



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



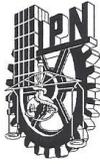
SEÑAL ISOTÓPICA DE $\delta^{13}\text{C}$ Y $\delta^{15}\text{N}$ EN
VIBRISAS DE HEMBRAS DE LOBO
MARINO DE CALIFORNIA (*Zalophus
californianus*) Y SU RELACIÓN CON LA
VARIABILIDAD AMBIENTAL EN LA
ISLA SAN ESTEBAN, SONORA, MÉXICO

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN
MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA

ROSAS HERNÁNDEZ MARTHA PATRICIA

LA PAZ, B.C.S., DICIEMBRE DEL 2013



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 20 del mes de Noviembre del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

SEÑAL ISOTÓPICA DE 13C Y 15N EN VIBRISAS DE HEMBRAS DE LOBO MARINO DE CALIFORNIA (Zalophus californianus) Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD AMBIENTAL EN LA ISLA SAN ESTEBAN, SONORA, MÉXICO

Presentada por el alumno:

Table with columns for ROSAS (Apellido paterno), HERNÁNDEZ (materno), MARTHA PATRICIA (nombre(s)), and a registration code table: B 1 1 0 2 6 5

Aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de Tesis

Signature of Dr. David Aurióles Gamboa

DR. DAVID AURIÓLES GAMBOA
Director de Tesis

Signature of Dra. Claudia Janetl Hernández Camacho

DRA. CLAUDIA JANETL HERNÁNDEZ CAMACHO
2ª. Directora de Tesis

Signature of Dra. Laura Sánchez Velasco

DRA. LAURA SÁNCHEZ VELASCO

Signature of Dr. Francisco Javier García Rodríguez

DR. FRANCISCO JAVIER GARCÍA RODRÍGUEZ

Signature of Dr. Eduardo González Rodríguez

DR. EDUARDO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Signature of Dra. María Margarita Casas Valdez

DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDEZ



IPN
CICIMAR
DIRECCION



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

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 26 del mes Noviembre del año 2013
el (la) que suscribe BIÓL. MARTHA PATRICIA ROSAS HERNÁNDEZ alumno(a) del
Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS
con número de registro B110265 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS
manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:
DR. DAVID AURIOLES GAMBOA Y DRA. CLAUDIA JANETL HERNÁNDEZ CAMACHO

y cede los derechos del trabajo titulado:

"SEÑAL ISOTÓPICA DE $\delta^{13}C$ Y $\delta^{15}N$ EN VIBRISAS DE HEMBRAS DE LOBO MARINO DE CALIFORNIA
(*Zalophus californianus*) Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD AMBIENTAL
EN LA ISLA SAN ESTEBAN, SONORA, MÉXICO"

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

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: m.patricia.rosas@gmail.com - dgamboa@ipn.mx - cjhernandez78@gmail.com
Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


BIÓL. MARTHA PATRICIA ROSAS HERNÁNDEZ

nombre y firma



*“It is not the strongest of the species that survives,
nor the most intelligent that survives.
It is the one that is most adaptable to change.
In the struggle for survival,
the fittest win out at the expense of their rivals
because they succeed in adapting themselves best to their environment”.*
Charles Darwin

Agradecimientos

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) por todo el apoyo brindado para la realización de este estudio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), al Programa Institucional de Formación de Investigadores del IPN (PIFI) y a la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (COFAA) por todo el apoyo económico otorgado para el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. David Auriolos por brindarme su apoyo y confianza. Gracias por dejarme aprender de usted y darme la oportunidad de pertenecer al equipo del laboratorio de Pinnípedos.

A la Dra. Claudia Hernández por confiar y creer en mi. Le estaré eternamente agradecida por la oportunidad que me brindó. Gracias por su apoyo y tiempo en incontables ocasiones. Por compartirme sus experiencias y aprendizaje, pero sobre todo, gracias por su amistad.

Al Dr. Eduardo González por su tiempo, paciencia y esmero a la hora de enseñarme. Gracias por todo su apoyo, trabajo y gran aporte en este estudio.

A los doctores, Laura Sánchez, Francisco García y Víctor Cruz por sus comentarios y sugerencias que contribuyeron al mejoramiento de este trabajo.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM) por haberme dado las facilidades de haber cursado algunas de las asignaturas que contribuyeron a mi formación académica.

Al Dr. Héctor Villalobos por mostrarme el mundo de R y \LaTeX . Gracias por su asesoramiento, apoyo y enseñanzas en todo momento. Creo que de las mejores cosas que aprendí en el proceso de la maestría fue el uso de estas herramientas, que al igual que MatLab me han dado la oportunidad de crecer académicamente. Aunado a esto, externo mi agradecimiento al grupo de R, aprendí mucho de ustedes, gracias por compartir su conocimiento y brindarme su ayuda, en especial, agradezco a Emigdio por haberme ayudado siempre que se lo pedía.

