sus fases de descenso, fondo, ascenso y recuperación.

Por consiguiente, con el fin de analizar el **éxito de forrajeo**⁴ de los buceos de los lobos marinos finos sudamericanos, se debe identificar primero los eventos de intentos de captura de presa en las señales de aceleración. Luego, en base a esta información, se genera la variable dicotómica que determine si el buceo presenta eventos con intento de comida. Finalmente, esta variable se relaciona con las características propias de los buceos a través de técnicas estadísticas de modelamiento. El resultado final permitirá predecir el **éxito del buceo** conociendo solamente sus características. Con esto, se puede tener un mejor entendimiento del desenvolvimiento de forrajeo de los buceos de los lobos marinos finos sudamericanos en su ambiente natural.

La presente tesis cuenta con 6 capítulos. El capítulo I proporciona el planteamiento del problema. En el capítulo II, se describe el marco teórico así como las técnicas empleadas en este estudio. La metodología empleada en el análisis y procesamiento de los datos es detallada en el capítulo III. Los resultados obtenidos se encuentran en el capítulo IV y la discusión se muestra en el capítulo V. Por último, las conclusiones derivadas del estudio son mostradas en el capítulo VI.

⁴En la presente tesis, el éxito de forrajeo se refiere a que en el buceo realizado por la loba marina fina hubo al menos un intento de captura de presa. Lo mismo ocurre cuando se menciona éxito del buceo.

Capítulo 1

Planteamiento del Problema

El ambiente con alta productividad originado en el Sistema de la Corriente de Humboldt permite la presencia de lobos marinos finos en el Perú. Entender el comportamiento de forrajeo de estos mamíferos marinos permite monitorear las condiciones ambientales, ya que los animales elaboran sus estrategias en base a su adaptación al medio. Sin embargo, dado que esto se desarrolla debajo del mar no se puede analizar directamente. Es así que, con ayuda de grabadores electrónicos colocados en los animales se obtienen registros de medidas de aceleración en tres dimensiones y datos de buceos, que son analizados posteriormente para estudiar los posibles eventos de forrajeo ocurridos en los distintos buceos realizados por el animal.

1.1. Antecedentes

La capacidad de comprender el desenvolvimiento alimenticio de los depredadores marinos superiores en su ambiente natural, ha motivado a diversos autores estudiar su comportamiento de forrajeo mediante distintos enfoques aplicando datos de acelerometría. A continuación, se presenta una breve descripción de los estudios más relevantes:

- (1) *A new technique for monitoring the behaviour of free-ranging Adélie penguins* [Yoda et al., 2001]

Este estudio es uno de los primeros trabajos donde se emplea registros de aceleración para el análisis del comportamiento animal durante los viajes de alimentación de los pingüinos Ade-

laida (*Pygoscelis adeliae*). Entre los principales comportamientos estudiados se encontraban los buceos y los descansos en la superficie del mar. Además, se hizo una comparación entre los pingüinos que viven en una región con hielo de aquellos que viven en zonas carentes de hielo. Finalmente, en este estudio se pudo distinguir 7 patrones de comportamiento de los pingüinos durante sus viajes de forrajeo, de los cuales algunos pudieron identificarse por medio de técnicas matemáticas como el análisis de Fourier.

(2) *Prey capture attempts can be detected in Steller sea lions and other marine predators using accelerometers* [Viviant et al., 2009]

Investigación realizada en el 2009 por Viviant et al sobre la detección de eventos de intento de captura de presa en leones marinos de Steller (*Eumetopias jubatus*) basados en registros de aceleración provenientes de pequeños aparatos colocados en la cabeza y mandíbula del animal. El estudio fue realizado en un ambiente controlado por los investigadores. Se pudo identificar eventos relacionados a comida como señales de alta frecuencia y concluir que éstos son más notorios en el eje horizontal, y que sería suficiente sólo contar con registros de aceleración del movimiento de la mandíbula para identificar los eventos posibles de alimentación.

(3) *Can ethograms be automatically generated using body acceleration data from free-ranging birds?* [Sakamoto et al., 2009]

Estudio que se llevó a cabo en el 2009, en el cual Sakamoto et al propusieron una metodología para obtener un Etograma (catálogo de comportamientos) de un animal basado en el análisis de la señal de aceleraciones. Esta metodología consiste en los siguientes pasos:

- a) Aplicación de análisis wavelets para la descomposición de la señal de aceleración a diferentes amplitudes y en distintos momentos del tiempo. Para esto se emplea una transformación wavelet continua.
- b) Con la señal descompuesta, se procede a clasificar el espectro de la señal en 20 categorías por medio de la técnica estadística multivariante de Clustering No Supervisado, utilizando el método de k-means.

Para evaluar la metodología propuesta, los autores la emplearon sobre los datos registrados de aceleración longitudinal provenientes del ave marina Cormorán Moñudo (*Phalacrocorax aristotelis*). Se pudo identificar comportamientos relacionados a cuando el ave se encuentra en tierra, en vuelo, en la superficie del mar, realizando buceos de alimentación, entre otros. Además, dichos comportamientos concuerdan con los que se pudieron obtener al evaluar de manera independiente los perfiles de los buceos. Finalmente, el estudio trajo consigo la creación de un nuevo software, *Ethographer*, empleado actualmente por muchos investigadores para el análisis espectral de sus señales.

(4) *Using a mandible accelerometer to study fine-scale foraging behavior of free-ranging Antarctic fur seals* [Iwata et al., 2012]

Este trabajo tuvo como objetivo principal estudiar los patrones de forrajeo a escala fina del lobo marino antártico (*Arctocephalus gazella*) mediante el análisis de las señales de aceleración provenientes de un pequeño aparato llamado acelerómetro, el cual fue colocado en la mandíbula inferior del animal. La idea de colocar el instrumento en dicha posición fue de poder inferir el tiempo de los eventos de apertura de la boca, el cual se puede relacionar con un evento de intento de captura de presa. Además, el segundo objetivo del estudio fue de poder identificar diversos índices de esfuerzo de forrajeo referidos al evento de apertura de la boca del animal. En base a ello, el estudio se condujo de la siguiente manera:

- a) Análisis de las propiedades periódicas de las señales de aceleración longitudinal y vertical por medio de una transformación wavelet continua usando la función madre Morlet para construir los espectros de las señales. Esto se realizó en el software *Ethographer*.
- b) Aplicación de un filtro de paso alto para determinar eventos de alta frecuencia relacionados a los eventos de apertura de boca.
- c) Aplicación de un filtro de paso bajo para determinar el ángulo con respecto al eje longitudinal (Pitch Angle) durante sus buceos.
- d) Evaluación del efecto de las fases del buceo en el número de aperturas de boca mediante Modelos Mixtos Lineales Generalizados usando una distribución Poisson para el error y al animal como factor aleatorio.

Finalmente, los autores concluyen lo siguiente:

- Los picos de alta frecuencia en los registros de aceleración de la mandíbula tanto en los ejes vertical y longitudinal muestran los eventos de apertura de boca del animal. Esto se puede relacionar con la captura o intento de captura de presa. Sin embargo, no se pudo encontrar un patrón que diferencie el éxito o fracaso de la captura de presa.
- La mayoría de eventos de apertura de boca ocurrieron en el fondo del buceo.
- El número de eventos de apertura de boca presentan una asociación lineal positiva con los parámetros relacionados al movimiento del cuerpo y perfil de los buceos como la duración en el fondo del buceo, el número de zigzags en el buceo, el número de giros verticales.
- Considerar los giros verticales de lobos marinos durante los buceos en el análisis del comportamiento de forrajeo a escala fina, pues resultan ser muy buenos indicadores.

(5) *Identifying foraging events in deep diving southern elephant seals, *Mirounga leonina*, using acceleration data loggers* [Gallon et al., 2013]

Una de las más recientes investigaciones, donde Gallon et al implementan por primera vez con acelerómetros en la cabeza a elefantes marinos, *Mirounga Leonina*, para estudiar el comportamiento de su forrajeo a escala fina. Entre sus objetivos se encontraban la detección de eventos relacionados a intentos de captura de presa en las señales de aceleración así como la realización de una comparación entre los buceos de forrajeo identificados por simples perfiles de profundidad y los buceos con encuentros de presa determinados por los perfiles de aceleración. Para esto, aplicaron técnicas de análisis de señales y posteriormente un Modelo Binomial Lineal con Efectos Mixtos para identificar las características significativas de los buceos de forrajeo identificados solo por su perfil y los buceos con posibles encuentros de presa identificados con las señales de aceleración. La conclusión más resaltante del estudio es que los animales cuando encuentran presa bucean a grandes profundidades aumentando su velocidad de descenso y la duración dentro del mar.

1.2. Descripción del Problema

El Instituto de Investigación para el Desarrollo, IRD por sus siglas en francés "*Institut de Recherche pour le Développement*", es un organismo de investigación francés que junto con la colaboración de los científicos asociados de los países del Sur le hacen frente a los grandes desafíos de desarrollo sobre el medio ambiente, los recursos vivos, las ciencias sociales y la salud [IRD, 2014]. Entre los países asociados se encuentra el Perú, en donde el IRD cuenta con un estatuto de Agencia de Cooperación Internacional. En este marco, el IRD ha creado estructuras mixtas desde hace algunos años en el Perú. En el 2010, se creó dos Laboratorios Mixtos Internacionales (LMI), el LMI-DISCOH (Dinámica del Sistema de la Corriente de Humboldt) y el LMI-LAVI (Laboratorio Andino-Amazónico de Química de la Vida). En el 2011, el LMI-EDIA (Evolución y Domesticación de la ictofauna Amazónica) fue creado.

Por su parte, el Laboratorio Mixto Internacional DISCOH fue creado por el IRD y el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) en asociación con el Instituto Geofísico del Perú (IGP), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú (SENAMHI), la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH), la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción de Chile y en relación con otras instituciones y Universidades peruanas, chilenas y ecuatorianas. Su objetivo principal es el estudio de las dinámicas océano-atmósfera, bio-geoquímicas y ecológicas en el sistema de Corriente de Humboldt (SCH) [LMI-DISCOH, 2014].

Adicionalmente, existe un proyecto asociado al LMI-DISCOH llamado TOPINEME (TOP Predators as INDicators of Exploited Marine Ecosystem dynamics), el cual tiene como objetivo principal evaluar y cuantificar la medida en que la abundancia de los depredadores superiores (aves marinas, pinípedos y pescadores), dieta y comportamiento espacial reflejan las propiedades de los componentes principales de un ecosistema, desde el ambiente físico hasta las comunidades de plancton y las poblaciones de peces forrajeros [LMI-DISCOH, 2014].

En este contexto, surge la necesidad de estudiar el comportamiento de forrajeo de los lobos marinos, los cuales bucean por diferentes motivos como desplazamiento, exploración para comida y

captura de las presas. Entender el motivo del buceo es importante porque permite definir índices como la frecuencia de encuentro con presas, el esfuerzo de la búsqueda de comida, entre otros. Se sabe que cuando el lobo marino captura o intenta capturar una presa realiza distintos movimientos durante el buceo. La forma general del buceo proporciona información sobre esto. Sin embargo, es limitada debido a que se muestra el buceo de manera plana y no como realmente sucede el fenómeno, que es en tres dimensiones. En este sentido, los acelerómetros permiten grabar el movimiento en tres dimensiones. Es así que, en este trabajo se desea distinguir a los buceos con intentos de captura de presa de los buceos sin intentos de captura de presa, mediante el análisis de las señales de aceleración.

1.3. Formulación del Problema de Investigación

El forrajeo en los lobos marinos es un proceso complejo, pues abarca la ubicación, captura y el consumo de la presa. Además, esta actividad se realiza por medio de buceos bajo el agua, lo que resulta aún más difícil su estudio. Sin embargo, gracias al avance tecnológico es posible colocar pequeños grabadores en los animales y obtener registros asociados tanto a su aceleración como a sus buceos. Diversos autores han empleado este tipo de datos para el estudio del comportamiento de forrajeo de diferentes especies de animales marinos ([Yoda et al., 2001]; [Viviant et al., 2009]; [Sakamoto et al., 2009]; [Suzuki et al., 2009]; [Gleiss et al., 2011]; [Iwata et al., 2012]; [Gallon et al., 2013]). Lo descrito anteriormente nos lleva a plantearnos las siguientes preguntas:

- ¿Qué características de los buceos influyen en la ocurrencia de intentos de captura de presa?
- ¿Cuáles son los eventos de intentos de captura de presa en las señales de aceleración?
- ¿Qué modelo estadístico permite predecir un buceo con al menos un intento de captura de presa?
- ¿Qué buceos poseen una mayor probabilidad de tener intentos de captura de presa?
- ¿Es mayor el desgaste de energía en un buceo con intentos de captura de presa frente a uno donde no hay dichos eventos?

1.4. Objetivos e Hipótesis

1.4.1. Objetivos

1. Objetivo Principal:

- Identificar buceos con mayor probabilidad de haber tenido al menos un evento de intento de captura de presa por medio de sus características tales como Profundidad Máxima, Duración, Ratio de Descenso, Número de Wiggles, entre otras.

2. Objetivos Específicos:

- Identificar intentos de captura de presa en las señales de aceleración.
- Proponer un modelo adecuado para predecir un buceo con al menos un intento de captura de presa.
- Predecir buceos con mayor probabilidad de haber tenido al menos un intento de captura de presa en buceos donde no se tienen registros de aceleración.
- Comparar el costo energético de un buceo con intentos de captura de presa frente a un buceo que no posee intentos de captura de presa.

1.4.2. Hipótesis

1. Hipótesis Principal:

- El evento de que exista o no intento de captura de presa en un buceo es explicado significativamente por las características del buceo.

2. Hipótesis Específicas:

- Los eventos de intento de captura de presa pueden ser identificados como señales de aceleración de alta frecuencia.
- El evento de que exista o no intento de captura de presa, según los datos de aceleración, es explicado significativamente por las características del buceo.
- Los lobos capturados con información de buceo y registros de aceleración y aquellos capturados con sólo información de buceo provienen de la misma población.

- El buceo con intentos de captura de presa involucra mayor costo energético que el buceo sin intentos de captura de presa.

1.5. Limitaciones y Delimitaciones

El estudio queda delimitado a las lobas marinas que fueron equipadas en la colonia de Punta San Juan en el año 2011. De estos animales, se desea estudiar el comportamiento de su forrajeo mediante el éxito de sus buceos realizados.

Una limitación importante en este estudio es que no se cuenta con un registro exacto del evento de comida (captura de presa), ya sea un video del momento o un grabador de temperatura del esófago del animal. Éste último es capaz de registrar cambios significativos en la temperatura cuando el animal consume una presa. Es por eso, que para el presente trabajo, la variable relacionada al evento de comida no es una variable real, sino es obtenida de manera indirecta a través del análisis de las señales de aceleración.

1.6. Importancia y Justificación

Evaluar el éxito de forrajeo de los buceos de los lobos marinos finos permite conocer un poco más acerca de la abundancia y disponibilidad de las presas, lo que resulta importante en el control de la dinámica trófica del ecosistema marino. Además, estos depredadores superiores son considerados valiosos bioindicadores del ecosistema marino [Guinet et al., 2001], ya que a través de su comportamiento es posible monitorear después las condiciones ambientales. Dicho monitoreo se pueda realizar debido a que los animales integran la variabilidad ambiental en sus comportamientos.

En el marco del proyecto TOPINEME y del LMI-DISCOH, este trabajo resulta muy beneficioso, pues ayuda a entender mejor el desenvolvimiento alimenticio del lobo marino fino en el Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH), así como poder comparar sus estrategias de forrajeo con las realizadas por las aves marinas o los pescadores. De este modo, será posible tomar medidas de manejo pesquero con la finalidad de salvaguardar el ecosistema marino.

Por último, este estudio permitiría comparar con el éxito de forrajeo de lobos marinos finos de otros lugares del mundo, saber si se desenvuelven del mismo modo, si las condiciones para forralear son las mismas; es decir, si tienen las mismas estrategias al realizar los buceos de alimentación.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Ecosistema Marino

Etimológicamente, la palabra Ecosistema está formada por el prefijo "eco-", que se refiere a todo los organismos vivos (plantas, animales, bacterias, hongos) y al ambiente físico (aire, tierra y agua) en el que se encuentran; y de "sistema", que se refiere a la interacción entre los organismos vivos y no vivos del ambiente [Bonnell, 2009]. Por lo tanto, un ecosistema consiste de organismos bióticos y abióticos que interactúan entre sí en una determinada área geográfica.

Existen numerosos enfoques de clasificación de los ecosistemas. En general, los ecosistemas son definidos según las plantas y animales dominantes, formas del terreno, y condiciones climáticas encontradas en una determinada área geográfica [Bonnell, 2009].

En el ecosistema marino el hábitat lo constituyen los mares y océanos, que representan el 70 % de la superficie de la tierra (362 millones de km^2). Además, el ecosistema marino es el hábitat más grande y homogéneo, debido a que todos sus océanos y mares están conectados entre sí.

2.1.1. Clasificación del Ecosistema Marino

El mar es complejo y dinámico, por lo que presenta distintos tipos de ecosistemas, los cuales se pueden clasificar de distintos modos. Por ejemplo, se pueden relacionar con las zonas de vida (pelágicos, asociados a las masas de agua, y bentónicos, asociados a los fondos marinos), con los biotopos (de fondos y litorales arenosos, rocosos, etc.) o con las biocenosis características (ecosistemas de arrecifes de coral, de manglares, etc.). Otra forma de clasificación es según la disponibilidad de luz, encontrándose organismos que viven en la oscuridad, que se conoce como zona afótica y lo contrario que es la zona eufótica. Adicionalmente, se pueden clasificar según la fuente metabólica que emplean los organismos dentro del mar como fitoplancton, macroalgas, ecosistemas quimiosintéticos, etc. [Lara-Lara et al., 2008]

A medida que la profundidad aumenta, las condiciones dentro del mar cambian distinguiéndose cuatro zonas principales [Tait and Dipper, 1998]:

- (a) **Zona Epipelágica**, va desde la superficie hasta los 200 m de profundidad. Aquí, se puede tener gradientes fuertes de iluminación y algunas veces temperatura. Además, ocurren cambios diurnos y estacionales de la intensidad de la luz y la temperatura.
- (b) **Zona Mesopelágica**, abarca desde los 200 hasta los 1000 m de profundidad. En esta zona, la luz penetra en mínimas cantidades, y la gradiente de temperatura es más constante y gradual sin variaciones estacionales.
- (c) **Zona Batipelágica**, comprende la zona entre los 1000 m y 4000 m de profundidad. La oscuridad es casi completa excepto por la bioluminiscencia, la temperatura es baja y constante, y la presión del agua es alta.
- (d) **Zona Abisopelágica**, por debajo de los 4000 m. Es oscura, fría, con la presión más intensa y con muy poca comida.

El fondo y la orilla del mar juntos forman la División Béntica, que comprende tres grandes zonas: el Litoral, el Sublitoral, y las Zonas Profundas del Mar (Ver Fig.2.1).

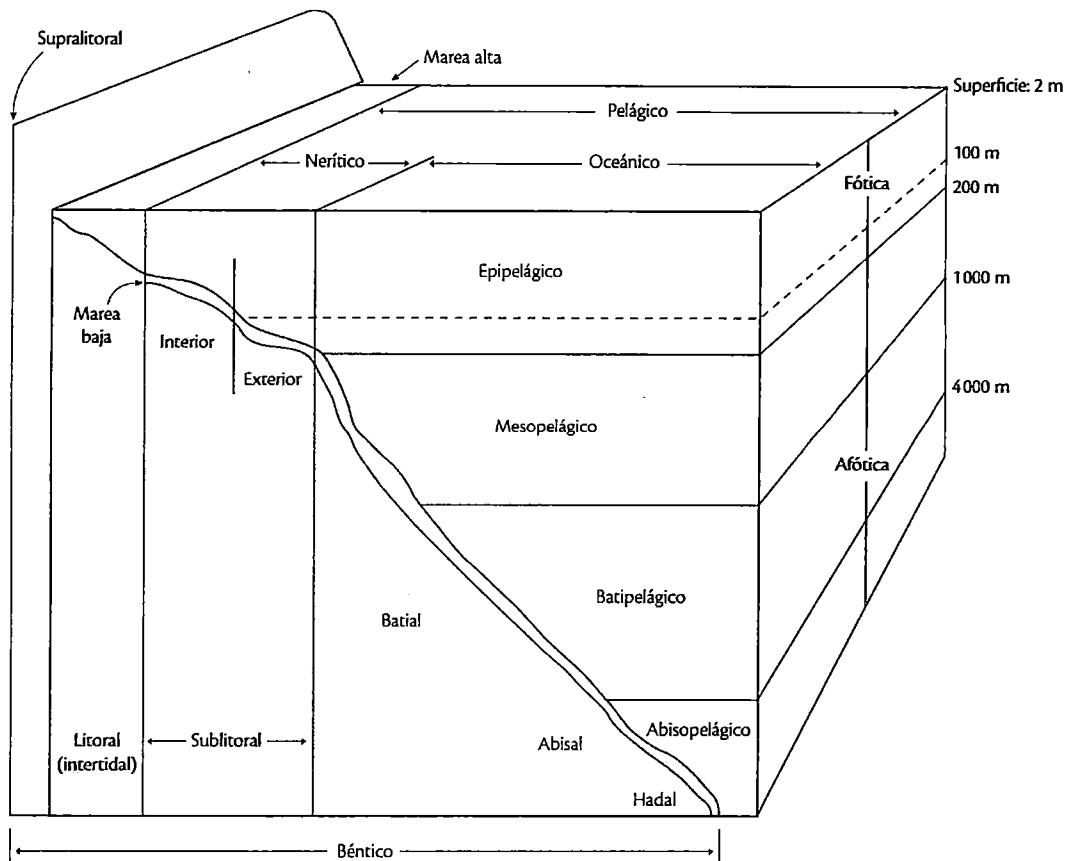


Figura 2.1: Esquema general de los ambientes marinos.
Fuente: Los ecosistemas marinos [Lara-Lara et al., 2008].

2.1.2. Organización del Ecosistema Marino

1. Cadena Trófica

Una propiedad fundamental de cualquier ecosistema es su estructura trófica. Esto es, la manera en que la energía, como nutrientes y alimentos, se utiliza y se distribuye a través de ella. La cadena trófica comprende tres niveles, que son:

- **Productores**, son organismos que mediante el proceso de fotosíntesis producen su alimento (materia orgánica) a partir de la energía solar y de sustancias inorgánicas que toman del medio ambiente. Se denominan *autótrofos*, ya que fabrican su propio alimento. En el mar, las algas, plantas marinas y bacterias fotosintéticas que viven en grandes profundidades, son las que desempeñan este papel.