A Fernando, Mónica y Jimena por su compañerismo, por brindarme su conocimiento y sobre todo, gracias por sus consejos y sugerencias para la realización de esta investigación.

Al dream team Pinnípeda por todo. Móni, Jime, Dann, Sofí, gran parte de esta trabajo se debe a ustedes, su ayuda en las salidas a campo, el aporte de ideas y apoyo en todo momento lo hicieron posible. Gracias por soportarme en los momentos de estrés y el permitir que las molestara de vez en cuando. Gracias a Ana, Susie y Samantha, sin ustedes el equipo no estaría completo. Este grupo ha sido el principal responsable de que las cosas salieran bien. La convivencia diaria con ustedes hicieron más ameno el trabajo

en el laboratorio y en las salidas a campo. De cada una aprendí cosas muy valiosas y con eso me quedo. Mil gracias por su amistad, cariño y afecto que me brindaron.

A Javier y Zamarrón, por su excelente trabajo. Sin su ayuda y compañía las salidas a campo no hubieran sido las mismas. Gracias por facilitarnos en mucho la obtención de muestras y hacer más amenas las horas de trabajo.

A Ana, Peggy y Andrés, por los ratos de diversión, las charlas y los buenos momentos que compartimos.

A Paulina, por brindarme su amistad desde el primer momento. Pou, tu compañía, carisma y locura hicieron que mi estancia en La Paz fuera más placentera. Gracias por ser mi confidente y amiga en los momentos complicados pero sobre todo en los buenos. Nunca habrá forma de compensar todo lo que has hecho por mí. Te quiero mucho negrita.

A Lorena y Marcia por ser mi familia. Gracias chicas por estar presente en esta parte de mi vida, creo que me gané la lotería al tenerlas a ustedes como compañía. Los buenos ratos de diversión y de descanso no hubieran sido lo mismo sin ustedes. Gracias por soportarme y aguantarme en los ratos de estrés y desesperación. Pero sobre todo gracias por dejarme ser parte de sus vidas.

A mi familia por apoyarme en todo momento. Se que probablemente no estén de acuerdo con algunas decisiones que he tomado pero eso no evita que siempre están ahí para brindarme su apoyo y respeto. Gracias por su cariño incondicional no importando la distancia que existe entre nosotros. A mi tíos, Carlos y Olivia espero algún día corresponder de algún modo todo lo que han hecho por mí, sé que su apoyo fue incondicional y les agradezco por ello.

Índice

Glosario	v
Abreviaturas	VIII
Resumen	IX
Abstract	x
1. Introducción	1
2. Antecedentes	4
3. Justificación	8
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos particulares	9
5. Área de estudio	10
6. Material y Métodos	12
6.1. Fase de campo	12
6.2. Fase de laboratorio	12
6.2.1. Preparación de las vibrisas	12
6.2.2. Preparación de los muestras de peces, crustáceos y moluscos	13
6.3. Análisis isotópico	13
6.4. Eliminación de fragmentos de la punta	14
6.5. Variables ambientales	15
6.5.1. Concentración superficial de Clo- <i>a</i> y valores de TSM	15
6.6. Ajuste estacional	16
6.7. Tasa de crecimiento de la vibrisa	16
6.8. Relación de los parámetros ambientales y los perfiles isotópicos de las vibrisas	19
6.9. Estimación de la amplitud y nivel trófico	20
7. Resultados	22
7.1. Selección del tamaño mínimo de muestra de la variación isotópica a lo largo de la vibrisa	22
7.2. Estadística descriptiva de los valores isotópicos	24

7.3.	Variación isotópica a lo largo de la vibrisa	27
7.4.	Variabilidad ambiental aledaña a la isla San Esteban	27
7.5.	Tasa de crecimiento de las vibrisas	33
7.5.1.	Modelo de von Bertalanffy	33
7.5.2.	Modelo lineal	34
7.6.	Relación de la variabilidad ambiental con la señal isotópica	34
7.7.	Ecología trófica de las hembras de <i>Z. californianus</i> de la isla San Esteban .	38
8.	Discusión	43
8.1.	Variabilidad ambiental	43
8.2.	Variación isotópica a lo largo de la vibrisa	44
8.2.1.	Variación trófica/dieta	45
8.2.2.	Cambios en las áreas de alimentación	47
8.2.3.	Composición isotópica de la base trófica	48
8.3.	Crecimiento de la vibrisa	49
8.4.	Variación ambiental y su influencia sobre los valores basales de los isótopos estables de C y N	52
8.5.	Correlación entre las variables de Clo- <i>a</i> y TSM con los valores isotópicos de C y N de las vibrisas de las hembras de SE	54
8.6.	Aspectos de la ecología trófica de las hembras de lobo marino	56
8.6.1.	Nivel trófico	56
8.6.2.	Amplitud trófica	57
9.	Conclusiones	59
	Literatura citada	73
	Índice de figuras	74
	Índice de tablas	75
	A. Análisis armónico	76
	B. Periodicidad de los valores isotópicos de C y N de las vibrisas 1 y 2	78
	C. Correlación de los perfiles isotópicos con respecto a las variables ambientales	79