- **Consumidores**, son los organismos que toman la materia orgánica producida por otros seres y la transforman en su materia orgánica. Es por esto, que reciben el nombre de *heterótrofos*.
- **Descomponedores**, son los organismos que se encargan de descomponer los organismos muertos transformándolos en sustancias minerales (materia inorgánica) que se incorporan al medio. Los descomponedores más importantes son las bacterias y los hongos.

2. Flujo de la Energía

El flujo de energía es el factor más importante en la organización de un ecosistema, ya que la energía es indispensable para que los organismo bióticos realicen sus actividades vitales.

La fuente principal de la energía es el sol, que emite continuamente energía radiante en el espacio, llegando una pequeña parte de esta radiación a la tierra. Luego, mediante el proceso de fotosíntesis se transforma en energía química y es transferida por el ecosistema a través de los movimientos de materiales dentro y entre los organismos. Esto se realiza a través de la alimentación, crecimiento, reproducción y descomposición [Tait and Dípper, 1998].

La transferencia de la energía está regida por las dos primeras leyes de la termodinámica. La primera, establece que la energía puede cambiar de una forma a otra, pero no se crea ni se destruye. La segunda, la ley de la entropía, establece que todo proceso que implique una transformación de energía se produce por una degradación de la misma energía, desde una forma concentrada (como por ejemplo, materia orgánica) a una forma dispersa (como por ejemplo calor) [Graf, 2014].

En base a lo anterior, la energía fluye a través de los distintos niveles tróficos y lo hace de manera unidireccional. Empieza con los productores que toman una parte de la energía solar y mediante el proceso de fotosíntesis la transforman en moléculas ricas en energía química. Luego, pasa a los consumidores, quienes utilizan una pequeña parte de dicha energía química contenida en los alimentos. Por último, los descomponedores aprovechan la energía química

contenida en los restos de otros organismos. Sin embargo, cada vez que pasa de un nivel a otro, la energía se va perdiendo, siendo como máximo el 10% de energía que se aprovecha del nivel trófico anterior [Caixa, 2014] (Ver Fig. 2.2). El resto se invierte como: (a) Energía que se necesita para estar activos que luego se disipa en forma de calor. (b) Acumulación en elementos como pelos, plumas y uñas de los animales, llamado proceso de síntesis orgánica. (c) Acumulación en excrementos y cadáveres que pasan al ambiente y a los descomponedores.

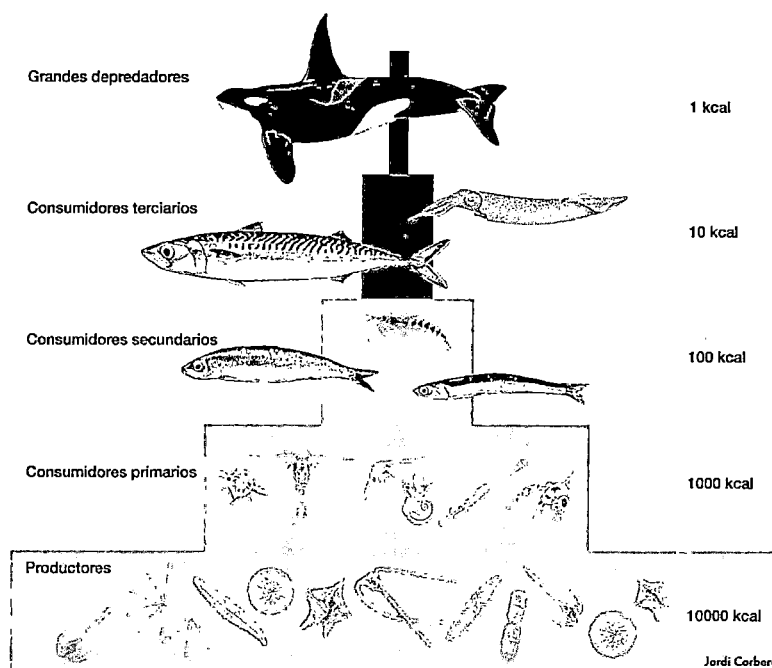


Figura 2.2: Ejemplo de una pirámide trófica marina.
Fuente: El mar a fondo [Caixa, 2014]

3. Flujo de la Materia

Al igual que la energía, la materia fluye a través de los diferentes niveles tróficos y lo hace de manera cíclica. Es decir, los intercambios se realizan entre los diferentes componentes tanto bióticos como abióticos.

Es así que, el proceso comienza con los productores, quienes transforman la materia inorgánica del ambiente en materia orgánica. Continúa con los consumidores, quienes aprovechan lo pro-

ducido en el nivel anterior. Aquí, se puede encontrar diferentes niveles de consumidores (primarios, secundarios, etc.), los cuales aprovechan la materia producida por el nivel de consumidor anterior. Esto termina con los descomponedores, quienes transforman los restos orgánicos y cadáveres en materia inorgánica, como sales minerales, que se reincorpora de nuevo al medio físico.

2.2. Rol de la Energía

La energía se puede definir como la capacidad de realizar un trabajo y se presenta en diferentes formas, tales como la energía para el movimiento, energía química, energía térmica o electromagnética.

Toda la actividad biológica depende de las transferencias continuas y transformaciones de energía, sin la cual todo sistema de vida natural se desintegraría de manera irreversible [Tait and Dipper, 1998]. De esta forma, la energía tiene un rol muy importante en el desenvolvimiento de un ecosistema, puesto que se va transformando de una forma a otra a medida que pasa los niveles tróficos.

2.2.1. Obtención y Gasto Energético mediante el forrajeo

La energía necesaria para el desarrollo, reproducción, crianza y supervivencia de un mamífero se puede obtener a través de la alimentación o forrajeo. Sin embargo, obtener el alimento implica un desgaste de energía, puesto que, el animal debe invertir su reserva de energía en la búsqueda, captura y consumo de presa. Es así que, los animales tienen estrategias para forrajear, teniendo en cuenta el costo que involucra obtener el alimento y el tiempo empleado en obtenerlo. En base a esto, los animales maximizan la rentabilidad de conseguir una presa [Sinervo, 2006], indicador que está definido, según la teoría de forrajeo óptimo, como:

$$\textit{Rentabilidad} = \frac{\text{Energía por presa} - \text{Costo por adquirir presa}}{\text{Tiempo en adquirir presa}}$$

Un problema fundamental asociado al desgaste de energía en la búsqueda de la comida es el hecho de que la comida no se distribuye de manera uniforme en el ambiente. A pesar de que las distintas zonas de comida o parches están disponibles en un mismo momento, el animal debe tomar la decisión sobre cuál zona dirigirse y por cuánto tiempo debe permanecer en ella [Gutiérrez, 1998].

Existen varias maneras que se han planteado para predecir cómo el animal decide dónde forrajear y cuándo debe abandonar dicho terreno. Entre ellas se encuentra el Teorema del Valor Marginal, propuesto por Charnov en 1976. Este teorema especifica el momento en que el animal debería retirarse del parche que está explotando [Sinervo, 2006]. En general, a fin de maximizar la tasa de ganancia, un animal debería abandonar el parche cuando éste se convierte en marginal; es decir, cuando dicha ganancia es igual o menor al promedio general de ganancia para el parche [Gutiérrez, 1998].

De manera visual, la curva de ganancia de energía en función del tiempo que permanece un predador en el parche comienza con una fuerte pendiente que va disminuyendo gradualmente a medida que se van agotando las presas (Fig.2.3).

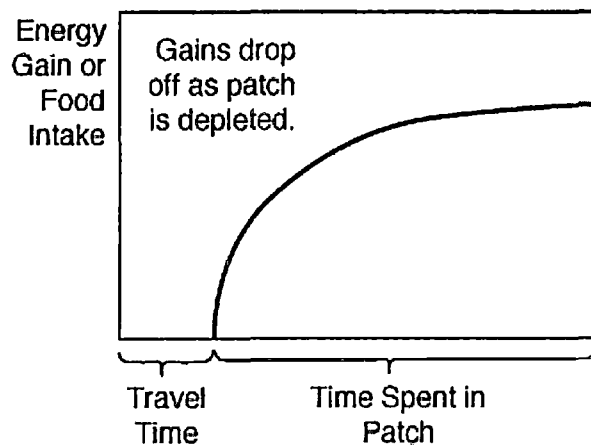


Figura 2.3: Curva de obtención de energía en función del tiempo.
Fuente: Optimal Foraging Theory - Constraints and Cognitive Processes [Sinervo, 2006].

Un factor adicional muy importante en la decisión que tome el animal en quedarse en un parche u otro, es el tiempo que involucra el viaje entre parches. Puesto que, el animal gasta una

gran cantidad de energía al desplazarse entre las zonas de alimentación. Por lo tanto, el predador debe maximizar la tasa neta de energía, incluyendo el tiempo durante el cual no puede alimentarse a medida que viaja a un parche [Sinervo, 2006]. Éste indicador se define como:

$$\text{Tasa de Ganancia de Energía} = \frac{\text{Ganancia de Energía o Tamaño de Carga}}{\text{Tiempo hasta el parche} + \text{Tiempo de forrajeo en el parche}}$$

La línea que maximiza la curva de ganancia de la energía es aquella que presenta una mayor pendiente y que llega a esta curva por la tangente (línea roja) cruzándose en un sólo punto. Un animal que se retira demasiado rápido gana menos energía con respecto a la ganancia neta máxima que sea posible (Ver la gráfica izquierda en la Fig.2.4). Por otro lado, un animal que se queda demasiado tiempo también presenta una línea de menor profundidad respecto a la línea de máxima pendiente (Ver la gráfica derecha en la Fig.2.4).

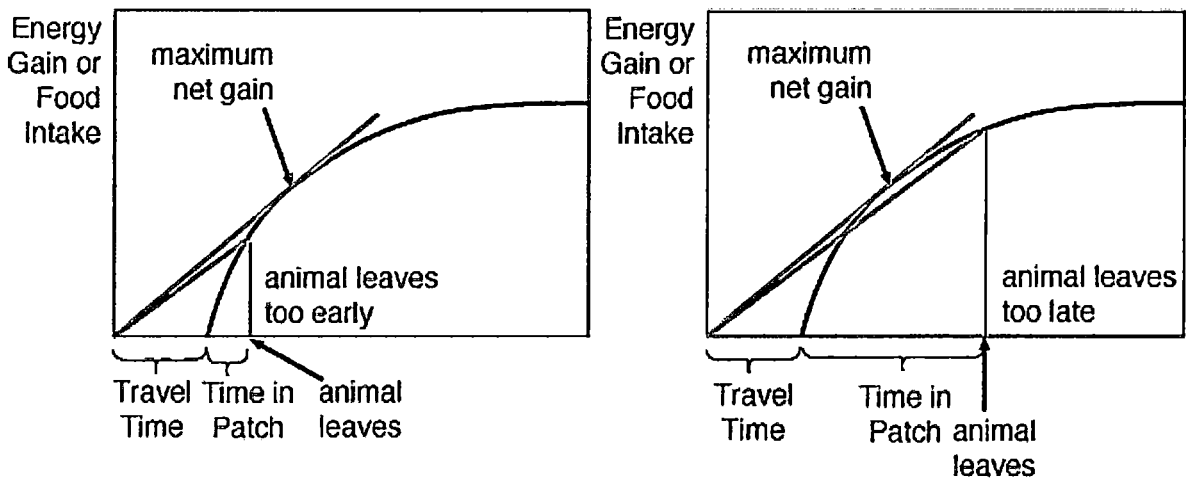


Figura 2.4: Maximización de la ganancia de energía con respecto al tiempo.
Fuente: Optimal Foraging Theory - Constraints and Cognitive Processes [Sinervo, 2006].

Los animales forrajean de diferentes maneras dependiendo del ambiente en el que se desenvuelvan. Por su parte, las especies marinas presentan un comportamiento de forrajeo que se puede dividir en 4 componentes: el movimiento vertical (buceo), el movimiento horizontal o desplazamiento, el uso de hábitat y el resultado de la captura de presa [Austin et al., 2006].

Primero, el buceo permite que los animales marinos puedan encontrar presas. Segundo, el desplazamiento horizontal que realizan refleja su comportamiento y la distribución de las presas, dado que su movimiento muestra sus estrategias de búsqueda. Tercero, el ambiente en el cual estos animales forrajean refleja la calidad y la disponibilidad de las presas en dicha zona. Esto se debe a que la disponibilidad de presas está correlacionada con propiedades físicas y biológicas del océano como la profundidad, temperatura y tipo de sustrato [Austin et al., 2006]. Por último, todo esto trae consigo la captura de la presa.

En este contexto, se tienen depredadores marinos que respiran aire, pero que deben enfrentarse al reto de buscar su alimento bajo el agua, administrando de buena manera sus reservas de oxígeno. Entre estos animales se encuentran las aves marinas y algunos mamíferos marinos como los lobos y leones marinos. Dado esto, se pueden distinguir dos tipos de estrategia de forrajeo empleado por los depredadores marinos que necesitan de oxígeno para su respiración [Costa and Gales, 2003]:

- (a) **Forrajeo Béntico**, consiste en invertir todo el costo de transporte en llegar al punto más profundo del buceo para empezar con la búsqueda de presa, ya que esta presa existe cerca a la zona béntica. Por ende, esta estrategia involucra estar más tiempo sumergido en el agua, ocasionando que se exceda el uso de las reservas de oxígeno disponibles (límite de buceo aeróbico).
- (b) **Forrajeo Epipelágico**, la búsqueda de la presa se realiza durante todo el proceso del buceo, debido a que la presa se mueve dentro de la columna de agua.

Estas estrategias son utilizadas por diferentes especies, quienes utilizan tanto el forrajeo béntico como el epipelágico. Entre dicha variedad se encuentran los pingüinos de penacho amarillo, *Eudyptes chrysocome* [Tremblay and Cherel, 2000], los pingüinos rey, *Aptenodytes patagonicus* [Cherel et al., 1996], los lobos marinos del norte, *Callorhinus ursinus* [Goebel et al., 1991], entre otros. Por otro lado, existen otros vertebrados marinos que se especializan en un tipo de estrategia. Un claro ejemplo son la familia de los Otáridos (Lobos marinos y Leones marinos). Mientras que los lobos marinos presentan estrategias diurnas de forrajeo epipelágico, los leones marinos forrajean generalmente cerca o en la zona béntica con muy pocas variaciones diurnas [Costa and Gales, 2003].

2.2.2. Cuantificación del Gasto Energético

La cuantificación del gasto energético es un punto clave para entender las cuestiones como la historia de la vida, el flujo trófico, la biogeografía y las estrategias de comportamiento [Gleiss et al., 2011]. Inicialmente, existían dos grandes métodos para estimar el gasto de energía en el campo:

- Método del **Agua Doblemente Marcada**, permite estimar la producción de total de dióxido de carbono, por ende el desgaste de energía, en base a la eliminación diferencial de isótopos de hidrógeno (2H , deuterio o 3H , tritio) y oxígeno (^{18}H) introducidos en el agua corporal [Sparling et al., 2008]. De este modo, el procedimiento involucra dosificar al animal con isótopos, recapturarlos varias veces para obtener la eliminación del isótopo y poder proporcionar una medida global del desgaste de energía entre las capturas [McPhee et al., 2003]. En principio, este método fue desarrollado por Lifson et al en 1955 para ser utilizado en animales pequeños. Actualmente, su uso se ha vuelto popular en el campo de la ecología fisiológica y de las tasas metabólicas de diferentes taxones, incluyendo especies marinas como las tortugas y los mamíferos. Sin embargo, en algunos animales no se obtienen resultados significativos. Es por eso, que para medir su efectividad, se recomienda medir simultáneamente la tasa metabólica usando además de este método, respirometría o calorimetría [Jones et al., 2009].
- Método del **Ritmo Cardíaco** (f_H), proporciona una estimación del ratio de oxígeno consumido (\dot{V}_{O_2}) en un determinado periodo. Este método está basado en la ecuación de Fick para el sistema cardiovascular:

$$\dot{V}_{O_2} = f_H \times V_s (C_a O_2 - C_{\bar{V}} O_2) \quad (2.1)$$

Donde V_s representa el volumen sistólico (cantidad de sangre bombeada por latido de corazón), $C_a O_2$ es el contenido de oxígeno de la sangre arterial y $C_{\bar{V}} O_2$ es el contenido de oxígeno en la sangre venosa mixta. Se puede ver claramente en la ecuación 2.1 que si $V_s (C_a O_2 - C_{\bar{V}} O_2)$ (Pulso de Oxígeno), que es la cantidad de oxígeno consumida por el animal por latido de corazón, permanece constante o varía sistemáticamente existe una relación lineal entre el ritmo cardíaco (f_H) y el consumo de oxígeno (\dot{V}_{O_2}) (Butler et al, 2004). Cabe resaltar que la relación entre

V_s , $(C_a O_2 - C_{\bar{V}} O_2)$ y el ritmo cardíaco (f_H) varía tanto entre como dentro de las especies terrestres (caballos, bueyes, perros, cabras, terneros, ratas) y especies marinas (focas y leones marinos), además de diferir con la actividad [McPhee et al., 2003].

Estos métodos han tenido resultados exitosos; sin embargo, ambos tienen sus limitaciones. El primer método no puede cuantificar los costos energéticos de actividades específicas, mientras que el segundo involucra realizar una cirugía para la implantación y retiro del aparato electrónico de registro de datos, lo que conlleva a posibles complicaciones en el proceso [Wilson et al., 2006].

Es a partir del trabajo de Rory Wilson, en el 2006, que se cuenta con otra manera de estimar el gasto energético mediante acelerometría, utilizando pequeños aparatos electrónicos (acelerómetros) que son de fácil colocación en los animales. Wilson se plantea que la actividad animal está definida en términos de movimiento, que involucra un desgaste de energía. Por lo que, una cuantificación exacta del movimiento debería correlacionar con el desgaste de energía invertido. En base a esto, y dado que el movimiento se caracteriza por aceleración variable, si se cuenta con medidas precisas de aceleración en las tres dimensiones espaciales se puede determinar de manera indirecta una gran proporción del desgaste energético total.

De este modo, se plantea y define un nuevo indicador llamado Aceleración Dinámica Global del Cuerpo, ODBA por sus siglas en inglés 'Overall Dynamic Body Acceleration', que es una medida integrada del movimiento del cuerpo [Wilson et al., 2006] y se calcula del siguiente modo:

$$ODBA = |D_x| + |D_y| + |D_z| \quad (2.2)$$

En donde, D representa al componente dinámico de la aceleración en cada uno de los tres ejes de dirección (x : *Surge* – y : *Sway* – z : *Heave*).

La aceleración total (T) registrada en cada eje está compuesta tanto de un componente dinámico, relacionado a cambios en el movimiento del cuerpo, como de un componente estático, relacionado a la posición del cuerpo con respecto a la gravedad [Shepard et al., 2009]. Para obtener los valores del componente dinámico se debe de:

1. Suavizar la aceleración total sobre un número p de puntos.
2. Restar los valores suavizados de la aceleración total sobre el mismo intervalo de tiempo.
3. Convertir lo obtenido en el paso anterior a unidades positivas.

De este modo, el ODBA queda expresado como sigue:

$$\begin{aligned}
 ODBA = & \sqrt{\left(\left(T_x - \left[\frac{\Sigma(T_{xn} + \dots + T_{xn+p})}{(p+1)} \right] \right)^2 \right)} \\
 & + \sqrt{\left(\left(T_y - \left[\frac{\Sigma(T_{yn} + \dots + T_{yn+p})}{(p+1)} \right] \right)^2 \right)} \\
 & + \sqrt{\left(\left(T_z - \left[\frac{\Sigma(T_{zn} + \dots + T_{zn+p})}{(p+1)} \right] \right)^2 \right)}
 \end{aligned}$$

2.3. Observación del Comportamiento Animal

El comportamiento animal involucra a todos los procesos observables por el cual el animal responde tanto a estímulos internos como externos. Los animales se comportan de distintas maneras debido a cuatro razones fundamentales: para obtener comida, para interactuar en grupos sociales, para reproducirse y para evitar la predación [Mandal, 2010]. El estudio científico de tales comportamientos desarrollados en el ambiente natural recibe el nombre de Etología, que involucra no sólo lo que el animal realiza sino también cuándo, cómo, por qué y dónde ocurre dicho comportamiento [Blackshaw, 1986].

En este contexto, observar directamente el comportamiento de un animal en su ambiente natural permite entender el rol que cumple en su comunidad que lo rodea, su función dentro del ecosistema y la respuesta hacia las perturbaciones que se presentan. Sin embargo, observar el comportamiento de las especies marinas resulta dificultoso por diferentes razones como: la profundidad del mar, la visibilidad bajo el agua, el peligro físico y el correcto acceso a los animales de estudio.

Algunos depredadores superiores como los lobos marinos y las aves marinas no desarrollan todas sus actividades dentro del mar, pero son dependientes del mar debido a que es su fuente de energía. Es decir, obtienen su alimento del mar a través de buceos realizados a diferentes profundi-

dades, resultando difícil su estudio directo.

En los últimos años, el desarrollo de grabadores electrónicos que se colocan sobre el animal, ha permitido poder estudiar el desenvolvimiento de los animales cuyos ambientes son de difícil y hasta casi imposible acceso, registrando información acerca de su movimiento, comportamiento, fisiología y ambiente [Rutz and Hays, 2009]. Biologging es el nombre de la rama científica encargada de esto y los datos obtenidos pueden ser utilizados para fines como la investigación ecológica, estudios experimentales controlados, estudios fisiológicos, y observación del ambiente *in situ* que rodea al animal. Además, si se cuenta con observaciones a largo plazo, éstas pueden ser utilizadas para entender la influencia de las variaciones climáticas, y predecir el impacto del cambio climático sobre la distribución de los vertebrados superiores [Bograd et al., 2010].

Existen diversos aparatos electrónicos, siendo los más utilizados el GPS para registrar desplazamientos, el TDR para determinar profundidades de buceo, el ECG para el registro de ritmo cardiaco, y el acelerómetro que registra la aceleración hasta en tres ejes.

2.4. Análisis Wavelets

El análisis wavelets es un análisis de la señal en tiempo y frecuencia, proporcionando información sobre las diferentes frecuencias que componen a la señal (componentes periódicos) a través del tiempo [Ménard et al., 2007]. Este tipo de análisis es adecuado para señales no estacionarias, pues presentan cambios de frecuencias a través del tiempo. Por ejemplo, una señal no estacionaria viene a ser el registro de aceleraciones de un animal en movimiento, en donde se tiene aceleraciones transitorias de alta frecuencia a determinados instantes de tiempo.

2.4.1. Wavelets

Los wavelets se utilizan ampliamente en muchos campos de la ciencia como detección de señales sísmicas, procesamiento de imágenes, óptica, mecánica cuántica, investigación médica [Lau and Weng, 1995]. Por lo general, se presentan en fórmulas matemáticas, pero en realidad se puede entender en términos de simples comparaciones o correlaciones con la señal que se está analizando [Lee Fugal, 2009].

Un wavelet es una forma de onda de duración limitada, que tiene un valor medio de cero y se presenta en diferentes formas y tamaños (Fig. 2.5). Como puede verse, la irregularidad, la forma asimétrica y la duración limitada que poseen los wavelets permite que sean mejores en el estudio de anomalías u otros eventos transitorios que ocurren dentro de una señal [Lee Fugal, 2009].

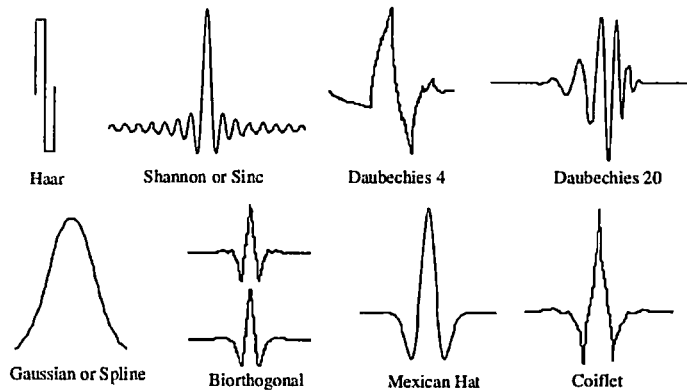


Figura 2.5: Ejemplos de tipos de Wavelets.
Fuente: Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing [Lee Fugal, 2009]

Los wavelets son una familia de funciones, las cuales provienen de una sólo función llamada la wavelet madre $\psi(t)$, que se expresa en base a dos parámetros: τ la posición en el tiempo y a la escala de los wavelets. Es así que, matemáticamente, los waveletes quedan definidos como:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (2.3)$$

2.4.2. Transformada Wavelet Continua

La transformada wavelet descompone a una señal en funciones wavelets que son estrechas cuando existen altas frecuencias y amplias sobre las bajas frecuencias. De este modo, la transformada wavelet continua de una serie $x(t)$ con respecto a la wavelet de análisis elegida $\psi(t)$ está definida como:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \cdot dt \quad (2.4)$$

En donde el * indica la conjugada compleja. La señal transformada es una función de dos variables b y a , las cuales son los parámetros de traslación y escala, respectivamente. Además, los coeficientes generados por esta ecuación describen la correlación entre la forma de onda y la wavelet usada a diferentes escalas y traslaciones.

Existen diferentes funciones wavelets, siendo la wavelet Morlet la más conocida y ampliamente usada en el análisis de procesos ecológicos [Sakamoto et al., 2009, Cazelles et al., 2008, Ménard et al., 2007, Lau and Weng, 1995].

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{-i2\pi f_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2.5)$$

La relación entre la frecuencia y la escala de la wavelet está dada por:

$$\frac{1}{f} = \frac{4\pi s}{\omega_0 + \sqrt{2 + \omega_0^2}}$$

Donde ω_0 es la frecuencia central angular del wavelet ($\omega_0 = 2\pi f_0$). Cuando ω_0 está alrededor de 2π , la escala del wavelet es inversamente proporcional a la frecuencia central del wavelet ($f \approx 1/s$). De este manera, se torna más sencilla la interpretación del análisis wavelet y se puede reemplazar, en todas las ecuaciones, la escala s por la frecuencia f o el periodo $p = 1/f$. [Cazelles et al., 2008]

2.4.3. Amplitud Espectral

La amplitud de la señal a diferentes escalas viene expresada como el valor absoluto de la matriz de coeficientes wavelets ($|W_n(s)|$) [Torrence and Compo, 1998].

2.4.4. Reconstrucción de la Señal

La señal se puede reconstruir en base a una función wavelet completamente diferente, una de las más sencilla es la función delta (δ). De este modo, la serie de tiempo reconstruida es simplemente la suma de la parte real de la transformada wavelet sobre todas las escalas [Torrence and Compo, 1998].

$$x_n = \frac{\delta_j \delta_t^{1/2}}{C_\delta \psi_0(0)} \sum_{j=0}^J \frac{R\{W_n(s_j)\}}{s_j^{1/2}} \quad (2.6)$$

De manera similar, si se suma sobre un conjunto determinado de escalas se obtiene la señal filtrada. El filtro se puede hacer también de manera simultánea en escala y tiempo definiendo un límite para el poder del wavelet. Esta técnica tiene la ventaja sobre otras metodologías tradicionales de filtrado debido a que se elimina el ruido en todas las frecuencias y se puede utilizar para aislar los eventos individuales que tienen un amplio espectro de potencia o múltiples eventos que poseen diferentes frecuencias [Torrence and Compo, 1998].

2.5. Regresión Logística

La Regresión Logística es una técnica estadística multivariante que se utiliza cuando se desea pronosticar la probabilidad de que ocurra o no un suceso determinado en base a muchas variables explicatorias categóricas o continuas.

Esta técnica fue propuesta inicialmente en los años setenta como una alternativa para superar los problemas encontrados con la regresión de mínimos cuadrados ordinarios al contar con variables de respuesta dicotómicas. Desde entonces, ha sido ampliamente usada en diferentes campos como la epidemiología, las ciencias sociales y en la investigación educacional [Peng and So, 2002].

2.5.1. Definición del Modelo

El modelo logístico está basado en una relación lineal entre el logaritmo natural (\ln) del odds de un evento, el cual presenta solo dos respuestas, éxito o fracaso, y las variables independientes capaces de explicar dicho evento. Esto es, para una variable respuesta binaria y , y p variables predictoras x_1, x_2, \dots, x_p , la parte sistemática del modelo está definido como:

$$\log \left[\frac{\pi(x_1, x_2, \dots, x_p)}{1 - \pi(x_1, x_2, \dots, x_p)} \right] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p \quad (2.7)$$

La ecuación anterior también se puede expresar en términos de la probabilidad de la variable respuesta de la siguiente forma [Hosmer and Lemeshow, 2000].

$$\pi(x) = \frac{\exp\{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p\}}{1 + \exp\{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p\}} \quad (2.8)$$

Donde π es la probabilidad del evento, X s son un conjunto de predictores y los β s son los coeficientes de regresión a ser estimados mediante máxima verosimilitud.

2.5.2. Estimación de Parámetros

El objetivo es estimar los $p + 1$ parámetros desconocidos de β en la Ec.2.7. Esto se debe hacer con la estimación por máxima verosimilitud, donde los estimadores máximos verosímiles son obtenidos como funciones de la muestra haciendo que se maximice la función de verosimilitud asociada a la muestra.

Para un modelo de regresión logística con parámetros β_1, \dots, β_p y con una variable dicotómica Y , se denota a la función de verosimilitud asociada a una muestra de tamaño N como:

$$\left((x^{(1)}, y^{(1)}), \dots, (x^{(N)}, y^{(N)}), \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p \right) = \prod_{j=1}^N (\pi^{(j)})^{y^{(j)}} (1 - \pi^{(j)})^{1-y^{(j)}} \quad (2.9)$$

Donde $\pi^{(j)} = Pr(Y = 1|x^{(j)})$. Además, dado que $\ln(z)$ es una función estrictamente creciente, entonces, el valor de los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ maximizando la Ec.2.9 coincide con el valor de los parámetros que maximiza el logaritmo natural de la función de verosimilitud, la cual queda expresada del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \ln \left((x^{(1)}, y^{(1)}), \dots, (x^{(N)}, y^{(N)}), \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p \right) &= \sum_{j=1}^N y^{(j)} \ln(\pi^{(j)}) + \sum_{j=1}^N (1 - y^{(j)}) \ln(1 - \pi^{(j)}) \\ &= \sum_{j=1}^N y^{(j)} [\ln(\pi^{(j)}) - \ln(1 - \pi^{(j)})] + \sum_{j=1}^N \ln(1 - \pi^{(j)}) \\ &= \sum_{j=1}^N y^{(j)} \ln \frac{\pi^{(j)}}{1 - \pi^{(j)}} + \sum_{j=1}^N \ln(1 - \pi^{(j)}) \end{aligned}$$

Considerando que:

$$\ln \left(\frac{\pi^{(j)}}{1 - \pi^{(j)}} \right) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)}$$

y que

$$(1 - \pi^{(j)}) = \frac{e^{-(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})}}{1 + e^{-(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})}} = \frac{1}{1 + e^{(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})}}$$

Obtenemos:

$$\ln \left((x^{(1)}, y^{(1)}), \dots, (x^{(N)}, y^{(N)}), \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p \right) = \sum_{j=1}^N y^{(j)} \left(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)} \right) - \sum_{j=1}^N \ln \left(1 + e^{(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})} \right) \quad (2.10)$$

Entonces, los estimadores de máxima verosimilitud $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p$ para los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ se obtendrán al resolver el sistema de $p+1$ ecuaciones y $p+1$ incógnitas siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln L}{\partial \beta_0} &= \sum_{j=1}^N y_j - \sum_{j=1}^N \frac{e^{(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})}}{1 + e^{(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})}} = 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial \beta_1} &= \sum_{j=1}^N y_j x_1^{(j)} - \sum_{j=1}^N x_1^{(j)} \frac{e^{(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})}}{1 + e^{(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})}} = 0 \\ &\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ \frac{\partial \ln L}{\partial \beta_p} &= \sum_{j=1}^N y_j x_p^{(j)} - \sum_{j=1}^N x_p^{(j)} \frac{e^{(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})}}{1 + e^{(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i^{(j)})}} = 0 \end{aligned}$$

En el sistema anterior de $p + 1$ ecuaciones y $p + 1$ incógnitas no es posible obtener una fórmula cerrada para los estimadores de los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$. Es por eso, que es común usar un algoritmo numérico iterativo como el Método de Newton-Raphson para calcular dichas estimaciones, obteniéndose la siguiente fórmula de actualización de los parámetros:

$$\hat{\beta}^{nuevo} = \hat{\beta}^{viejo} + (X^t W X)^{-1} X^t (y - \hat{p}) \quad (2.11)$$

Donde:

- $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_1)$
- \mathbf{X} es una matriz cuyas filas son $x^{(j)}, j = 1, \dots, N$. Es decir, $\mathbf{X} \in M(N, p)$

- \mathbf{W} es una matriz diagonal con elementos $p^{(j)}(1 - p^{(j)})$, $j = 1, \dots, N$. $\mathbf{W} \in M(N, N)$

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} p^{(1)}(1 - p^{(1)}) & \dots & \dots & 0 \\ 0 & p^{(2)}(1 - p^{(2)}) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & p^{(N)}(1 - p^{(N)}) \end{pmatrix}$$

- $\hat{\mathbf{p}}$ es un vector cuya componente j -ésima indica la probabilidad estimada en esa iteración. Es decir, $\hat{\mathbf{p}} \in M(N, 1)$, con $p^{(j)} = \frac{e^{(\mathbf{x}^{(j)} \hat{\beta}^{viejo})}}{1 + e^{(\mathbf{x}^{(j)} \hat{\beta}^{viejo})}}$
- \mathbf{y} es un vector de componentes $y^{(j)}$, $j = 1, \dots, N$. Por lo tanto, $\mathbf{y} \in M(N, 1)$

Los criterios de convergencia del método iterativo para estimar los parámetros pueden ser varios, pero todos ellos se basan en que $\hat{\beta}^{nuevo} \simeq \hat{\beta}^{viejo}$ o $\ln L(\hat{\beta}^{nuevo}) \simeq \ln L(\hat{\beta}^{viejo})$ o $\hat{\mathbf{p}}^{nuevo} \simeq \hat{\mathbf{p}}^{viejo}$.

2.5.3. Interpretación de los Coeficientes

Los coeficientes se pueden interpretar de la siguiente manera:

- Para una variable predictora x_j dada, el coeficiente β_j representa el cambio en el logit resultante al aumentar una unidad en la j -ésima variable, para valores fijos arbitrarios de las variables predictoras restantes $x_1, \dots, x_{j-1}, x_{j+1}, \dots, x_p$.

Demostración: Sean $x = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_p)$ y $x' = (x'_1, \dots, x'_i, \dots, x'_p)$ dos observaciones verificando $x_j = x'_j$ para todo $j \neq i$ y $x'_i = x_i + 1$.

Calculando el cambio en el logit obtenemos:

$$\text{logit}(x') - \text{logit}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x'_i - \left(\beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i \right) = \beta_i x'_i - \beta_i x_i = \beta_i (x_i + 1 - x_i) = \beta_i \quad \blacksquare$$

- El coeficiente de regresión exponentiado $\exp(\beta_j)$ proporciona el odds ratio asociado con un cambio de una unidad en la variable predictora x_j .

2.5.4. Bondad de Ajuste del Modelo

1. Devianza

Es una manera de evaluar el ajuste del modelo, a través de una comparación con un modelo más general con un número máximo de parámetros que se puedan estimar. Este modelo se denomina modelo saturado, modelo completo o modelo maximal. Es decir, si se tienen N observaciones Y_i , $i = 1, \dots, N$ con diferentes valores para el componente lineal $X_i^T \beta$, entonces el modelo saturado puede ser definido con N parámetros.

En general, sea m el número máximo de parámetros que se puedan estimar. Sea $\beta_{\text{máx}}$ el vector de parámetros para el modelo saturado y $b_{\text{máx}}$ el estimador de máxima verosimilitud de $\beta_{\text{máx}}$. La función de verosimilitud para el modelo saturado evaluada en $b_{\text{máx}}$ es $L(b_{\text{máx}}; y)$, la cual será más grande que cualquier otra función de verosimilitud definida para estos datos, con la misma distribución asumida y función de enlace, porque proporciona la descripción más completa de los datos.

Sea $L(b; y)$ el valor máximo de la función de verosimilitud para el modelo de interés. Luego, el ratio de verosimilitud está definido como:

$$\lambda = \frac{L(b_{\text{máx}}; y)}{L(b; y)}$$

Sin embargo, el indicador utilizado es el logaritmo del ratio de verosimilitud, que es la diferencia entre los logaritmos de las funciones de verosimilitud.

$$\log \lambda = l(b_{\text{máx}}; y) - l(b; y)$$

Esta ecuación se puede interpretar que para valores grandes de $\log \lambda$ sugieren que el modelo de interés es una mala descripción de los datos comparado al modelo saturado. Para determinar la región crítica de $\log \lambda$ se necesita su distribución muestral. Es así que, se define el siguiente indicador:

$$D = [l(b_{\text{máx}}; y) - l(b; y)] \quad (2.12)$$

Dicho indicador es la Devianza y fue llamado así por Nelder y Wedderburn (1972) [Nelder and Wedderburn, 1972]. También se le conoce como Log Likelihood Ratio Statistic (Estadístico del Logaritmo de la Razón de Verosimilitud). Este estadístico sigue una distribución chi-cuadrado con $m - p$ grados de libertad (χ_{m-p}^2), donde m es el número de parámetros en el modelo saturado y p es el número de parámetros del modelo de interés.

2.5.5. Significancia del Modelo

1. Prueba de Razón de Verosimilitud

Prueba utilizada para evaluar la significación global del modelo. Es decir, el valor del estadístico se emplea para el contraste de la hipótesis nula de que todos los coeficientes de la ecuación, excepto la constante son nulos.

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ al menos para una } j.$$

Si se denota por $L(MV)$ la función de verosimilitud para el modelo planteado, y se denota por $L(R)$ la función de verosimilitud para el modelo restringido o nulo, el cual únicamente considera al término independiente o constante. Entonces, se define el Estadístico de Razón de Verosimilitud (Likelihood Ratio Statistic) como [Salas Velasco, 1996]:

$$LRT = -2 \left[\frac{L(R)}{L(MV)} \right] = -2 \{Ln[L(R)] - Ln[L(MV)]\} = \{-2Ln[L(R)]\} - \{-2Ln[L(MV)]\} \quad (2.13)$$

Este estadístico sigue una distribución chi-cuadrado con p grados de libertad (χ_p^2), donde p es el número de parámetros incluidos en el modelo planteado, los cuales han sido estimados por máxima verosimilitud. Además, la hipótesis nula se rechaza si el valor del estadístico de la razón de verosimilitud excede el valor crítico ($LRT > \chi_{\alpha,p}^2$).

2. Prueba de Wald

Esta prueba permite contrastar el valor de un coeficiente. Esto es, responder a la siguiente pregunta: ¿Se dispone de suficiente evidencia muestral para afirmar que la variable X_j es relevante en el modelo? Entonces, si el coeficiente β_j se eliminase la influencia de X_j desaparecería, lo

que lleva a plantear el siguiente contraste de hipótesis:

$$H_0 : \beta_j = 0 \text{ (} X_j \text{ no influye)}$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ (} X_j \text{ sí influye)}$$

Para llevar a cabo la prueba de Wald se debe considerar el estadístico de Wald para la variable a evaluar X_j , el cual viene expresado como:

$$W_j = \frac{\hat{\beta}_j}{\hat{S}_{\beta_j}} \quad (2.14)$$

Donde $\hat{\beta}_j$ y \hat{S}_{β_j} son las estimaciones máximo verosímiles de β_j y su correspondiente desviación estándar. Además, se verifica que W_j se distribuye como una $N(0,1)$ o lo que es equivalente decir que $(W_j)^2$ se distribuya como una χ_1^2 . Dicha distribución del estadístico de Wald permite determinar el rechazo o no de la hipótesis nula planteada sobre el j -ésimo parámetro a un nivel de confianza.

2.5.6. Estrategias de Modelización

La modelización consiste en tener estrategias para encontrar el mejor subconjunto de variables predictoras, dado que resulta computacionalmente costoso enumerar todos los posibles modelos que se pueden definir con las variables predictoras de interés. Para esto, se tienen las siguientes técnicas secuenciales:

- (a) **Selección hacia adelante (Forward)**, en cada etapa del proceso se añade una variable predictora aún no seleccionada.
- (b) **Eliminación hacia atrás (Backward)**, se inicia considerando el conjunto completo de variables y en cada etapa del proceso se va eliminando la variable relevante hasta que se obtenga el modelo adecuado.
- (c) **Selección paso a paso (Stepwise)**, es una combinación de las técnicas anteriores.

2.5.7. Criterios de Selección del Modelo

1. Criterio de Información de Akaike (AIC)

Criterio basado en la información estadística, cuya idea principal es la de penalizar un exceso de parámetros ajustados. Está definido como:

$$AIC(p) = -2\ln L[\hat{\theta}(p)] + 2(p) \quad (2.15)$$

Donde $\ln L[\theta(p)]$ es el logaritmo de la función de verosimilitud de los datos, $\hat{\theta}(p)$ es el estimador máximo verosímil del vector de parámetros θ y p es el número de parámetros. De esta manera, se puede interpretar el primer término de AIC como una medida de bondad de ajuste, mientras que el segundo término es la penalización por la cantidad de parámetros, el cual crece a medida que se aumenta el número de parámetros, según el Principio de Parsimonia. Por lo tanto, a menor valor de AIC, mejor será el ajuste del modelo.

2. Criterio de Información Bayesiana (BIC)

Este criterio es muy similar al AIC, pero adicionalmente incorpora en la penalización el número n de observaciones. Se define como:

$$BIC(p) = -2\ln L[\hat{\theta}(p)] + [\ln(n)]p \quad (2.16)$$

Donde $\ln L[\theta(p)]$ es el logaritmo de la función de verosimilitud de las observaciones, $\hat{\theta}(p)$ es el estimador máximo verosímil del vector de parámetros θ , p es el número de parámetros y n es el tamaño muestral. Del mismo modo que el AIC, menores valores de BIC indican una mejor explicación de los datos con el mínimo número de parámetros.

3. Devianza Explicada

Es una medida relacionada a la variabilidad que no es explicada por el modelo, la cual se obtiene por medio de una comparación de la devianza del modelo nulo con la devianza residual. Es un estadístico similar al coeficiente de determinación empleado en la regresión lineal, llamado

también pseudo R^2 [Dobson, 2002] y definido como sigue:

$$\text{Devianza Explicada} = \frac{\text{Devianza Nula} - \text{Devianza Residual}}{\text{Devianza Nula}} \times 100 \quad (2.17)$$

2.5.8. Capacidad Predictiva del Modelo

Una forma de presentar los resultados de un modelo de regresión logística ajustado es a través de una tabla de clasificación. Esta tabla es resultado de una clasificación cruzada de la variable respuesta Y , con una variable dicotómica cuyos valores son derivados de las probabilidades logísticas estimadas $\hat{\pi}$.

Para obtener la variable dicotómica derivada se debe definir un punto de corte, c , y comparar cada probabilidad estimada con este valor. Es decir, si la probabilidad estimada excede c entonces la variable derivada toma el valor de 1. caso contrario dicha variable se iguala a 0. El valor más común que toma c es 0.5.

Estimado \ Observado	Y=0	Y=1	Total
$\hat{p}_i < c$	n_{00}	n_{01}	$n_{00} + n_{01}$
$\hat{p}_i \geq c$	n_{10}	n_{11}	$n_{10} + n_{11}$
Total	$n_{00} + n_{10}$	$n_{01} + n_{11}$	N

Cuadro 2.1: Tabla de Clasificación basada en el Modelo de Regresión Logística

En la tabla anterior se muestra la distribución de las predicciones para cada una de las dos categorías. En donde, la proporción de observaciones correctamente clasificadas está dada por:

$$\frac{n_{00} + n_{11}}{N} \quad (2.18)$$

De este modo, el modelo de regresión logística proporciona una función discriminante que se puede usar para clasificar los valores desconocidos.

2.5.9. Análisis de Residuales

Existen dos maneras principales de analizar los residuales en Regresión Logística, correspondientes a las medidas de bondad de ajuste D y X^2 [Dobson, 2002].

1. Residuales de Pearson

Este residual proporciona la diferencia entre los valores observados y ajustados dividido por la estimación de la desviación estándar de los valores observados. El residual de Pearson está definido como:

$$r_p = \frac{y_i - \hat{\mu}_i}{\sqrt{V(\hat{\mu}_i)}} \quad (2.19)$$

Donde $\hat{\mu}_i$ es el valor ajustado y $V(\hat{\mu}_i)$ es la varianza de dicho valor.

2. Residuales de Devianza

El residual de devianza se puede emplear para determinar si los puntos individuales se encuentran correctamente ajustados por el modelo. Para la i -ésima observación, se tiene:

$$r_i^D = \sqrt{d_i} \text{signo}(y_i - \hat{\mu}_i) \quad (2.20)$$

Donde d_i es el componente i -ésimo de la devianza, $\hat{\mu}_i$ es el valor ajustado y $\sum (r_i^D)^2 = D$.

Capítulo 3

Metodología

En el presente capítulo se detallan los aspectos metodológicos considerados para la realización del estudio, tales como la naturaleza de los datos, tipo de estudio, los sujetos de estudio, el pre-procesamiento de los datos, el procesamiento de los datos, entre otros.