Glosario

$\delta^{13}\text{C}$: Diferencia expresada en partes por mil entre el contenido de $\delta^{13}\text{C}$ de una muestra con respecto al del estándar (Pee Dee Belemnite).

$\delta^{15}\text{N}$: Diferencia expresada en partes por mil entre el contenido de $\delta^{15}\text{N}$ de una muestra con respecto al del estándar (Nitrógeno atmosférico).

Amplitud trófica: Variedad de presas que conforma la dieta de un consumidor.

Bentónico: Ambiente formado por el fondo marino y la capa de agua que está en íntimo contacto con él.

Clorofila: Grupo de pigmentos fotosintéticos presente en los cloroplastos de las plantas. Es capaz de transformar la energía de la luz solar en energía química a través del proceso de fotosíntesis.

Clorofila a: La clorofila a es un índice de la abundancia fitoplanctónica, por lo que es una herramienta muy útil para la estimar la productividad de un ecosistema marino, además de que puede ser medida continuamente y automáticamente (Lorenzen, 1966). Si es derivada de satélite es comúnmente expresada en $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

Corrientes de marea: Corriente marina superficial, periódica, producida por las mareas. Es débil, en altamar, pero cerca de la costa puede adquirir mayores velocidades. Se divide en corrientes de flujo y reflujo.

Delta (δ): notación utilizada para expresar las diferencias relativas en las razones isotópicas entre una muestra y un estándar, expresada en partes por mil (‰).

Desnitrificación: Conjunto de reacciones del ciclo del nitrógeno (N) mediadas por bacterias heterotróficas, por medio de las cuales especies oxidadas de N son reducidas. El resultado final de este conjunto de reacciones es N_2

Enriquecimiento isotópico: Término utilizado para describir la cantidad de ^{15}N o ^{13}C con respecto a una cantidad previa. Una sustancia enriquecida en ^{15}N o ^{13}C estará disminuida isotópicamente en ^{14}N y ^{12}C , respectivamente.

Filopatría: (“apego al sitio”) tendencia de los individuos a regresar o permanecer en su localidad natal para reproducirse o mudar, a lo largo de su vida.

Fraccionamiento isotópico: cambios en la señal isotópica entre la dieta y los tejidos del consumidor debido a la diferencia de asimilación bioquímica de los diferentes componentes de la dieta con señales isotópicas diferentes, así como por una discriminación isotópica.

Isótopo: Son formas de un mismo elemento que difieren en el número de neutrones en el núcleo. Los neutrones extras en el núcleo de un elemento generalmente imparten diferencias químicas sutiles, pequeñas diferencias que mantienen casi idénticos a los isótopos de ser verdaderamente idénticos.

Isótopos estables: se definen como aquellos que están energéticamente estables y no decaen, por lo que no son radiactivos. Un isótopo tiende a ser estable cuando el número de neutrones (N) y el número de protones (Z) son bastante similares.

Marea: Ascenso y descenso rítmico de la superficie del océano u otros cuerpos de agua o de la tierra misma, debido a las fuerzas que resultan del movimiento de la Tierra, en relación con la Luna y el Sol, y con otros astros.

Nicho trófico: Espacio ecológico o papel que desempeñan las especies dentro de una comunidad.

Nitrificación: Conjunto de reacciones del ciclo del nitrógeno (N) mediadas por bacterias por el cual especies reducidas de N (N_2 , número de oxidación = 0) incorporan oxígeno, formando moléculas oxidadas. El producto final de este conjunto de reacciones es NO^{-3} (número de oxidación = 5).

Nivel trófico: Posición o categoría en la que se clasifica un determinado organismo dentro de la cadena trófica: dicha posición está dada de acuerdo a la manera en la cual se obtiene su materia y energía.

Nutriente: Se refiere a sustancias o elementos químicos que no son sintetizados por los organismos y que son necesarios para el desarrollo de sus funciones. En términos de productividad primaria los más comunes son los nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3).