3.1. Diseño de Investigación

3.1.1. Tipo de Estudio

El estudio es de tipo Predictivo-Correlacional, pues se desea predecir el éxito del buceo realizado por el lobo fino; es decir, si es un buceo donde hubo eventos de alimentación, en base a ciertas características propias del buceo.

3.1.2. Área de Estudio

Los datos utilizados en esta investigación provienen de la colonia de lobos marinos finos que se encuentran en Punta San Juan ($15^{\circ}22.037'S$; $75^{\circ}11,155'W$), ubicada en la costa sur de Perú (Fig. 3.1).

3.1.3. Sujetos de estudio

Los sujetos de estudio son los Lobos Marinos Finos Sudamericanos, los cuales presentan las siguientes características.

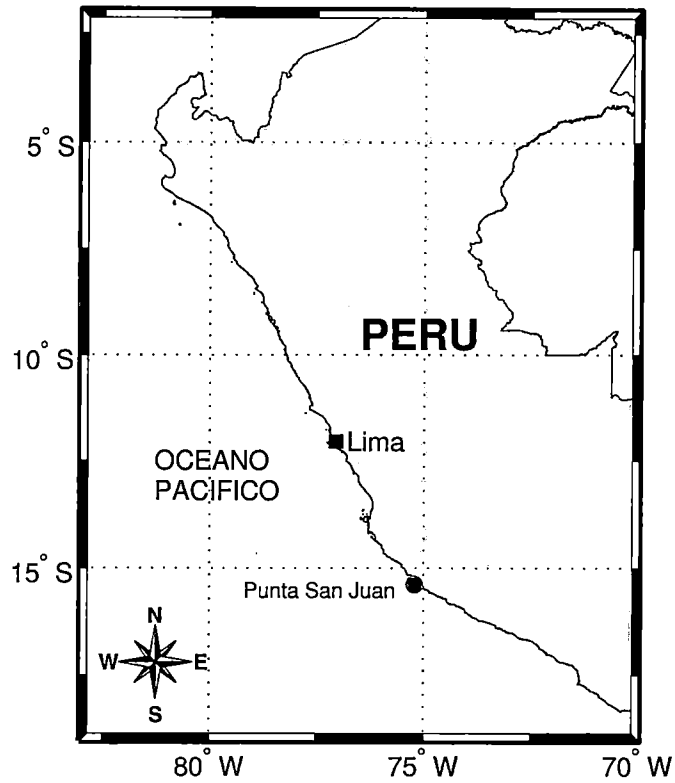


Figura 3.1: Ubicación de Punta San Juan

(a) **Clasificación Taxonómica**

Los Lobos Marinos Finos Sudamericanos son depredadores marinos superiores y están clasificados de la siguiente manera:

Clase	Mammalia
Orden	Carnivora
Sub-Orden	Pinnipedia
Familia	Otariidae
Especie	<i>Arctocephalus Australis</i> (Zimmermann, 1783)
Nombre Común	Lobo fino sudamericano, Lobo marino de dos pelos, Lobo fino austral.

(b) **Distribución**

Los lobos finos sudamericanos se encuentran distribuidos desde Río de Janeiro (Brasil) hasta la parte sur de Perú, bordeando el extremo del continente e incluyendo las Islas Malvinas

(Fig. 3.2). En el Perú, la población de lobos finos se concentra en tres grandes colonias: Paracas ($13^{\circ}54'S$), San Fernando ($15^{\circ}09'S$) y Punta San Juan ($15^{\circ}22'S$) [Majluf and Trillmich, 1981].

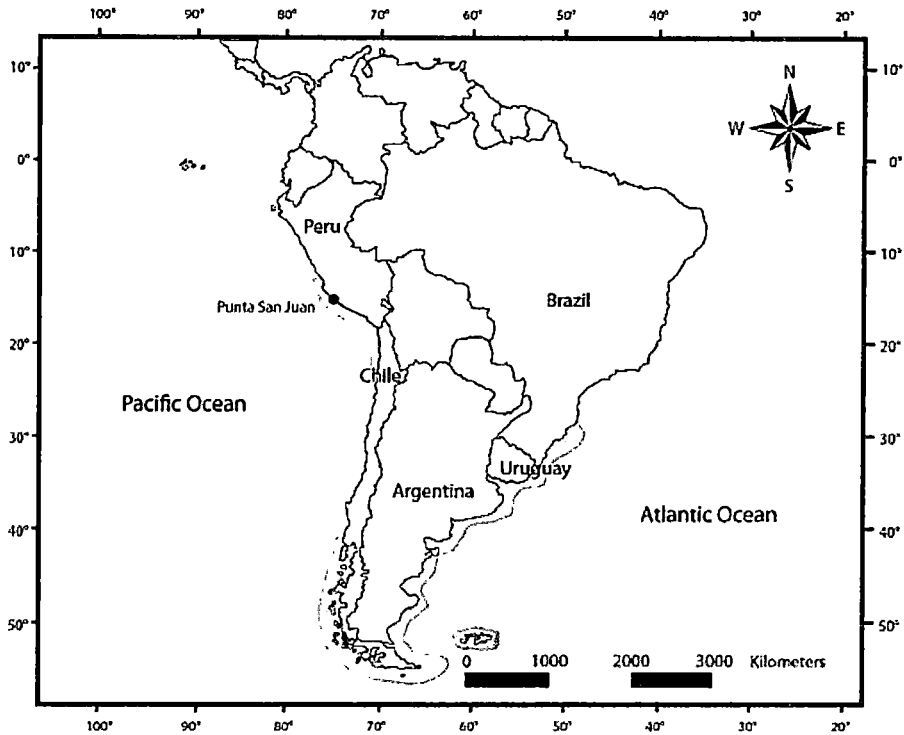


Figura 3.2: Distribución de Lobos Marinos Finos Sudamericanos (sombreado en gris).
Fuente: Prey Abundance and Population Dynamics of South American Fur Seal (*Arctocephalus Australis*) in Peru [Cárdenas-Alayza, 2012].

(c) Tamaño y Peso

Estos animales presentan un notable dimorfismo sexual. Los machos adultos son aproximadamente 1.3 veces más grandes y 3.3 veces más pesados que las hembras adultas [Jefferson et al., 2011]. En el Perú, las lobas marinas finas tienen un tamaño alrededor de 1.4 m de longitud y pueden alcanzar los 90 kg (Peso promedio de 60 kg). En el caso de los machos, no existen registros para Perú. No obstante, en Uruguay, llegan a medir una longitud de 1.8 m y un peso de hasta 200 kg [Majluf, 1987]. Además, los recién nacidos miden entre 60 y 65 cm y pueden pesar de 3.5 a 5.5 kg [Jefferson et al., 1993].

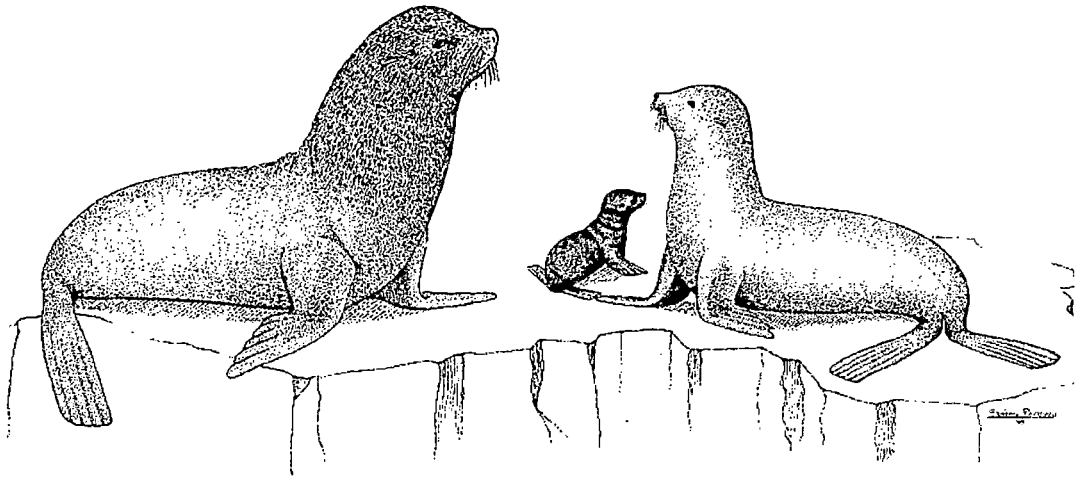


Figura 3.3: *Arctocephalus Australis*.

Fuente: La Vida entre Mareas [Rodríguez and Bastida, 2004]

(d) **Alimentación**

El principal alimento de esta especie en el Perú es la anchoveta *Engraulis ringens* adulta, la cual es ecológicamente y económicamente la especie de pez pelágico más importante en el Sistema de la Corriente de Humboldt [Espinoza and Bertrand, 2008]. Sin embargo, en periodos de escasez se pueden alimentar de otros pequeños peces pelágicos y crustáceos. Por su parte, los lobos marinos juveniles se alimentan de pequeños peces bentónicos mientras aprenden a forrajear [Majluf, 1989, Majluf and Reyes, 1989]. Generalmente, los lobos marinos finos comen exclusivamente en las noches siguiendo las migraciones verticales de la anchoveta [Mathisen, 1989].

(e) **Ecología y Comportamiento**

Los lobos marinos pasan su tiempo tanto en tierra como en el mar; además tienen una reproducción estacional y son polígamos. Los machos se aparean con más de una hembra cada período de cría [DelGreco, 2013]. El tamaño de los harenes oscila entre 1 y 13 hembras, aunque en promedio se acercan a 5-6 hembras por macho territorial. En Perú, estos mamíferos marinos se reproducen entre mediados del mes de octubre hasta mediados de diciembre.

(f) Amenazas y Situación Actual

Actualmente esta especie se encuentra protegida legalmente en casi toda el área de su distribución, habiéndose establecido prohibición de capturas en las Islas Malvinas (1921), Argentina continental (1937), Perú (1959) y Chile (1978) [Rodríguez and Bastida, 2004].

3.1.4. Población y Muestra

La población de estudio son las características de forrajeo y de buceo de los lobos marinos pertenecientes a la colonia en Punta San Juan. Mientras que, la muestra son las características de forrajeo y de buceo de la loba marina a la cual se le equipó con los dos acelerómetros (uno en la cabeza y otro en la espalda) y un grabador de buceos (TDR).

3.2. Operacionalización de las Variables

Dado que el objetivo de la tesis es conocer la probabilidad de éxito del buceo realizado por la loba marina, se necesita estudiar tanto el movimiento que realiza el animal para obtener la presa, como las características que presenta el buceo que realiza. De este modo, se detalla, a continuación, la operacionalización de los factores mencionados.

3.2.1. Movimiento en el Buceo

El forrajeo en los lobos marinos y, en general, en los animales involucra realizar diversos movimientos en la búsqueda, captura y consumo de la presa. Estos movimientos se realizan a diferentes velocidades, y por ende a diferentes aceleraciones a través del tiempo.

Variable	Dimensión	Indicador	Escala	Valor
Movimiento	Movimiento Longitudinal	Aceleración eje X	Razón	$[-8g, +8g]$
	Movimiento Lateral	Aceleración eje Y	Razón	$[-8g, +8g]$
	Movimiento Vertical	Aceleración eje Z	Razón	$[-8g, +8g]$

Cuadro 3.1: Operacionalización del Movimiento en el Buceo

3.2.2. Perfil del Buceo

El buceo es el medio por el cual los lobos marinos, así como muchos otros depredadores marinos superiores, forrajean. Es por eso, que el estudio de sus características es importante a la hora de determinar su éxito; es decir, si hubo intento de captura de presa.

De este modo, dicho comportamiento se puede describir considerando; primero, aspectos esenciales de su realización; y segundo, en base a las fases que presenta como son el descenso, el fondo, el ascenso y la recuperación. Estas fases quedan determinadas dado que el lobo marino es un animal que mantiene la respiración al bucear, pues no es un animal capaz de respirar bajo el agua. Entonces, debe decidir hasta que profundidad bajar, y dependiendo de su desgaste necesita un periodo de recuperación hasta volver a descender en busca de más alimento.

- (a) Realización: La actividad de bucear se realiza en diferentes momentos del día, dependiendo de la necesidad y naturaleza de los animales. La cantidad que dura el buceo, implica una decisión hecha por el animal basado en su estado físico, ya que estos animales no respiran bajo el agua. Además, según lo que hayan logrado en el buceo anterior, deben decidir si sería adecuado o no bucear en la misma zona para conseguir la presa.
- (b) Comportamiento en el Descenso: El descenso se caracteriza principalmente por su duración, por la velocidad con la que el animal desciende y por los movimientos en forma de zigzag que pudiera realizar.
- (c) Comportamiento en el Fondo: El fondo es la fase más importante del buceo, pues es aquí donde, generalmente, el lobo marino obtiene su alimento. Es por eso, que adicionalmente al tiempo de duración y al número de zigzags, se debe considerar otros indicadores de la variabilidad de su comportamiento como son la profundidad máxima alcanzada, la diferencia entre la profundidad mínima y máxima originadas debido a los zigzags en esta fase, y la suma positiva de las diferentes profundidades alcanzadas durante su estadía en el fondo del buceo.

- (d) Comportamiento en el Ascenso: El ascenso, al igual que el descenso, presenta características similares como la duración, la velocidad y el número de zigzags que puede realizar el animal al subir.
- (e) Recuperación: Es el tiempo empleado para descansar luego de haber buceado, con el fin de volver a descender para seguir forrajeando.

Variable	Dimensión	Indicador	Escala	Valor
Realización	Ubicación Temporal	Momento del día	Ordinal	1, 2, ..., 24
	Duración	Duración Total	Razón	[18, 280] seg
	Resultado	Eficiencia	Razón	[0, 1 >
	Zona del buceo	Dentro de la zona anterior	Nominal	0, 1
Comportamiento Descenso	Duración	Duración Descenso	Razón	[3, 132] seg
	Velocidad Vertical	Ratio de Descenso	Razón	[0.1, 2.33]
	Variabilidad	Zigzags en el Descenso	Ordinal	0, 1, 2, 3, 4, 5
Comportamiento Fondo	Duración	Duración Fondo	Razón	[0, 198] seg
	Variabilidad	Profundidad Máxima	Razón	[3, 84] m
		Zigzags en el Fondo	Ordinal	0, 1, 2, ..., 20
		Rango de profundidades	Razón	[0, 25 >
		Distancia Vertical Total	Razón	[0, 85 >
Comportamiento Ascenso	Duración	Duración Ascenso	Razón	[3, 63]
	Velocidad Vertical	Ratio de Ascenso	Razón	[0.25, 2]
	Variabilidad	Zigzags en el Ascenso	Ordinal	0, 1, 2, 3, 4
Recuperación	Duración	Tiempo entre buceos	Razón	[0, 300] seg

Cuadro 3.2: Operacionalización del Perfil del Buceo

3.3. Recolección y Tratamiento de los datos

3.3.1. Recolección de datos

Se realizó un trabajo de campo en Punta San Juan entre los días 16 y 20 de noviembre del 2011. Para la obtención de los datos, se empleó dos pequeños aparatos electrónicos capaces de grabar medidas de aceleración y profundidades en los lobos marinos.

1. Instrumentos

Los instrumentos utilizados fueron el Acelerómetro y el TDR (Time Depth Recorder).

■ Acelerómetro

Aparato electrónico capaz de medir la aceleración hasta en tres direcciones. En este estudio, se utilizó el acelerómetro modelo X8M-3 de la compañía Gulf Coast Data Concepts.

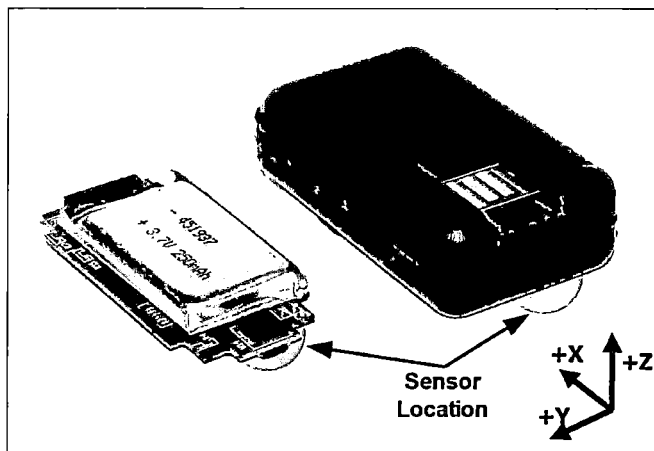


Figura 3.4: Acelerómetro X8M-3

Las principales características de este acelerómetro son su límite de registro de aceleración en los tres ejes de $\pm 8g$, sus diferentes frecuencias de muestreo que el usuario puede seleccionar (6, 12, 25, 50, 100 y 200 Hz), su registro en los tres ejes del magnetómetro y la vida de su batería que puede durar hasta 8 días.

Este acelerómetro se puede usar en diferentes aplicaciones como el monitoreo de la actividad humana, el monitorio diario tanto de la vida de los animales como de sus hábitos de alimentación, para propósitos educativos, entre otros.

- **TDR(Time Depth Recorder)**

Aparato electrónico que mide la profundidad a la cual se encuentra el individuo. Es útil para proporcionar información acerca de los buceos que realizan los animales marinos cuando se les equipa con este instrumento.

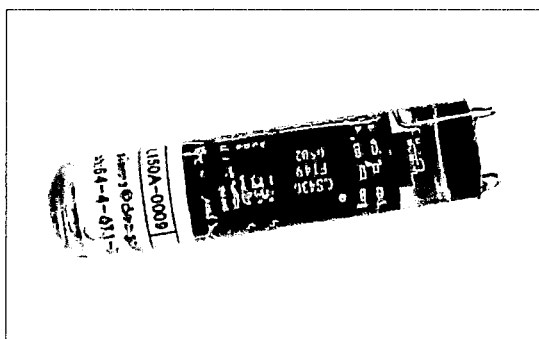


Figura 3.5: Grabador de buceos (Time Depth Recorder)

2. Procedimiento

Las 5 lobas marinas seleccionadas para el estudio, fueron capturadas alrededor del día de dar a luz, siguiendo los procedimientos descritos por Majluf y Goebel [Majluf and Goebel, 1992]. Es así que, la captura involucró coger primero a las crías para luego poder atraer a las madres hasta un lugar adecuado donde se les pueda manipular sin temor a la reacción de los machos, puesto que, las hembras son muy móviles dentro de los territorios de los machos. Una vez que las hembras fueron capturadas, se les pesó con una balanza de resorte colocada sobre un trípode de aluminio y después se las dejó sobre una placa antes de ser anestesiadas (Fig. 3.6 y Fig. 3.7).



Figura 3.6: Peso y traslado de la loba marina.



Figura 3.7: Instrumentación

Estando anestesiadas se les tomó algunas muestras fisiológicas y se les colocó los aparatos electrónicos. A una de ellas se le colocó dos acelerómetros, uno en la cabeza y otro en la espalda, mientras que a las demás, sólo se les colocó en la espalda, todas ellas registrando datos a una frecuencia de 25 Hz (Fig. 3.8a). Además, todas fueron equipadas con un aparato TDR (Time Depth Recorder) para poder registrar las profundidades de buceo a una frecuencia de 1/3 Hz y con un GPS. Sin embargo, los datos obtenidos del GPS no serán utilizados en este

trabajo. Todo el procedimiento tuvo una duración de aproximadamente 40 minutos.

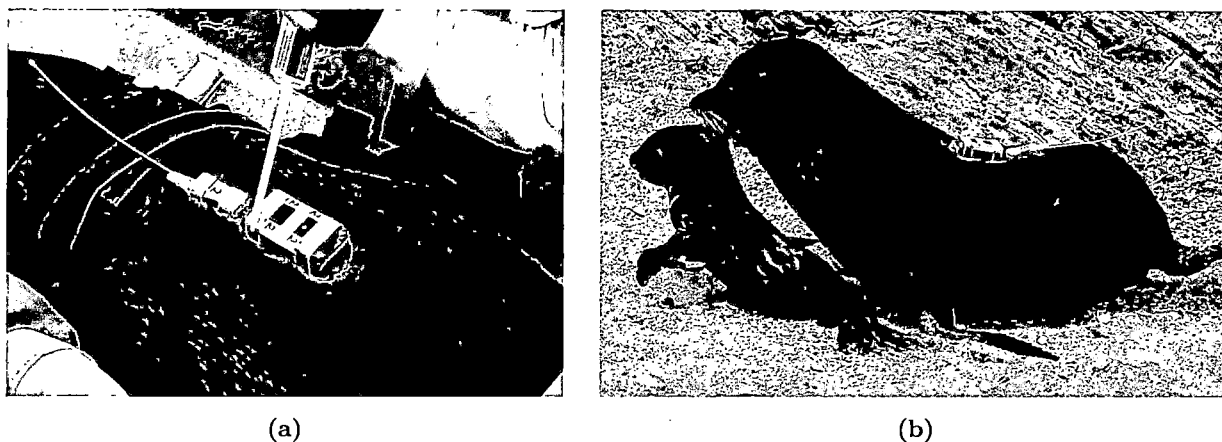


Figura 3.8: (a) Colocación del acelerómetro en la espalda de la Loba Marina. (b) Loba Marina equipada con un acelerómetro y TDR en su espalda.

Cuando las hembras se despertaron, fueron liberadas y colocadas en el mismo lugar que sus crías, y el reencuentro madre-cría fue monitoreado de cerca para asegurarse de que sucedió en buenas condiciones sin interferencias de los machos (Fig. 3.8b).

3. Obtención de Datos

Después de que las lobas marinas realizaron algunos viajes de alimentación en el mar, éstas fueron recapturadas, los aparatos fueron sacados de los animales y los datos se descargaron de la memoria interna del grabador hacia una computadora.

3.3.2. Pre-Procesamiento de los Datos

Los datos para este estudio provienen del registro de dos aparatos electrónicos, los cuales son el Acelerómetro y el TDR.

1. Datos de los acelerómetros

La información obtenida de los acelerómetros necesitó ser tratada antes de analizarla, pues la base de datos contaba con caracteres extraños, los cuales no podían ser leídos a la hora de estandarizar los formatos de los ficheros. Para esto, se utilizó un software llamado *Coarse*

Time Converter proporcionado por la compañía de la cual se adquirió los acelerómetros. Sin embargo, luego de utilizar este software se siguió contando con algunos datos sucios; por ello, se generó un algoritmo en Matlab que fue capaz de detectar estos inconvenientes y poder reemplazarlos con datos interpolados de manera lineal.

Posteriormente, los datos fueron convertidos a las unidades reales g ($1g = 9.81ms^{-2}$) según las especificaciones del acelerómetro. El valor de conversión para los tres ejes es de 1024; es decir, hay 1024 conteos por g .

Por último, todos los archivos se estandarizaron utilizando el Software Matlab, de donde se obtuvo ficheros *.mat con las siguientes variables:

Variable	Descripción
time	Instante de tiempo
Ax	Aceleración registrada en el eje X
Ay	Aceleración registrada en el eje Y
Az	Aceleración registrada en el eje Z

2. Datos del TDR

La información registrada por el TDR se estandarizó en el Software Matlab, y se generó un fichero .mat con dos variables:

Variable	Descripción
time	Instante de tiempo
depth	Profundidad en metros correspondiente al tiempo

Adicionalmente, se procesó esta información mediante un programa de análisis de buceos llamado IKNOS Toolbox (Y. Tremblay no publicado), el cual generó medidas cuantitativas de diversos parámetros para cada buceo registrado.

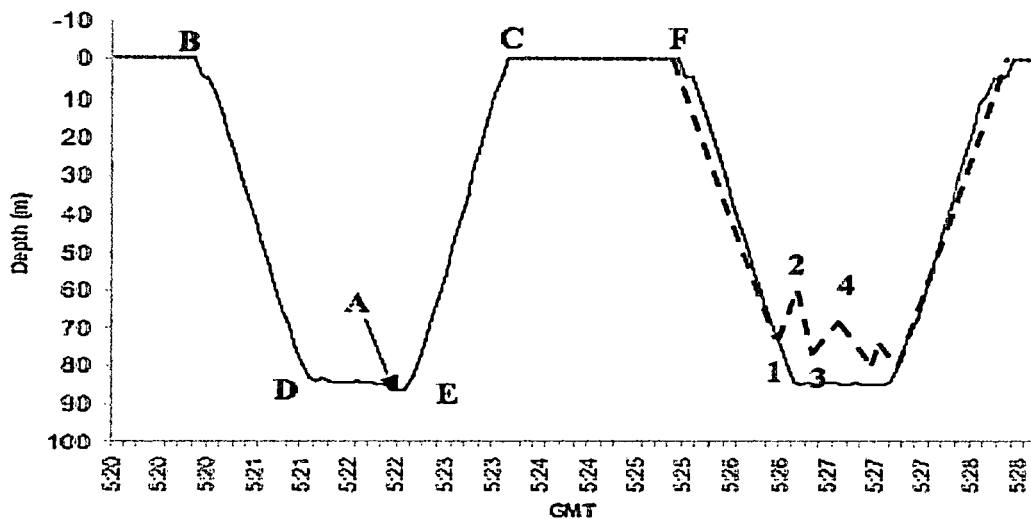


Figura 3.9: Ejemplo del perfil de un buceo.

- Profundidad Máxima: Punto A, medida en metros.
- Duración del buceo: Tiempo transcurrido en segundos desde B hasta C.
- Tiempo en el fondo: Tiempo transcurrido en segundos desde D hasta E.
- Tiempo de descenso: Tiempo transcurrido desde B hasta D.
- Ratio de descenso: Velocidad vertical en el tramo B-D, medida en m/s.
- Tiempo de ascenso (s): Tiempo transcurrido desde E hasta C.
- Ratio de ascenso: Velocidad vertical en el tramo E-C, medida en m/s.
- PDI (Post Dive Interval): Intervalo de tiempo entre buceos (Tramo C-F).
- Zigzags (Wiggles): Puntos de inflexión en el buceo. Estos pueden ocurrir durante el descenso, en el fondo y durante el ascenso. En la Fig. 3.9 se muestran los zigzags en el fondo.
- Eficiencia: Tiempo transcurrido en el fondo con respecto a la duración del ciclo del buceo (Tramo B-F).
- Rango en el fondo: Diferencia máxima de profundidades en el fondo del buceo (Tramo D-E).
- Distancia Total Vertical del fondo: Suma total de las diferencias de las profundidades alcanzadas en el fondo del buceo.

- IDZ (Intra Depth Zone): Zona de profundidad del buceo anterior.

3.3.3. Procesamiento de los Datos

1. Medidas de Aceleración Inconsistentes

Se pudo identificar valores de aceleración inconsistentes, puesto que estos valores eran demasiados grandes o bajos con respecto a los límites de -8g hasta 8g, según especificaciones del registro del acelerómetro.

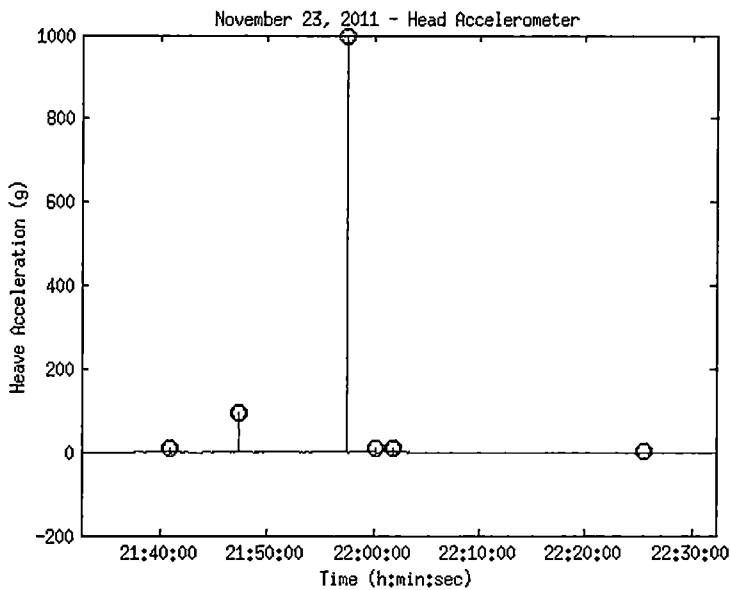


Figura 3.10: Valores inconsistentes de aceleración marcados en rojo.

2. Medidas de Aceleración Atípicas

Se pudo detectar datos atípicos locales, mediante la comparación entre un punto con respecto a su vecindad (Fig. 3.11). Esta diferencia se cuantificó por medio de un índice, al que llamamos h y presenta la siguiente forma:

$$h(x_i) = x_i - \text{Mediana}(NN_k(x_i)) \quad (3.1)$$

Donde x_i es el valor de la aceleración y $NN_k(x_i) = x_{i-k}, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_{i+k}$ denota los k

vecinos más cercanos al punto x_i .

Para evaluar si el punto es atípico se estableció una área de tolerancia determinada por las siguientes rectas:

$$L_1 : x = 5$$

$$L_2 : \frac{P_{(NN_k(x_i), 0.99)}}{3.5} |h(x_i) - 1.5|$$

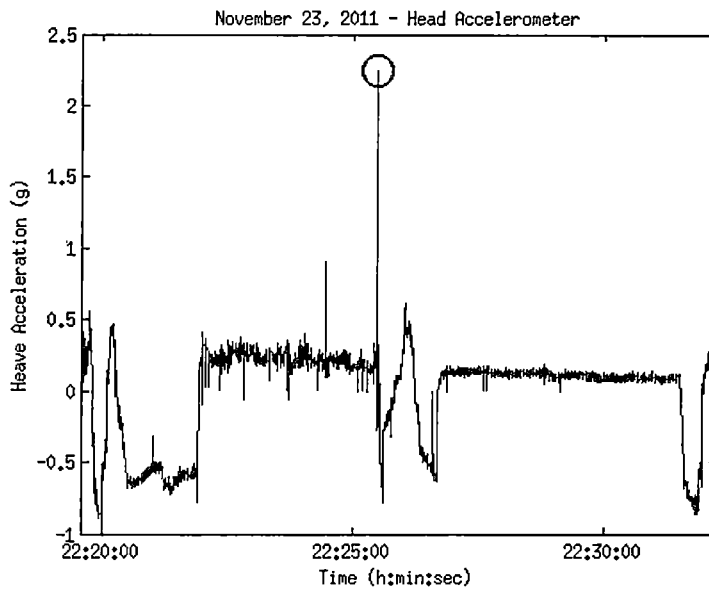


Figura 3.11: Dato atípico de aceleración marcado en verde.

Entonces, si el punto está afuera del área de tolerancia es un punto atípico. Cabe mencionar, que la tolerancia es menos rígida cuando existe altas variaciones entre los vecinos. En este caso, la metodología acepta un índice máximo de 5g.

Como se puede ver en la figura 3.12 los valores señalados con círculos verde tienen valores pequeños de variancias de sus vecindades, por lo que deberían tener valores pequeños del índice h indicando la similitud con su vecindad. Sin embargo, estos puntos tienen valores grandes del indicador h . Por lo tanto, estos puntos son considerados datos atípicos.

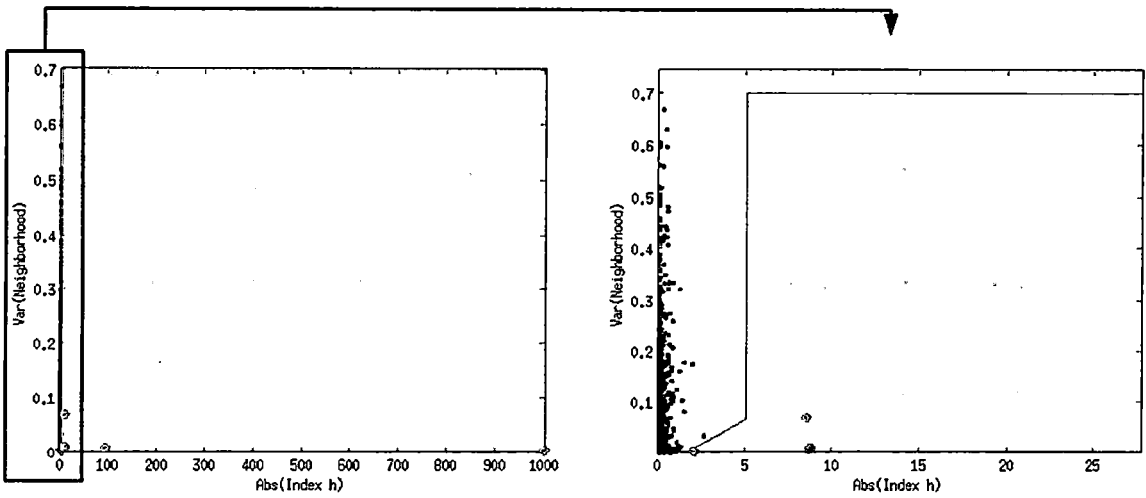


Figura 3.12: El área de tolerancia está delimitada por las líneas de color rojo y lo sombreado representa la región fuera de estos límites. Los puntos de color verde son los datos atípicos detectados que caen fuera del área de tolerancia.

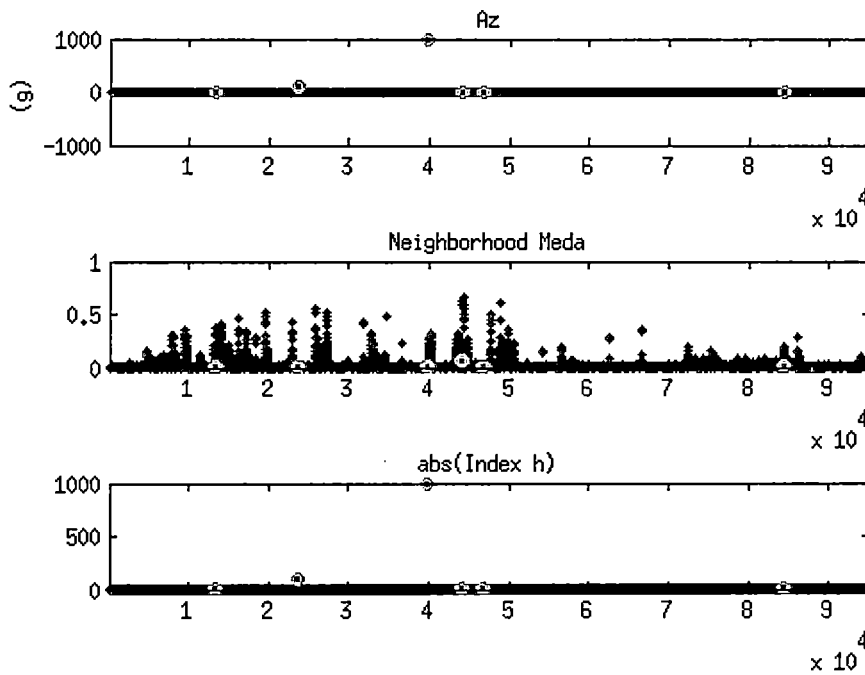


Figura 3.13: Los datos atípicos marcados de color verde en la señal de aceleración, en los valores de la mediana de la vecindad y en los valores del indicador h, respectivamente.

En resumen, el procedimiento del algoritmo realizado en el Software Matlab es el siguiente:

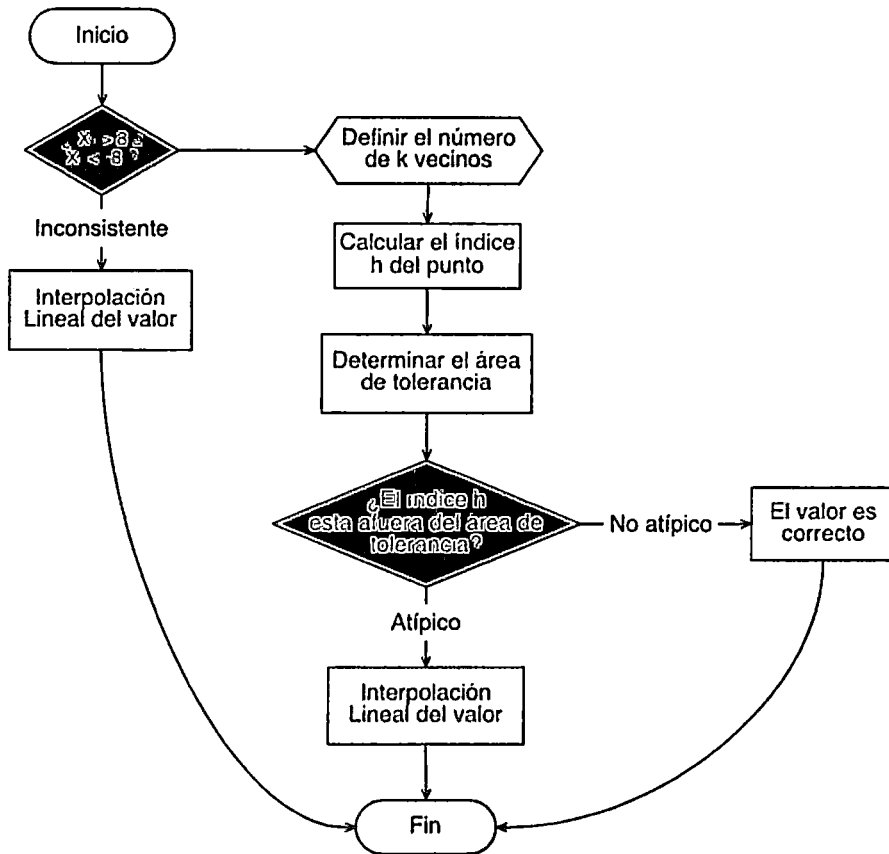


Figura 3.14: Diagrama del algoritmo general de limpieza de datos

3.4. Metodología de Análisis

Con los datos ya procesados, se continúa con el análisis exploratorio de los mismos con el objetivo de tener una idea global del comportamiento de las variables de interés. Luego, se pasa a identificar los intentos de captura de presa en las señales de aceleración, para posteriormente identificar los buceos exitosos.

3.4.1. Identificación de intentos de captura de presa

Los eventos de captura de presa se pueden identificar como señales de aceleración de alta frecuencia, luego de realizar un filtro de pase alto (high pass filter) a la señal original [Suzuki et al., 2009]. De este modo, el proceso de identificación de eventos de comida en los datos de aceleración presenta los siguientes 5 pasos:

- (1) Como se cuenta con datos de aceleración en tres ejes, se calcula una única señal de aceleración, la cual es la aceleración vectorial, calculada como:

$$A_{vec} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

- (2) A la señal de aceleración vectorial resultante se le aplica una transformada wavelet continua y se analiza su comportamiento espectral, con el fin de determinar la amplitud a la cual se debe filtrar la señal, que es alrededor de 3Hz.
- (3) Se reconstruye la señal considerando solo un conjunto de escalas, lo que remueve el ruido de la señal correspondiente a otros movimientos diferentes a la captura de presa.
- (4) Se calcula la varianza de la señal filtrada en base a una ventana móvil aproximada de 1.5 segundos para resaltar las aceleraciones extremas.
- (5) Se determina el límite que identifique si las aceleraciones extremas encontradas están relacionadas a intento de captura de presa. Para determinar dicho valor se realiza una curva de supervivencia, determinada por el número de eventos detectados versus varios límites, siendo finalmente el valor del límite el punto de quiebre de la curva.

3.4.2. Cálculo de la Variable Dependiente

Una vez identificados los eventos de intento de captura de presa en las señales de aceleración, se debe contabilizarlos por buceo. En base a esto, se crea una variable dependiente categórica, la cual posee valor 1 en aquellos buceos con intentos de captura de presa, y valor 0 en los buceos sin intentos de captura de presa.

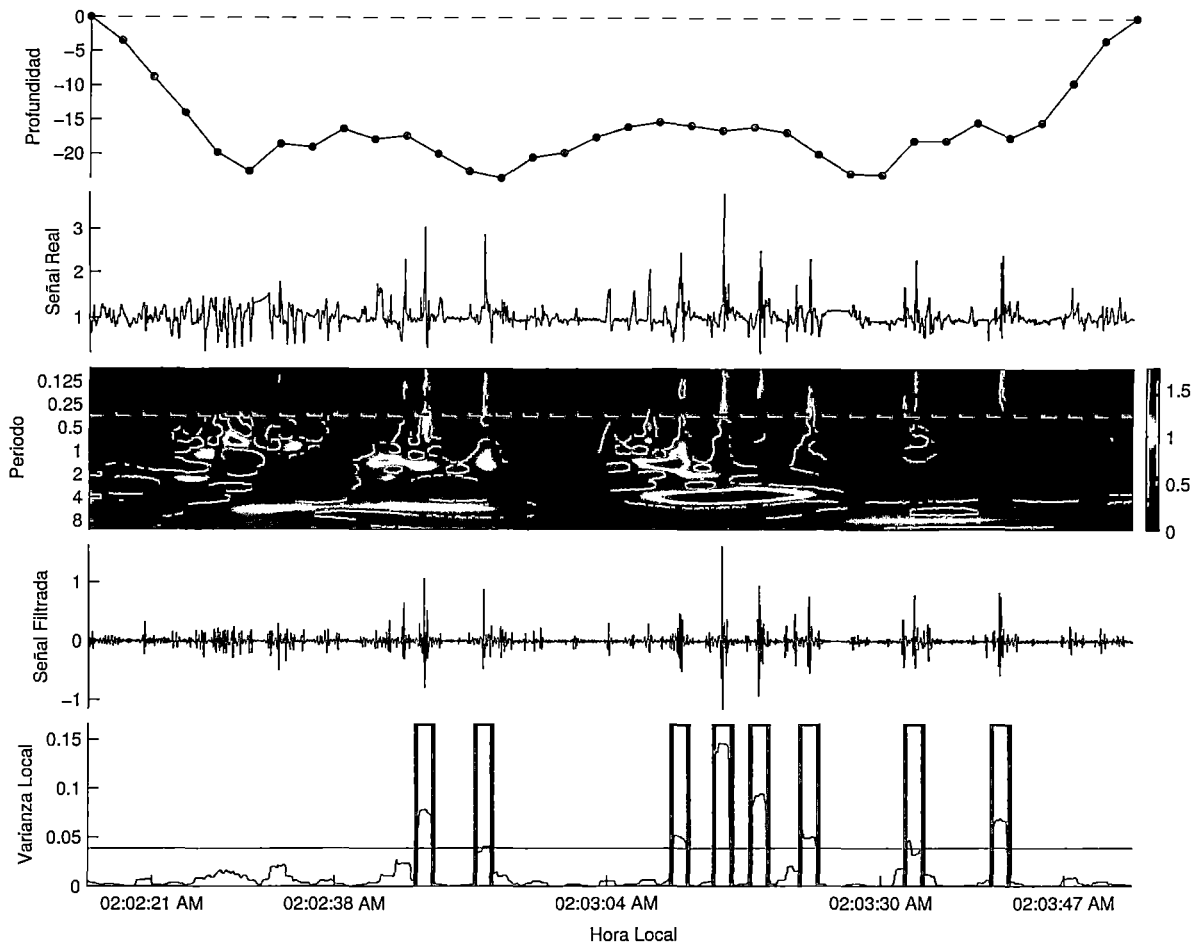


Figura 3.15: (a) Perfil de un buceo. (b) Aceleración vectorial correspondiente al buceo calculada de los datos del acelerómetro colocado en la cabeza. (c) Comportamiento Espectral de la señal de aceleración para estudiar su amplitud y periodicidad. La línea punteada corresponde a un periodo de 0.3 segundos (3 Hz). Donde se puede notar que en ciclos de 0.3 segundos y aquellos que duran menos presentan valores altos de amplitud (indicados en el gráfico por los colores más claros como verde, amarillo y rojo). (d) Señal de aceleración luego de realizar un filtro de paso alto de 3 Hz. Aquí, ya se puede distinguir algunos posibles eventos de comida. (e) Identificación de 8 posibles intentos de captura de presa mediante el cálculo de la varianza local considerando una ventana móvil de 1.5 segundos. La línea roja representa el límite considerado para la detección que toma el valor de 0.039.

3.4.3. Modelamiento de la predicción del éxito del buceo

Con la variable dependiente calculada y las variables que caracterizan el comportamiento del buceo, se realiza una regresión logística, obteniéndose un modelo capaz de predecir el éxito del buceo. Cabe resaltar, que la modelación se realiza tanto para la variable dependiente determinada por el acelerómetro de la cabeza como para la variable dependiente proveniente del acelerómetro de la espalda.

En general, el siguiente esquema resume los pasos a seguir en el análisis:

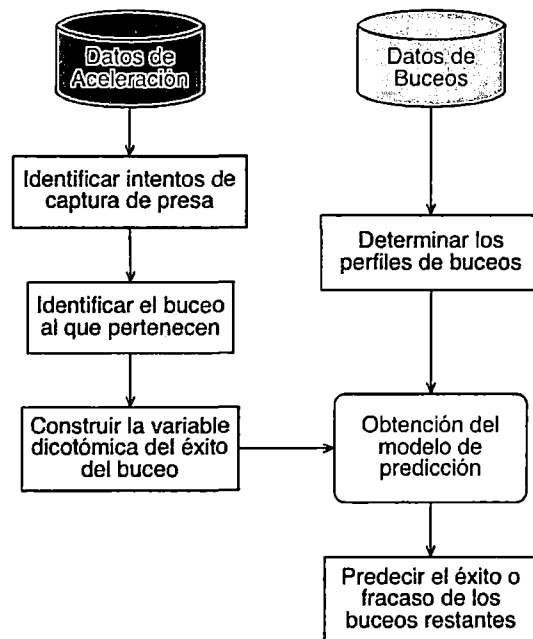


Figura 3.16: Esquema general del análisis a seguir en el trabajo de investigación

Capítulo 4

Resultados

4.1. Perfil General de los Buceos

El tiempo total de registro para la loba marina fue de 451 h, intervalo en el cual realizó 5111 buceos. Sin embargo, para este trabajo, solo se considera los primeros 591 buceos, debido a que solamente contamos con datos de aceleración para las primeras 107.9 h y 106.6 h, de los acelerómetros de la cabeza y espalda respectivamente.

Este periodo de tiempo involucra 2 viajes de alimentación, en donde la loba marina realiza 262 buceos en el primer viaje y 329 buceos en el segundo viaje. Es así que, analizando los 591 buceos de manera general, la duración promedio fue de 101.3 ± 4.19 segundos y la duración máxima de 279 segundos. Por otro lado, la profundidad máxima promedio fue de 21.3 ± 0.95 m y lo máximo alcanzado de profundidad fue de 84 m. Además, el tiempo de estancia en el fondo de los buceos fue en promedio de 63.9 ± 3.68 segundos, y como máximo fue de 198 segundos. El cuadro 4.1 muestra el resumen de algunas características de los buceos para los dos viajes de alimentación.

Viaje	1	2
Duración Promedio (seg)	128.12 ± 6.62	79.96 ± 4.12
Duración Máxima (seg)	279	198
Duración Promedio en el fondo (seg)	88.02 ± 5.82	44.61 ± 3.54
Duración Promedio entre buceos (seg)	40.24 ± 5.16	25.50 ± 2.53
Profundidad Promedio (m)	23.14 ± 1.65	19.75 ± 0.78
Profundidad Máxima (m)	84	61
Ratio de Descenso Promedio (m/s)	0.83 ± 0.04	0.86 ± 0.03
Ratio de Ascenso Promedio (m/s)	1.16 ± 0.05	1.06 ± 0.03

* Los promedios son Media ± Error Estándar.

Cuadro 4.1: Principales características de los buceos.

Además, se puede notar que existen dos picos en diferentes horas donde la loba marina realizó más buceos. Éstos son alrededor de las 22 horas por la noche y de las 3 de la mañana (Fig.4.1).

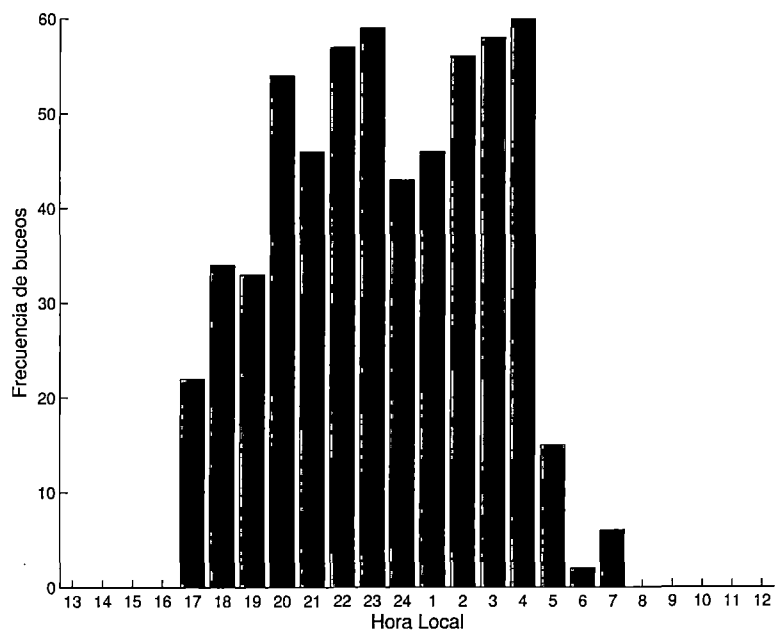


Figura 4.1: Distribución de los buceos por hora

4.2. Ocurrencia de Intentos de Captura de Presa

Al evaluar los perfiles de aceleración, se encontró 666 intentos de captura de presa con los datos del acelerómetro colocado en la cabeza (Tabla.4.2). Mientras que, con el acelerómetro de la espalda, se encontró 326 intentos de captura de presa (Tabla.4.3).

Fase del buceo	Número de Intentos de Captura de Presa	Porcentaje
Descenso	156	23.4 %
Fondo	399	59.9 %
Ascenso	111	16.7 %

Cuadro 4.2: Intentos de captura de presa según el acelerómetro en la cabeza

Fase del buceo	Número de Intentos de Captura de Presa	Porcentaje
Descenso	76	23.3 %
Fondo	153	46.9 %
Ascenso	97	29.8 %

Cuadro 4.3: Intentos de captura de presa según el acelerómetro en la espalda

Además, entre 0 y 8 intentos de captura de presa ocurrieron en los buceos, según ambos acelerómetros. Principalmente, los posibles eventos de captura de presa tuvieron lugar en el fondo del buceo y la mayoría de ellos ocurrieron a una profundidad máxima aproximada de 20-40 metros, de acuerdo a los dos acelerómetros (Fig.4.2).

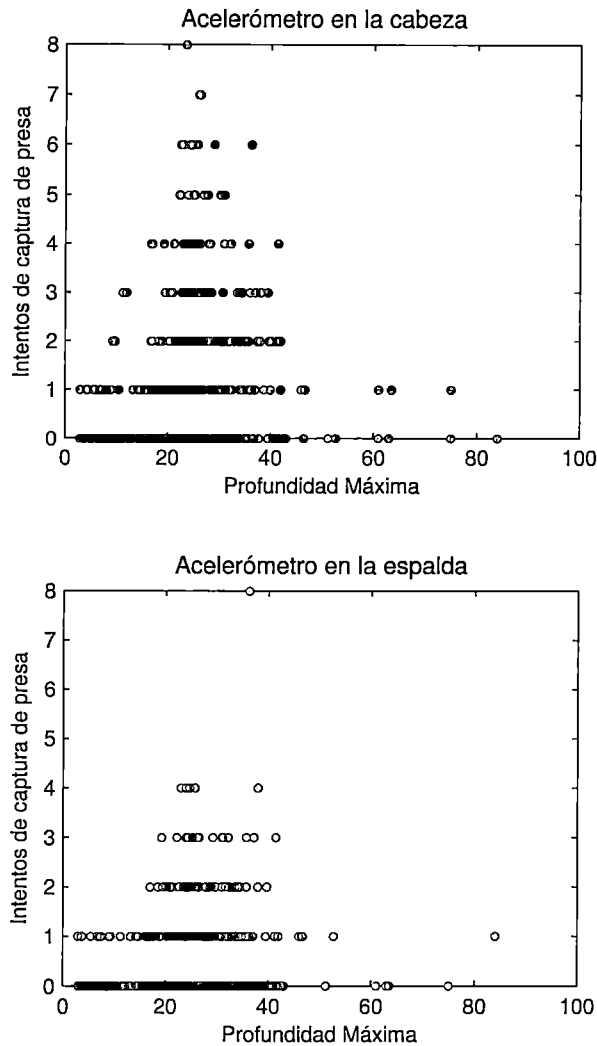


Figura 4.2: Relación de la profundidad con los intentos de comida por buceo.

Como se ha detallado anteriormente, el número de intentos de eventos de comida no son captados de igual manera en las señales de aceleración de la cabeza y espalda. Las señales de alta frecuencia asociados a los posibles intentos de captura de presa son más notorios en las señales de aceleración de la cabeza que en las de la espalda (Fig.4.3). Esto debido a que los eventos de comida están asociados con golpes fuertes de cabeza [Skinner et al., 2009] y no tanto a movimientos bruscos del cuerpo.

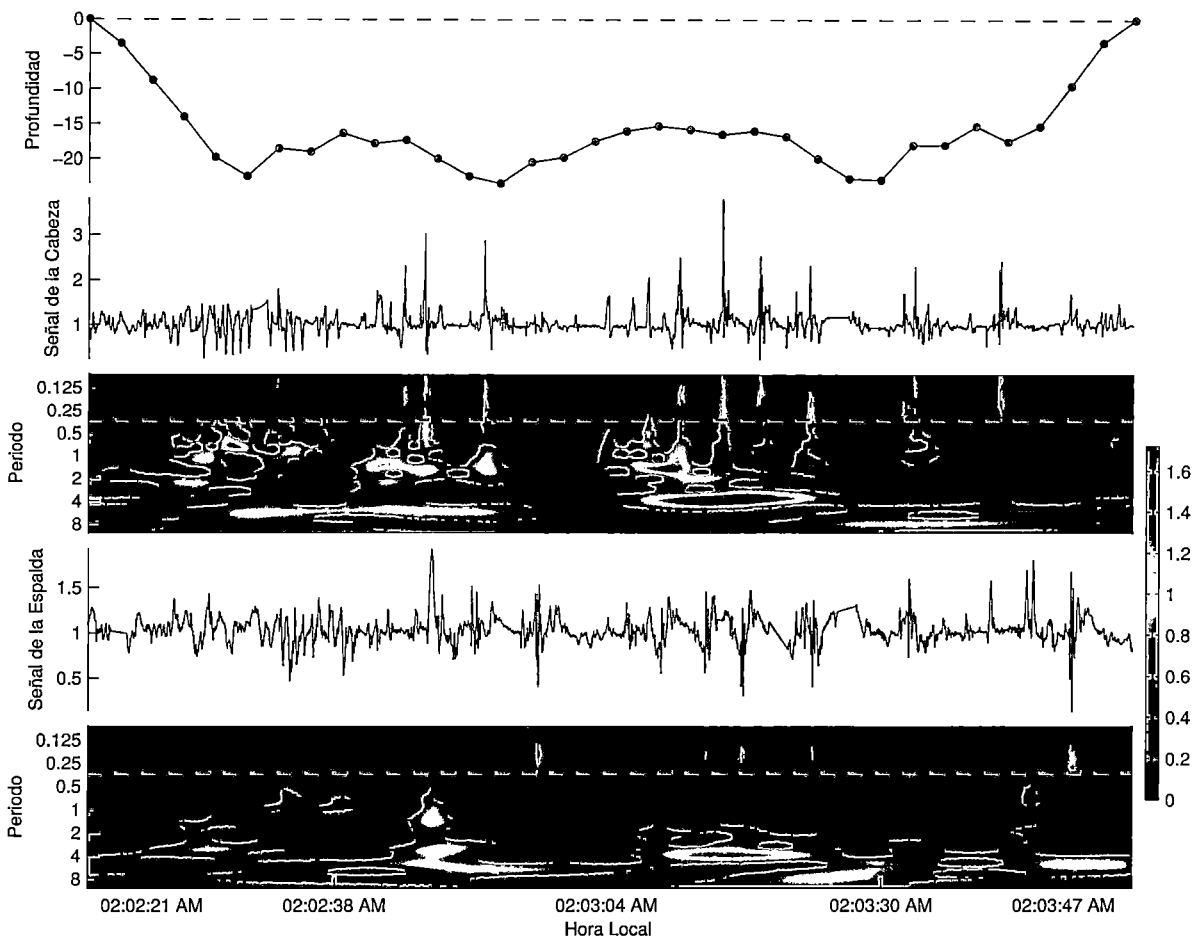


Figura 4.3: Perfil de un buceo, Señales de aceleración de la cabeza y espalda con sus respectivos comportamientos espectrales. La línea punteada representa un periodo de 0.3 segundos (3 Hz).

Adicionalmente, la mayor cantidad de buceos con intentos de captura de presas tuvieron lugar en las primeras horas del día, alrededor de las 2 de la mañana, según lo obtenido para ambos acelerómetros. Para el acelerómetro en la cabeza, se tiene un porcentaje aproximado de éxito de 89 % de los buceos realizados durante las 2 hasta las 3 de la mañana (Fig.4.4). Por su parte, según el acelerómetro en la espalda, en dicho intervalo de tiempo se tiene sólo un 73 % de buceos exitosos (Fig.4.5).

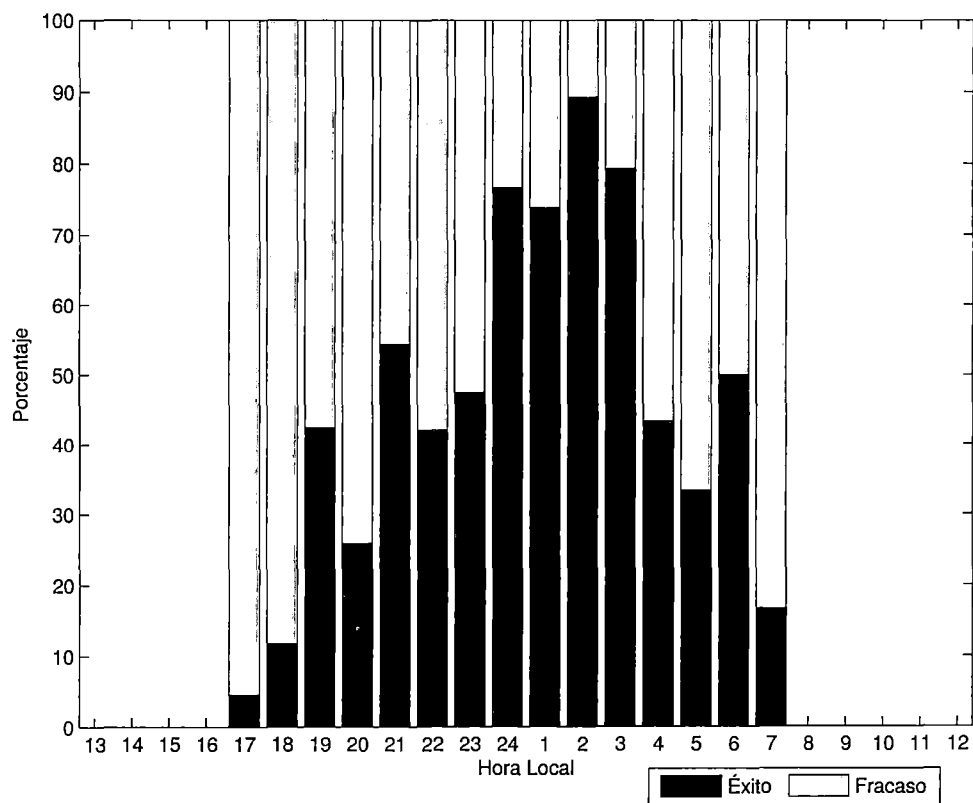


Figura 4.4: Distribución de buceos con intentos de captura de presa por hora, según el acelerómetro en la cabeza.

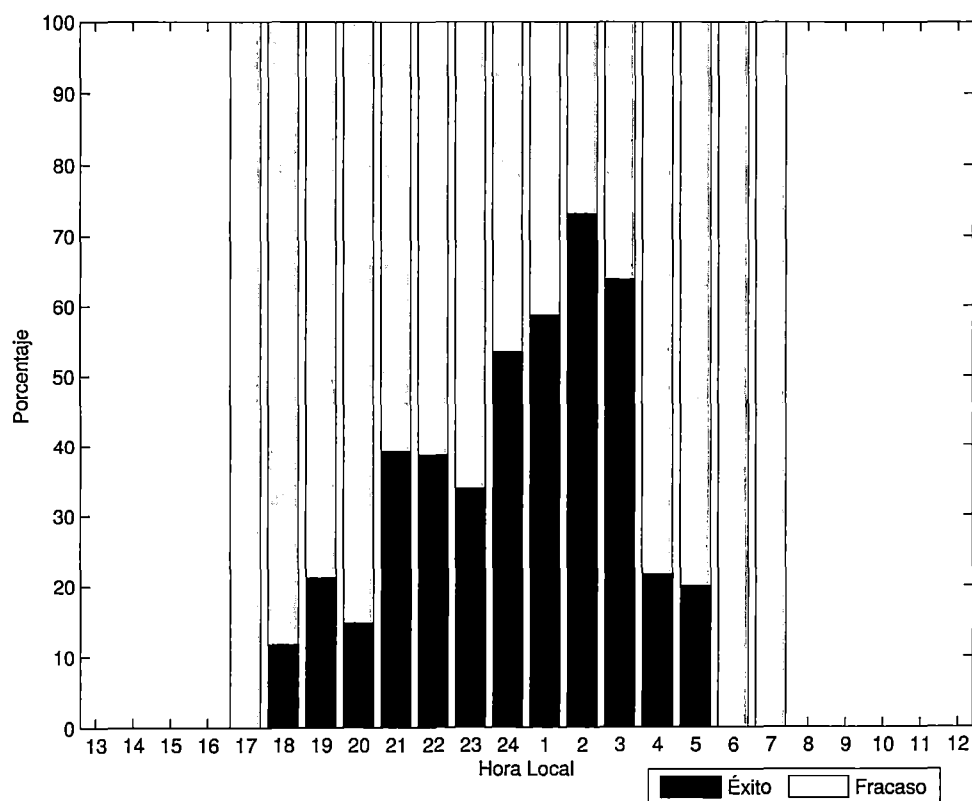


Figura 4.5: Distribución de buceos con intentos de captura de presa por hora, según el acelerómetro en la espalda.

Al comparar la categorización de los buceos, según el hecho de que hubo al menos un evento de intento de captura de presa para ser considerado de éxito, en ambos acelerómetros, se obtuvo que el 75% (442 buceos) se clasificaron del mismo modo (Tabla.4.4).

Cuadro 4.4: Comparación de la clasificación de buceos según ambos acelerómetros

Cabeza \ Espalda	Sin captura de presa	Con captura de presa
Sin captura de presa	252	33
Con captura de presa	116	190

4.3. Aceleración Dinámica Global del Cuerpo (ODBA)

EL ODBA definido y detallado en la sección 2.2.2 se calculó considerando una media móvil de 2 segundos [Fahlman et al., 2008] en los tres ejes para la estimación de la Aceleración Estática, luego ésta se restó de la aceleración original obteniéndose la estimación de la Aceleración Dinámica en los tres ejes. Finalmente, se sumó los valores absolutos de los tres ejes originando el indicador ODBA.

En primer lugar, se puede ver que existe una relación cuadrática positiva tanto para el ODBA del buceo y la duración del mismo contra la profundidad máxima (Fig.4.6). A pesar de esto, se puede ver que la duración del buceo sobreestima el ODBA del buceo, siendo más notorio a mayores profundidades.

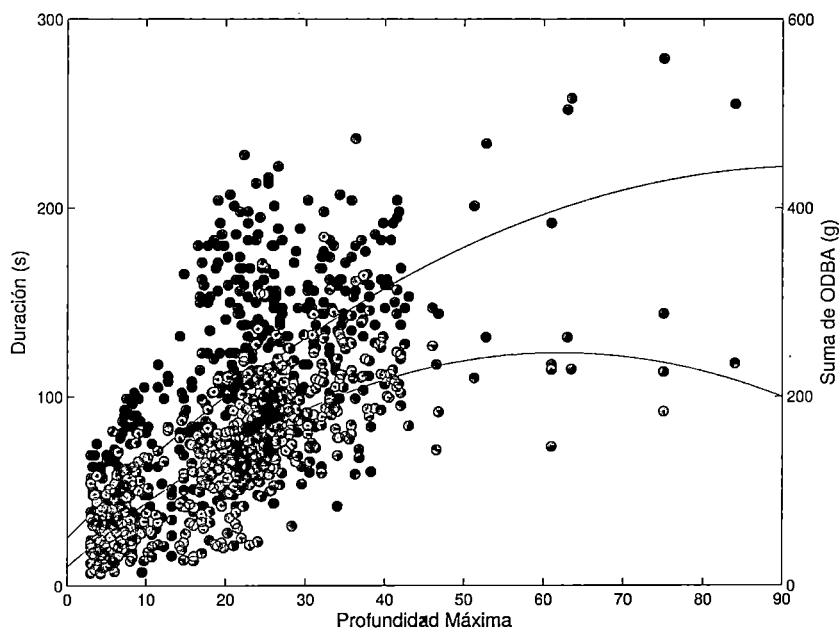


Figura 4.6: Duración del buceo (azul) y ODBA Total del buceo (verde) en función de la Profundidad Máxima. Se muestra además las curvas ajustadas para ambas series.

Por otro lado, el promedio de energía estimada de los buceos con posibles intentos de captura de presa y aquellos que no los presentan difieren de manera significativa ($t_{calc} = 13.4, p < 0.0001$). Esto se puede apreciar de manera visual en la Fig.4.7.

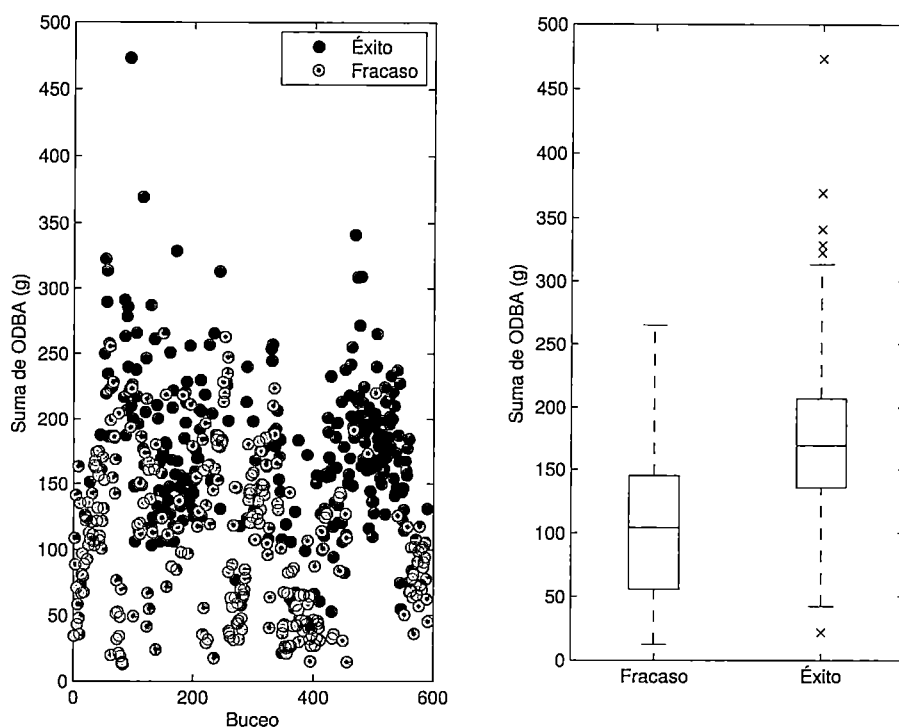


Figura 4.7: Comparación de ODBA Total respecto a buceo exitosos (azul) y buceos no exitosos (rojo).

4.4. Modelos de Predicción de Buceos con Captura de Presa

Se hace uso de un modelo logístico debido a la naturaleza del estudio, que es la predicción de la presencia de intentos de captura de presa en el buceo. Además, dado que se cuenta con dos acelerómetros, se plantean distintos modelos para cada uno de ellos. Es así que, se divide esta sección en base a los acelerómetros de la cabeza y espalda. Dentro de cada subsección se plantea un modelo sin considerar interacciones entre las variables independientes y otro donde si las considera. Luego, según la pruebas de bondad de ajuste y capacidad predictiva se elige el mejor.

Las variables fueron seleccionadas mediante la técnica de Stepwise (paso a paso), considerando el Criterio de Información de Akaike (AIC), dado por $AIC = -2(\log \text{ máxima verosimilitud}) + 2(\text{número de parámetros})$, para la eliminación o incorporación de las variables al modelo, teniendo en cuenta que el mejor modelo es aquel que tiene un menor valor de AIC.

4.4.1. Modelo basado en el acelerómetro de la cabeza

1. Sin Interacciones

(a) Selección de Variables

Las variables más significativas para el modelo están relacionadas con las fases de ascenso y descenso de los buceos. Siendo estas variables el ratio de descenso, el ratio de ascenso y los zigzags en el descenso y ascenso. Adicionalmente, también es importante la variabilidad de las profundidades en el fondo del buceo, así como el momento del día en que sucede el buceo.

Cuadro 4.5: Variables incorporadas al modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la cabeza

Paso	Añadir o Remove	Nombre	AIC
1	Añadir x6	Ratio de descenso	694.239
2	Añadir x14	Rango de profundidades	652.98
3	Añadir x8	Ratio de ascenso	644.6643
4	Añadir x10	Zigzags en el descenso	640.0606
5	Añadir x12	Zigzags en el ascenso	635.3909
6	Añadir x1	Momento del día	634.7202

(b) Estimación del Modelo

El modelo logit sin interacciones obtenido con este acelerómetro es el siguiente:

$$\ln\left(\frac{\hat{\pi}_i}{1 - \hat{\pi}_i}\right) = X_i^T \hat{\beta} \quad (4.1)$$

Donde X_i queda determinado por las variables de la primera columna del cuadro 4.6; es decir, $X_i = [X_i^1, X_i^6, \dots, X_i^{14}]$ y el $\hat{\beta}$ toma los valores de la tercera columna del mismo cuadro.

Según la estimación del modelo, se puede ver que todas las variables influyen de manera positiva en la predicción del éxito del buceo. Siendo el ratio de descenso y el ratio de ascenso las variables más influyentes.

Cuadro 4.6: Resumen de los parámetros obtenidos en el modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la cabeza

Variables	Nombre	Estimación	Error Estándar	t	P-valor	Exp(β)
Intercepto		-4.592	0.5	-9.181	0.000	0.01
x1	Momento del día	0.055	0.0338	1.64	0.101	1.057
x6	Ratio de descenso	2.235	0.443	5.048	0.000	9.346
x8	Ratio de ascenso	1.046	0.32	3.272	0.001	2.847
x10	Zigzags en el descenso	0.336	0.131	2.562	0.0104	1.3997
x12	Zigzags en el ascenso	0.5202	0.2204	1 2.36	0.018	1.682
x14	Rango de profundidades	0.112	0.03	4.268	0.000	1.118

(c) Bondad de Ajuste

Para probar el ajuste del modelo se considera el estadístico de devianza y una comparación del modelo contra un modelo constante. El detalle se puede ver en el cuadro 4.7. Como se puede notar el modelo resulta significativo al 95 % de confianza en ambas pruebas.

Cuadro 4.7: Indicadores estadísticos de la bondad de ajuste del modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la cabeza

Prueba o Indicador	Logit
Criterio AIC	634.7202
Devianza del modelo	
Devianza (D_1)	620.7202
Grados de libertad ($N - p$)	584
Límite superior 95 % (X_{est})	641.3284
Comparación con un modelo constante	
Devianza modelo constante (D_0)	818.55
Grados de libertad modelo constante ($N - 1$)	590
Estadístico de prueba ($D_0 - D_1$)	197.83
Significancia de la prueba (P)	5.4867e-40

(d) Capacidad Predictiva

El modelo obtenido clasifica correctamente el 76.8 % (454) de los buceos.

Cuadro 4.8: Tabla de clasificación del modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la cabeza

$Y \setminus \hat{Y}$	Sin captura de presa	Con captura de presa
Sin captura de presa	201	84
Con captura de presa	53	253

2. Con Interacciones

(a) Selección de Variables

Las variables que se incorporan a este modelo son las mismas que las consideradas en el modelo anterior. Sin embargo, en este modelo las interacciones también son importantes para la predicción del éxito del buceo.

Cuadro 4.9: Variables incorporadas al modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la cabeza

Paso	Añadir o Remove	Nombre	AIC
1	Añadir x6	Ratio de descenso	694.239
2	Añadir x14	Rango de profundidades	652.98
3	Añadir x8	Ratio de ascenso	644.6643
4	Añadir x10	Zigzags en el descenso	640.0606
5	Añadir x12	Zigzags en el ascenso	635.3909
6	Añadir x10:x14	Interacción	633.1445
7	Añadir x1	Momento del día	632.5912
8	Añadir x1:x8	Interacción	626.5946
9	Añadir x1:x6	Interacción	621.3374
10	Añadir x1:x10	Interacción	618.8261

(b) Estimación del Modelo

El modelo logit con interacciones queda determinado por las variables e interacciones de la primera columna del cuadro 4.10 y el $\hat{\beta}$ toma los valores de la tercera columna del mismo cuadro.

Cuadro 4.10: Resumen de los parámetros obtenidos en el modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la cabeza

VARIABLES	Nombre	Estimación	Error Estándar	t	P-valor	Exp(β)
Intercepto		-5.521	1.289	-4.282	0.000	0.004
x1	Momento del día	0.118	0.111	1.068	0.285	1.126
x6	Ratio de descenso	-3.384	1.823	-1.856	0.063	0.034
x8	Ratio de ascenso	6.272	1.344	4.666	0.000	529.649
x10	Zigzags en el descenso	-0.218	0.565	-0.385	0.700	0.804
x12	Zigzags en el ascenso	0.453	0.236	1.918	0.055	1.572
x14	Rango de profundidades	0.138	0.030	4.614	0.000	1.148
x1:x6	Interacción	0.456	0.148	3.082	0.002	1.578
x1:x8	Interacción	-0.428	0.108	-3.971	0.000	0.652
x1:x10	Interacción	0.094	0.046	2.061	0.039	1.099
x10:x14	Interacción	-0.074	0.034	-2.188	0.029	0.929

(c) Bondad de Ajuste

Del mismo modo, se realiza la prueba de bondad de ajuste considerando los estadísticos ya mencionados. Es así que, al comparar el modelo con un modelo constante resulta significativo al 95 % de confianza.

Cuadro 4.11: Indicadores estadísticos de la bondad de ajuste del modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la cabeza

Prueba o Indicador	Logit
Criterio AIC	618.8261
Devianza del modelo	
Devianza (D_2)	596.8261
Grados de libertad ($N - p$)	580
Límite superior 95 % (X_{est})	637.1355
Comparación con un modelo constante	
Devianza modelo constante (D_0)	818.55
Grados de libertad modelo constante ($N - 1$)	590
Estadístico de prueba ($D_0 - D_2$)	221.73
Significancia de la prueba (P)	4.6478e-42
Comparación con un modelo sin interacciones	
Devianza modelo sin interacción (D_1)	620.7202
Grados de libertad modelo sin interacción ($N - p$)	584
Estadístico de prueba ($D_1 - D_2$)	23.8941
Significancia de la prueba (P)	8.3875e-05

Por otro lado, se evalúa el valor de considerar las interacciones mediante una comparación del modelo con interacciones frente a uno que no las incorpora. Esta prueba resulta significativa, lo que indica que añadir las interacciones mejora el ajuste a los datos.

(d) Capacidad Predictiva

Al clasificar el modelo se obtiene que presenta una capacidad predictiva del 76%. Este resultado es menor que el obtenido con el modelo simple sin interacciones. Lo que nos indica que un mejor modelo para los datos sería aquél considerando solo las variables simples.

Cuadro 4.12: Tabla de clasificación del modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la cabeza

$Y \setminus \hat{Y}$	Sin captura de presa	Con captura de presa
Sin captura de presa	203	82
Con captura de presa	60	246

4.4.2. Modelo basado en el acelerómetro de la espalda

1. Sin Interacciones

(a) Selección de Variables

Según el criterio de Akaike se incorporan al modelo 7 variables. Estas variables describen las fases de ascenso y descenso, así como la variabilidad existente en el fondo del buceo. Hablamos del ratio de descenso, ratio de ascenso, tiempo de descenso, los zigzags en el descenso y ascenso, el rango de profundidades y la profundidad máxima alcanzada en el buceo.

Cuadro 4.13: Variables incorporadas al modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la espalda

Paso	Añadir o Remover	Nombre	AIC
1	Añadir x6	Ratio de descenso	697.4982
2	Añadir x14	Rango de profundidades	666.9677
3	Añadir x5	Tiempo de descenso	659.0687
4	Añadir x7	Tiempo de ascenso	655.0817
5	Añadir x10	Zigzags en el descenso	653.9502
6	Añadir x12	Zigzags en el ascenso	653.0119
7	Añadir x8	Ratio de ascenso	652.6311
8	Añadir x2	Profundidad máxima	651.5382
9	Remover x7	Tiempo de ascenso	649.67

(b) Estimación del Modelo

Con las variables seleccionadas, el modelo logit sin interacciones estimado para el acelerómetro de la espalda es el siguiente:

$$\ln\left(\frac{\hat{\pi}_i}{1 - \hat{\pi}_i}\right) = X_i^T \hat{\beta} \quad (4.2)$$

Donde X_i queda determinado por las variables de la primera columna del cuadro 4.14; es decir, $X_i = [X_i^2, X_i^5, \dots, X_i^{14}]$ y el $\hat{\beta}$ toma los valores de la tercera columna del mismo cuadro.

Se puede ver, también, que la mayoría de las variables influyen positivamente en la predicción del éxito del buceo. Dentro de éstas, las variables más influyentes son el ratio de

descenso y el ratio de ascenso, seguidos de los zigzags ocurridos durante el descenso y ascenso del buceo. Por su parte, la profundidad máxima influye de manera negativa.

Cuadro 4.14: Resumen de los parámetros obtenidos en el modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la espalda

Variables	Nombre	Estimación	Error Estándar	t	P-valor	Exp(β)
Intercepto		-5.081	0.536	-9.475	0.000	0.006
x2	Profundidad máxima	-0.049	0.021	-2.306	0.021	0.952
x5	Tiempo de descenso	0.035	0.014	2.477	0.013	1.036
x6	Ratio de descenso	3.069	0.508	6.045	0.000	21.514
x8	Ratio de ascenso	0.969	0.341	2.838	0.005	2.635
x10	Zigzags en el descenso	0.253	0.132	1.923	0.055	1.288
x12	Zigzags en el ascenso	0.368	0.2001	1.836	0.066	1.444
x14	Rango de profundidades	0.125	0.031	4.036	0.000	1.133

(c) Bondad de Ajuste

El modelo resulta adecuado al 95 % de confianza según el indicador estadístico de la devianza. Además, es significativo al compararlo con un modelo considerando solo una constante.

Cuadro 4.15: Indicadores estadísticos de la bondad de ajuste del modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la espalda

Prueba o Indicador	Logit
Criterio AIC	649.67
Devianza del modelo	
Devianza (D_1)	633.6673
Grados de libertad ($N - p$)	583
Límite superior 95 % (X_{est})	640.2802
Comparación con un modelo constante	
Devianza modelo constante (D_0)	783.36
Grados de libertad modelo constante ($N - 1$)	590
Estadístico de prueba ($D_0 - D_1$)	149.69
Significancia de la prueba (P)	4.7127e-29

(d) Capacidad Predictiva

El modelo obtenido con el acelerómetro de la espalda sin incluir las interacciones, realiza

una clasificación correcta de 72.4%.

Cuadro 4.16: Tabla de clasificación del modelo logit sin interacciones, según el acelerómetro en la espalda

$Y \setminus \hat{Y}$	Sin captura de presa	Con captura de presa
Sin captura de presa	294	74
Con captura de presa	89	134

2. Con Interacciones

(a) Selección de Variables

El cuadro 4.17 muestra las variables e interacciones incorporadas al modelo. Dichas variables son el ratio de descenso, el ratio de ascenso, el tiempo de descenso y algunas interacciones entre éstas.

Cuadro 4.17: Variables incorporadas al modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la espalda

Paso	Añadir o Remove	Nombre	AIC
1	Añadir x6	Ratio de descenso	697.4982
2	Añadir x14	Rango de profundidades	666.9677
3	Añadir x5	Tiempo de descenso	659.0687
4	Añadir x5:x6	Interacción	648.9139
5	Añadir x5:x14	Interacción	640.5683
6	Añadir x8	Ratio de ascenso	638.244

(b) Estimación del Modelo

El modelo estimado presenta la misma forma que el modelo sin interacciones. Las variables e interacciones consideradas son las mostradas en la primera columna del cuadro 4.18 y los valores estimados se muestran en la tercera columna del mismo cuadro.

Cuadro 4.18: Resumen de los parámetros obtenidos en el modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la espalda

Variables	Nombre	Estimación	Error Estándar	t	P-valor	Exp(β)
Intercepto		-6.163	0.675	-9.126	0.000	0.002
x5	Duración del descenso	0.099	0.021	4.682	0.000	1.104
x6	Ratio de descenso	3.787	0.628	6.027	0.000	44.12
x8	Ratio de ascenso	0.668	0.322	2.077	0.038	1.951
x14	Rango de profundidades	0.229	0.048	4.721	0.000	1.257
x5:x6	Interacción	-0.082	0.024	-3.466	0.001	0.921
x5:x14	Interacción	-0.004	0.001	-2.813	0.005	0.996

(c) Bondad de Ajuste

Al evaluar el modelo mediante la devianza, éste resulta significativo al 95 % de confianza. También, es significativo si se compara con un modelo constante. Para determinar la importancia de añadir interacciones al modelo, se realiza la comparación versus un modelo sencillo sin interacciones. Esto resulta significativo y justifica incorporar las interacciones en el modelo.

Cuadro 4.19: Indicadores estadísticos de la bondad de ajuste del modelo con interacciones, según el acelerómetro en la espalda

Prueba o Indicador	Logit
Criterio AIC	638.244
Devianza del modelo	
Devianza (D_2)	624.244
Grados de libertad ($N - p$)	584
Límite superior 95 % (X_{est})	641.3284
Comparación con un modelo constante	
Devianza modelo constante (D_0)	783.36
Grados de libertad modelo constante ($N - 1$)	590
Estadístico de prueba ($D_0 - D_2$)	159.11
Significancia de la prueba (P)	9.1176e-32
Comparación con un modelo sin interacciones	
Devianza modelo sin interacción (D_1)	633.6673
Grados de libertad modelo sin interacción ($N - p$)	583
Estadístico de prueba ($D_1 - D_2$)	9.4233
Significancia de la prueba (P)	0.0021

(d) Capacidad Predictiva

La capacidad predictiva del modelo con interacciones para el acelerómetro en la espalda es de 72.3%.

Cuadro 4.20: Tabla de clasificación del modelo logit con interacciones, según el acelerómetro en la espalda

$Y \setminus \hat{Y}$	Sin captura de presa	Con captura de presa
Sin captura de presa	296	72
Con captura de presa	92	131

4.4.3. Modelo seleccionado

Luego de estimar diferentes modelos para ambos acelerómetros tanto de la cabeza como de la espalda, se puede notar que los modelos con interacciones ajustan mejor los datos según las pruebas estadísticas. Sin embargo, por el principio de parsimonia se elige como mejores modelos a los modelos simples sin interacciones para cada acelerómetro. Además, dichos modelos escogidos presentan una mejor capacidad predictiva y al no contar con interacciones la interpretación de los

odds se torna más sencilla.

De este modo, los modelos seleccionados tanto para el acelerómetro en la cabeza como para la espalda son planteados del siguiente modo:

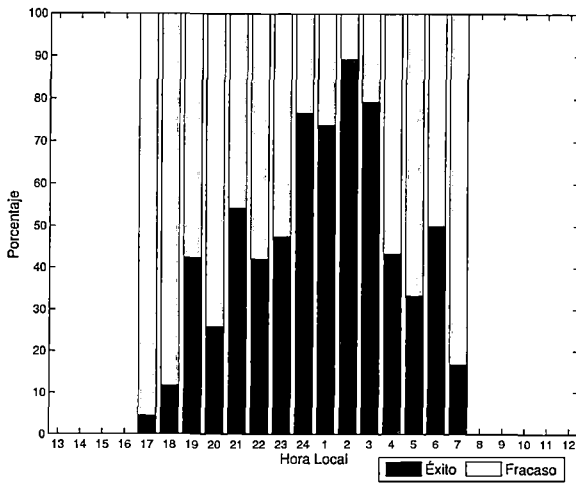
$$\ln\left(\frac{\hat{\pi}_i}{1 - \hat{\pi}_i}\right) = X_i^T \hat{\beta} \quad (4.3)$$

Donde, para el acelerómetro de la cabeza, X_i es el perfil i -ésimo $[X_i^1, X_i^6, \dots, X_i^{14}]$ determinado por las variables y las estimaciones de sus parámetros ($\hat{\beta}$) mostradas en el cuadro 4.6. Mientras que para el acelerómetro de la espalda, X_i es el perfil i -ésimo $[X_i^2, X_i^5, \dots, X_i^{14}]$ conformado por las variables y las estimaciones de sus parámetros ($\hat{\beta}$) mostradas en el cuadro 4.14.

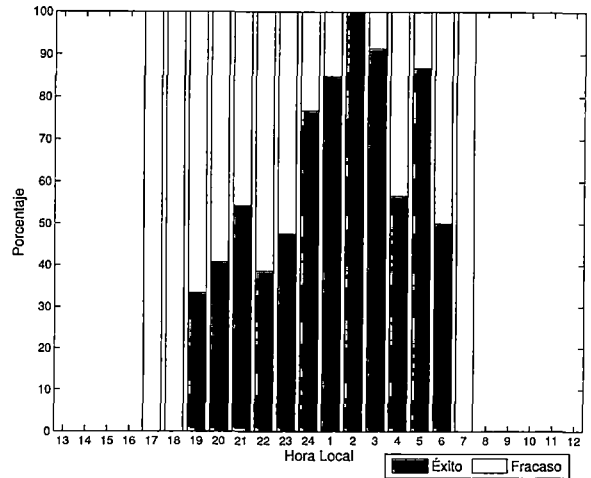
Ambos modelos, incorporan igualmente 5 variables correspondientes a las fases de ascenso y descenso del buceo como los ratios y zigzags de cada fase. Asimismo, ambos consideran el rango de profundidades ($p \cong 0$) en la predicción de buceos con intentos de captura de presa. Las diferencias radican en que para el modelo de la cabeza se añade también la variable momento del día. Por otro lado, para el modelo de la espalda, se adicionan las variables profundidad máxima ($p = 0.021$) y duración del descenso ($p = 0.013$).

No se debe dejar de mencionar que con estos modelos se obtuvo una clasificación correcta de 76.8% y 72.4% respectivamente para cada acelerómetro. Esto permite mostrar que se puede predecir si hubo intentos de captura de presa en un buceo por medio de su perfil.

Adicionalmente, se puede observar en las Fig.4.8 y Fig.4.9 que de manera general el comportamiento de la distribución observada de buceos con intentos de captura de presa por hora se mantiene en la distribución estimada obtenida gracias al modelo logístico seleccionado. Esto ocurre tanto para el acelerómetro que se colocó en la cabeza como para el que se colocó en la espalda. Se puede distinguir también en las distribuciones estimadas que el porcentaje de buceos con intentos de captura de presa ocurren mayormente alrededor de las 2 de la mañana, tal y como se aprecia en las distribuciones observadas.

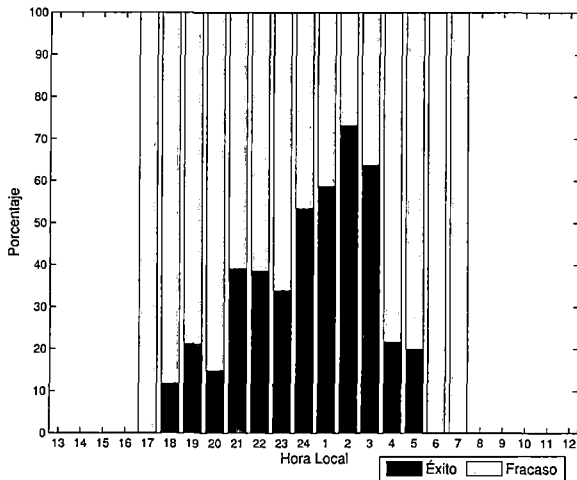


(a) Distribución Observada

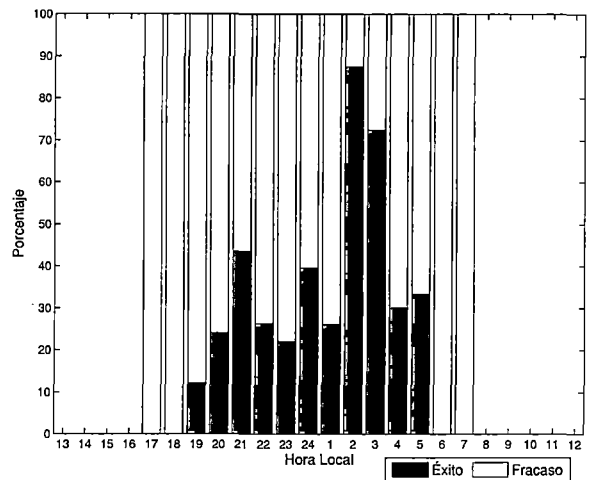


(b) Distribución Estimada

Figura 4.8: Comparación del comportamiento observado y estimado de buceos con intentos de captura de presa por hora, según el acelerómetro en la cabeza



(a) Distribución Observada



(b) Distribución Estimada

Figura 4.9: Comparación del comportamiento observado y estimado de buceos con intentos de captura de presa por hora, según el acelerómetro en la espalda

4.5. Predicción de los probables buceos con captura de presa

De los 4520 buceos restantes, se predice que el 52.9% de ellos presentan intentos de captura de presa, considerando el modelo obtenido con el acelerómetro en la cabeza. En tanto que, según el modelo obtenido con el acelerómetro en la espalda, solo el 30.2% de los buceos poseen intentos de

captura de presa.

Cuadro 4.21: Predicción de los buceos con intentos de captura de presa restantes, según el modelo logit seleccionado para el acelerómetro en la cabeza

Buceos	Conteos	Porcentaje
Sin captura de presa	2131	47.15 %
Con captura de presa	2389	52.85 %

Cuadro 4.22: Predicción de los buceos con intentos de captura de presa restantes, según el modelo logit seleccionado para el acelerómetro en la espalda

Buceos	Conteos	Porcentaje
Sin captura de presa	3157	69.85 %
Con captura de presa	1363	30.15 %

Además, comparando la predicción en ambos acelerómetros, tenemos que los dos predicen de manera igual el éxito y fracaso de presencia de intentos de captura de presa en los buceos en solo el 77.2 % de ellos.

Cuadro 4.23: Comparación de la predicción según ambos acelerómetros

Cabeza \ Espalda	Sin captura de presa	Con captura de presa
Sin captura de presa	2129	2
Con captura de presa	1028	1361

Capítulo 5

Discusión

En el presente estudio se usó unos grabadores electrónicos llamados acelerómetros y TDR de manera conjunta para analizar el éxito de forrajeo en las lobas marinas finas. Es el primer estudio de este tipo que se hace en el Perú, en el cual se coloca grabadores de aceleración en la cabeza y espalda de estos animales.

5.1. Eventos de Intentos de captura de presa

Los intentos de captura de presa son identificados como señales de alta frecuencia en los registros de aceleraciones captadas por la cabeza y espalda. Aunque no se puede saber con exactitud si hubo la captura de presa, es posible asociar este evento con movimientos bruscos en la cabeza. Esto debido, a que la aceleración de la cabeza durante un intento de captura de presa es mucho mayor en amplitud y mucho más corta en duración que las señales de aceleración producidas durante los comportamientos normales de nado [Skinner et al., 2009].

Diversos estudios han señalado al eje X (Surge) como el más adecuado en el reconocimiento de posibles intentos de captura de presa [Kokubun et al., 2011, Viviant et al., 2009, Suzuki et al., 2009]. Sin embargo, la señal de aceleración usada en este trabajo no corresponde a una dimensión en particular (Surge, Sway, Heave). Por el contrario, se utiliza la señal vectorial, pues de este modo se tiene una medida de aceleración integrada. Además, en ocasiones, estos animales capturan las presas barriendo la cabeza en lugar de realizar un fuerte golpe, lo que sugiere que la mayor señal de

aceleración producida durante dicho evento no siempre puede estar en alineación con el eje longitudinal (Surge) de la cabeza [Skinner et al., 2009].

Por otro lado, el valor del filtro que se debe hacer y el límite que se considera para detectar el intento de captura de presa afecta significativamente el número de eventos. El filtro escogido en este trabajo es considerado óptimo, pues ha sido usado en otras especies de pinípedos donde se han obtenido buenos resultados [Iwata et al., 2012, Gallon et al., 2013, Viviant et al., 2009, Suzuki et al., 2009]. Asimismo, el límite escogido ha sido adecuado, ya que se ha considerado la sensibilidad que involucra detectar el intento de captura de presa tanto en la cabeza como en la espalda. Es por eso, que se empleó distintos límites, dependiendo de la ubicación del acelerómetro.

5.2. Estrategia de Forrajeo

El análisis de la aceleración vectorial detectó intentos de capturas de presa en más de la mitad de los buceos, según la señal de la cabeza. Mientras que, para la espalda, dichos eventos fueron detectados en menos de la mitad de buceos. Sin embargo, de acuerdo a ambos acelerómetros, los posibles eventos de comida ocurrieron mayormente en el fondo del buceo.

La distribución de los buceos con eventos de intentos de captura de presa por hora presenta la forma de una distribución normal, con un pico de buceos exitosos alrededor de las dos de la mañana. Esto permite deducir, que la loba marina empieza sus viajes de alimentación con pocos buceos exitosos, que se pueden considerar como buceos de exploración. Luego, a medida que van pasando las horas, los éxitos de los buceos se van incrementando, lo cual correspondería a que el animal ha encontrado una zona de alta probabilidad de riqueza alimenticia. Este éxito disminuye en las siguientes horas, debido a que el animal se va retirando de la zona rica hacia su colonia. Dicho comportamiento se puede distinguir tanto para lo encontrado en la cabeza como para la espalda, siendo más notorio para el primero.

Los modelos estadísticos encontrados sugieren que valores mayores del Ratio de Descenso sugieren un aumento en la creencia del éxito del buceo. Esto se puede interpretar a que si el animal sabe que en la zona hay alimento, éste descenderá rápidamente para obtener la presa.

Capítulo 6

Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es de poder identificar buceos con mayor probabilidad de haber tenido al menos un intento de captura de presa en base a sus características. Esto se pudo lograr gracias a la regresión logística que se empleó, donde se obtuvieron modelos con una moderada capacidad predictiva del 76 %. Asimismo, los modelos de regresión logística mostraron que la loba marina incrementa principalmente su ratio de descenso durante sus buceos al encontrar presa.

Nuestros datos muestran que es posible reconocer posibles intentos de captura de presa como señales de alta frecuencia en los registros de aceleración. Cabe resaltar que estos son más notorios en la cabeza que en la espalda. Aunque, sería ideal si se validan con videos donde se registre el evento exacto de captura de presa. Además, este estudio muestra que el uso de la señal vectorial de la aceleración es adecuado para la detección de movimientos de cabeza asociados con posible eventos de comida de la loba marina.

En este trabajo se contó con señales de aceleración provenientes de acelerómetros de la cabeza y espalda, es por eso que se obtuvo un modelo logístico en base a la información de cada uno. De este modo, los modelos logísticos encontrados son los siguientes:

Modelo Cabeza
$\ln\left(\frac{\pi_i}{1-\pi_i}\right) = \hat{\beta}_0 + x_1\hat{\beta}_1 + x_6\hat{\beta}_2 + x_8\hat{\beta}_3 + x_{10}\hat{\beta}_4 + x_{12}\hat{\beta}_5 + x_{14}\hat{\beta}_6$

Modelo Espalda
$\ln\left(\frac{\pi_i}{1-\pi_i}\right) = \hat{\beta}_0 + x_2\hat{\beta}_1 + x_5\hat{\beta}_2 + x_6\hat{\beta}_3 + x_8\hat{\beta}_4 + x_{10}\hat{\beta}_5 + x_{12}\hat{\beta}_6 + x_{14}\hat{\beta}_7$

Donde x_1 es el momento del día, x_6 es el ratio de descenso, x_8 es el ratio de ascenso, x_{10} son los zigzags en el descenso, x_{12} son los zigzags en el ascenso, x_{14} es el rango de profundidades, x_2 es la profundidad máxima y x_5 es el tiempo de descenso.

Por otro lado, el objetivo de obtener modelos adecuados para la predicción de la probable ocurrencia de captura de presa en los buceos de la loba marina era poder evaluar los buceos donde no se contara con información de aceleración del animal. En base a esto, se pudo identificar que en más del 50 % del resto de buceos de alimentación, la loba marina se encontró con presas. Este resultado es considerando el modelo logístico con información de la cabeza. Sin embargo, si se considera el modelo logístico obtenido con información de la espalda, solo el 30 % de ellos tuvieron encuentro de presa.

Toda actividad está asociada a un desgaste de energía. Es decir, todos los buceos que realiza la loba marina le demandan un costo energético, sean éstos con encuentro de presa o no. Al realizar una comparación de la energía empleada entre los buceos con probables encuentros de presa y aquellos donde no los hubo, mediante el indicador ODBA, se encontró que a un nivel de significancia del 95 % estos difieren significativamente ($t_{calc} = 13.4, p < 0.0001$) siendo mayor el empleo de energía en los buceos con encuentros de presa.

En resumen, las técnicas utilizadas en este estudio respondieron correctamente a los objetivos planteados en la tesis. Sin embargo, aún queda mucho por conocer acerca del comportamiento de forrajeo que emplean las lobas marinas así como otros comportamientos que poseen. Es así que, esta tesis deja el campo abierto a futuros estudios tales como:

1. Incluir a las demás lobas marinas en la modelación para obtener un mejor modelo de predicción.
2. Estudiar a mayor profundidad las señales de aceleración en función de sus frecuencias y amplitudes con el objetivo de poder identificar otros patrones de comportamiento y así obtener un etograma (catálogo de comportamientos).

3. Emplear un modelo considerando como variable respuesta al indicador de energía ODBA para estudiar la relación existente entre el perfil del buceo y el desgaste de energía durante el forrajeo.

Bibliografía

- [Austin et al., 2006] Austin, D., Bowen, W. D., McMillan, J. I., and Iverson, S. J. (2006). Linking movement, diving, and habitat to foraging success in a large marine predator. *Ecology*, 87(12):3095–108.
- [Blackshaw, 1986] Blackshaw, J. K. (1986). *Notes on some topics in Applied Animal Behaviour*.
- [Bograd et al., 2010] Bograd, S. J., Block, B. A., Costa, D. P., and Godley, B. J. (2010). Biologging technologies: new tools for conservation. Introduction. *Endangered Species Research*, 10:1–7.
- [Bonnell, 2009] Bonnell, J. (2009). Ecosystems and Ecosystem Management. *The Ohio State University Extension*, (Agriculture and Natural Resources).
- [Caixa, 2014] Caixa (2014). Instituto de Ciencias del Mar. Obra Social La Caixa. Proyecto Mar a Fondo. <http://www.elmarafondo.com>.
- [Cárdenas-Alayza, 2012] Cárdenas-Alayza, S. (2012). *Prey Abundance and Population Dynamics of South American Fur Seal (Arctocephalus Australis) in Peru*. MSc Thesis, The University of British Columbia.
- [Cazelles et al., 2008] Cazelles, B., Chavez, M., Berteaux, D., Ménard, F., Vik, J. O., Jenouvrier, S., and Stenseth, N. C. (2008). Wavelet analysis of ecological time series. *Oecologia*, 156:287–304.
- [Cherel et al., 1996] Cherel, Y., Ridoux, V., and Rodhouse, P. (1996). Fish and squid in the diet of king penguin chicks, *Aptenodytes patagonicus*, during winter at sub-antarctic Crozet Islands. *Marine Biology*, 126:559–570.
- [Costa and Gales, 2003] Costa, D. P. and Gales, N. J. (2003). Energetics of a benthic diver: Seasonal foraging ecology of the Australian Sea Lion, *Neophoca cinerea*. *Ecological Monographs*, 73(1):27–43.
- [Dassis et al., 2012] Dassis, M., Farenga, M., Bastida, R., and Rodríguez, D. (2012). At-sea behavior of South American fur seals: Influence of coastal hydrographic conditions and physiological implication. *Mammalian Biology - Zeitschrift für Säugetierkunde*, 77(1):47–52.
- [DelGreco, 2013] DelGreco, A. (2013). Animal Diversity Web. *Arctocephalus australis*: South American fur seal. http://animaldiversity.ummz.umich.edu/accounts/Arctocephalus_australis/.
- [Dobson, 2002] Dobson, A. (2002). *An Introduction de Generalized Linear Models*. New York.
- [Espinoza and Bertrand, 2008] Espinoza, P. and Bertrand, A. (2008). Revisiting Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) trophodynamics provides a new vision of the Humboldt Current system. *Progress in Oceanography*, 79(2-4):215–227.

- [Fahlman et al., 2008] Fahlman, A., Wilson, R., Svård, C., Rosen, D., and Trites, A. (2008). Activity and diving metabolism correlate in Steller sea lion *Eumetopias jubatus*. *Aquatic Biology*, 2(April):75–84.
- [Gallon et al., 2013] Gallon, S., Bailleul, F., Charrassin, J.-B., Guinet, C., Bost, C.-A., Handrich, Y., and Hindell, M. (2013). Identifying foraging events in deep diving southern elephant seals, *Mirounga leonina*, using acceleration data loggers. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 88-89:14–22.
- [Gleiss et al., 2011] Gleiss, A., Wilson, R., and Shepard, E. (2011). Making overall dynamic body acceleration work: on the theory of acceleration as a proxy for energy expenditure. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(1):23–33.
- [Goebel et al., 1991] Goebel, M. E., Bengtson, J. L., DeLong, R. L., Gentry, R. L., and Loughlin, T. R. (1991). Diving Patterns and Foraging Locations of Female Northern Fur Seals. *Fishery Bulletin*, 89:171–179.
- [Graf, 2014] Graf, E. (2014). Ecología 2007: Flujo de energía y materia en los ecosistemas. http://sapp.uv.mx/univirtual/cursos/semestrales/MA/docs/MA05_FlujosEnergiaEcosistema.pdf.
- [Guinet et al., 2001] Guinet, C., Dubroca, L., Lea, M., Goldsworthy, S., Cherel, Y., Duhamel, G., Bonadonna, F., and Donnay, J. (2001). Spatial distribution of foraging in female Antarctic fur seals *Arctocephalus gazella* in relation to oceanographic variables: a scale-dependent approach using geographic information systems. *Marine Ecology Progress Series*, 219:251–264.
- [Gutiérrez, 1998] Gutiérrez, G. (1998). Estrategias de Forrajeo. *Manual de Análisis Experimental del Comportamiento*, pages 359–381.
- [Halsey et al., 2009] Halsey, L., Shepard, E., Quintana, F., Gomez Laich, A., Green, J., and Wilson, R. (2009). The relationship between oxygen consumption and body acceleration in a range of species. *Comparative biochemistry and physiology. Part A, Molecular & integrative physiology*, 152(2):197–202.
- [Hosmer and Lemeshow, 2000] Hosmer, D. and Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression*. Jhon Wiley & Sons, INC., New York, 2nd ed. edition.
- [IRD, 2014] IRD (2014). Institut de Recherche pour le Développement (IRD). <http://es.ird.fr/el-ird>.
- [Iwata et al., 2012] Iwata, T., Sakamoto, K., Takahashi, A., Edwards, E., Staniland, L., Trathan, P., and Naito, Y. (2012). Using a mandible accelerometer to study fine-scale foraging behavior of free-ranging Antarctic fur seals. *Marine Mammal Science*, 28(2):345–357.
- [Jefferson et al., 1993] Jefferson, T. A., Leatherwood, S., and Webber, M. A. (1993). *FAO species identification guide. Marine mammals of the world*. Rome.
- [Jefferson et al., 2011] Jefferson, T. A., Webber, M. A., and Pitman, R. L. (2011). *Marine Mammals of the World: A Comprehensive Guide to Their Identification*. Academic Press.
- [Jones et al., 2009] Jones, T. T., Hastings, M. D., Bostrom, B. L., Andrews, R. D., and Jones, D. R. (2009). Validation of the use of doubly labeled water for estimating metabolic rate in the green turtle (*Chelonia mydas* L.): a word of caution. *The Journal of Experimental Biology*, 212:2635–2644.
- [Kokubun et al., 2011] Kokubun, N., Kim, J., Shin, H., Naito, Y., and Takahashi, A. (2011). Penguin head movement detected using small accelerometers: a proxy of prey encounter rate. *The Journal of experimental biology*, 214(Pt 22):3760–7.

- [Lara-Lara et al., 2008] Lara-Lara, J. R., Arenas, V., Bazán, C., Díaz, C. n., Escobar, E., García, M. d. I. C., Gaxiola, G., Robles, G., Sosa, R., Soto, L., Tapia, M., Valdez, J. E., and Bezaury, J. (2008). Los ecosistemas marinos. *Capital natural de México*, I(Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO):135–159.
- [Lau and Weng, 1995] Lau, K.-M. and Weng, H. (1995). Climate Signal Detection using Wavelet Transform: How to Make a Time Series Sing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76:2391–2402.
- [Lee Fugal, 2009] Lee Fugal, D. (2009). *Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing: An In-Depth, Practical Approach for the Non-Mathematician*. Space & Signals Technical Pub.
- [LMI-DISCOH, 2014] LMI-DISCOH (2014). Dinámicas del Sistema de la Corriente de Humboldt. <http://es.discogh.ird.fr>.
- [Majluf, 1987] Majluf, P. (1987). *Reproductive ecology of female South American fur seals at Punta San Juan, Peru*. PhD thesis, University of Cambridge.
- [Majluf, 1989] Majluf, P. (1989). Reproductive Ecology of South American Fur Seals in Peru. *The Peruvian Upwelling Ecosystem: Dynamics and Interactions*, pages 332–343.
- [Majluf and Goebel, 1992] Majluf, P. and Goebel, M. E. (1992). The Capture and Handling of Female South American Fur Seals and their pups. *Marine Mammal Science*, 8(2):187–190.
- [Majluf and Reyes, 1989] Majluf, P. and Reyes, J. (1989). The marine mammals of Peru: A review. *The Peruvian Upwelling Ecosystem: Dynamics and Interactions*, pages 344–363.
- [Majluf and Trillmich, 1981] Majluf, P. and Trillmich, F. (1981). Distribution and abundance of sea lions (*Otaria byronia*) and fur seals (*Arctocephalus australis*) in Peru. *Mammalian Biology - Zeitschrift für Säugetierkunde*, 46(6):384–393.
- [Mandal, 2010] Mandal, F. B. (2010). *Textbook of Animal Behaviour*.
- [Mathisen, 1989] Mathisen, O. A. (1989). Adaptation of the Anchoveta (*Engraulis ringens*) to the Peruvian Upwelling System. *The Peruvian Upwelling Ecosystem: Dynamics and Interactions*, pages 220–234.
- [McPhee et al., 2003] McPhee, J. M., Rosen, D. A., Andrews, R. D., and Trites, A. W. (2003). Predicting metabolic rate from heart rate in juvenile Steller sea lions *Eumetopias jubatus*. *Journal of Experimental Biology*, 206(11):1941–1951.
- [Ménard et al., 2007] Ménard, F., Marsac, F., Bellier, E., and Cazelles, B. (2007). Climatic oscillations and tuna catch rates in the Indian Ocean: a wavelet approach to time series analysis. *Fisheries Oceanography*, 16(1):95–104.
- [Nathan et al., 2012] Nathan, R., Spiegel, O., Fortmann-Roe, S., Harel, R., Wikelski, M., and Getz, W. M. (2012). Using tri-axial acceleration data to identify behavioral modes of free-ranging animals: general concepts and tools illustrated for griffon vultures. *The Journal of experimental biology*, 215(Pt 6):986–996.
- [Nelder and Wedderburn, 1972] Nelder, J. and Wedderburn, R. (1972). Generalized Linear Models. *Royal Statistical Society*, 135(3):370–384.
- [Peng and So, 2002] Peng, C.-Y. J. and So, T.-S. H. (2002). Logistic Regression Analysis and Reporting: A Primer. *Understanding Statistics*, 1(1):31–70.

- [Rodríguez and Bastida, 2004] Rodríguez, D. and Bastida, R. (2004). Lobos Marinos y Focas. In *La Vida entre Mareas*, pages 309–322. Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero.
- [Rutz and Hays, 2009] Rutz, C. and Hays, G. (2009). New frontiers in biologging science. *Biology letters*, 5(3):289–292.
- [Sakamoto et al., 2009] Sakamoto, K., Sato, K., Ishizuka, M., Watanuki, Y., Takahashi, A., Daunt, F., and Wanless, S. (2009). Can Ethograms Be Automatically Generated Using Body Acceleration Data from Free-Ranging Birds? *PloS one*, 4(4):e5379.
- [Salas Velasco, 1996] Salas Velasco, M. (1996). La regresión logística . Una aplicación a la demanda de estudios universitarios. *Estadística Española*, 38(141):193–217.
- [Shepard et al., 2009] Shepard, E., Wilson, R., Quintana, F., Gomez Laich, A., and Forman, D. (2009). Pushed for time or saving on fuel: fine-scale energy budgets shed light on currencies in a diving bird. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society*, 276(1670):3149–55.
- [Shepard et al., 2008] Shepard, E., Wilson, R., Quintana, F., Gomez Laich, A., Liebsch, N., Albarreda, D., Halsey, L., Gleiss, A., Morgan, D., Myers, A., Newman, C., and McDonald, D. (2008). Identification of animal movement patterns using tri-axial accelerometry. *Endangered Species Research*, 10:47–60.
- [Sinervo, 2006] Sinervo, B. (2006). Chapter 6 : Optimal Foraging Theory : Constraints and Cognitive Processes.
- [Skinner et al., 2009] Skinner, J., Norberg, S., and Andrews, R. (2009). Head striking during fish capture attempts by Steller sea lions and the potential for using head surge acceleration to predict feeding behavior. *Endangered Species Research*, 10:61–69.
- [Soltis et al., 2012] Soltis, J., Wilson, R., Douglas-Hamilton, I., Vollrath, F., King, L., and Savage, A. (2012). Accelerometers in collars identify behavioral states in captive African elephants *Loxodonta africana*. *Endangered Species Research*, 18(3):255–263.
- [Sparling et al., 2008] Sparling, C. E., Thompson, D., Fedak, M. A., Gallon, S. L., and Speakman, J. R. (2008). Estimating field metabolic rates of pinnipeds: doubly labelled water gets the seal of approval. *Functional Ecology*, 22(2):245–254.
- [Suzuki et al., 2009] Suzuki, I., Naito, Y., Folkow, L., Miyazaki, N., and Blix, A. (2009). Validation of a device for accurate timing of feeding events in marine animals. *Polar Biology*, 32(4):667–671.
- [Tait and Dipper, 1998] Tait, R. and Dipper, F. (1998). *Elements of Marine Ecology*.
- [Torrence and Compo, 1998] Torrence, C. and Compo, G. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- [Tremblay and Cherel, 2000] Tremblay, Y. and Cherel, Y. (2000). Benthic and pelagic dives : a new foraging behaviour in rockhopper penguins. *Marine Ecology Progress Series*, 204:257–267.
- [Viviant et al., 2009] Viviant, M., Trites, A., Rosen, D., Monestiez, P., and Guinet, C. (2009). Prey capture attempts can be detected in Steller sea lions and other marine predators using accelerometers. *Polar Biology*, 33(5):713–719.
- [Watanabe et al., 2005] Watanabe, S., Izawa, M., Kato, A., Ropert-Coudert, Y., and Naito, Y. (2005). A new technique for monitoring the detailed behaviour of terrestrial animals: A case study with the domestic cat. *Applied Animal Behaviour Science*, 94(1-2):117–131.

- [Wilson et al., 2006] Wilson, R., White, C., Quintana, F., Halsey, L., Liebsch, N., Martin, G., and Butler, P. (2006). Moving towards acceleration for estimates of activity-specific metabolic rate in free-living animals: the case of the cormorant. *The Journal of animal ecology*, 75(5):1081–90.
- [Yoda et al., 2001] Yoda, K., Naito, Y., Sato, K., Takahashi, A., Nishikawa, J., Ropert-Coudert, Y., Kurita, M., and Le Maho, Y. (2001). A new technique for monitoring the behaviour of free-ranging Adélie penguins. *The Journal of experimental biology*, 204:685–690.