Otárido: Familia del suborden Pinnípeda. Se caracteriza por presentar un pelaje de mayor a menor espesor según la especie; tienen una capa de tejido adiposo subcutáneo; su estructura pélvica es móvil, lo que les permite apoyar las extremidades posteriores para desplazarse en tierra; presentan pabellón auditivo externo; tienen dos pares de glándulas mamarias.

Pelágico: división primaria del océano en la escala vertical, que incluye exclusivamente la columna de agua.

Periodo: tiempo que se realiza un ciclo completo.

Pinnípedo: mamífero carnívoro que se ha adaptado a la vida marina, aunque e podría ser considerados de hábitos anfibios, ya que su reproducción se realiza sobre la tierra o hielo, mientras que su alimentación es acuática.

Productividad: La productividad primaria regional de los océanos se mide por el crecimiento y la reproducción de algas y otras plantas. El crecimiento es el resultado de una compleja combinación de alimentos disponibles, luz y temperatura. El océano, y por consiguiente las plantas que crecen en él, responden a las condiciones meteorológicas locales, como la velocidad del viento, la nubosidad y la luz solar incidente. La producción primaria es solo la primera de las varias etapas por las que pasa la transformación de nutrientes y el dióxido de carbono en los elementos constitutivos de las células vivas.

Serie de Fourier: Representaciones de las funciones periódicas como una combinación lineal de funciones de seno y coseno.

Surgenia: ascenso de aguas subsuperficiales frías y ricas en nutrientes, causando el desplazamiento de las aguas superficiales, en zonas restringidas del océano. Las surgencias más importantes (en términos de productividad) ocurren en las zonas costeras y son provocadas por los vientos que soplan paralelos a la misma, provocando un transporte de agua a la derecha de la dirección del viento en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio sur.

Temperatura: La temperatura de un cuerpo cualquiera caracteriza su estado térmico que, a su vez, está relacionado con la energía cinética (energía de movimiento) de las moléculas que lo constituyen. Esa energía cinética de las moléculas que influyen sobre la temperatura del cuerpo se denomina *calor*. Así la temperatura es un indicador de la cantidad de energía en forma de calor que posee el cuerpo.

Temperatura superficial del mar: es una medida de la energía debido al movimiento de las moléculas de la capa superior del océano. Dependiendo del sensor, las mediciones espaciales nos dan una medida global sin precedentes de la temperatura superficial del mar cada pocos días a una semana. Las temperaturas se miden a partir de aproximadamente 10 μm debajo de la superficie (bandas infrarrojas) a 1 mm de profundidad (bandas de microondas) con radiómetros.

Abreviaturas

H_2O : Agua

AGC: Alto Golfo de California

EA: Analizador elemental (por sus siglas en inglés)

Clo-a: Clorofila a

Cu^+ : Cobre

CO_2 : Dióxido de Carbono

IRMS: Espectrómetro de Masas de Razones Isotópicas (por sus siglas en inglés)

GC: Golfo de California

k: tasa de crecimiento

NO_3^- : Nitratos

N_2 : Nitrógeno

NT: Nivel trófico

NGC: Norte del Golfo de California

Cr_2O_3 : Óxido de Cromo (III)

O_2 : Oxígeno

RA: Región del Archipiélago o Zona de las Grandes Islas

SE: San Esteban

SGC: Sur del Golfo de California

TSM: Temperatura superficial del mar

Z: *Zalophus*

ZEG: Zona de entrada del Golfo de California

Resumen

Las firmas isotópicas de C y N presentes en tejidos metabólicamente inertes como las vibrisas, reflejan la dieta consumida en el momento de su síntesis; así, este tipo de tejidos con continuo crecimiento registran cronológicamente los movimientos e historia dietética de los individuos por un periodo de hasta varios años. El presente estudio se determinó si los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ registrados a lo largo de las vibrisas de lobo marino de California son el reflejo de la variación en la concentración de clorofila-a (*Clo-a*) y la temperatura superficial del mar (TSM) del área aledaña a la isla San Esteban. En junio del 2011 se obtuvieron vibrisas de once hembras adultas, las vibrisas se cortaron en el mayor número de fragmentos posibles, analizándose un total de 712 fragmentos. Para los valores isotópicos obtenidos por vibrisa así como para los parámetros ambientales se hizo un análisis de Fourier para determinar la periodicidad que registran. La periodicidad registrada en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y su correlación con la longitud de la vibrisa permitió estimar una tasa de crecimiento (0.005 mm/día) mediante el modelo de von Bertalanffy. Se calculó que la vibrisa más larga (V10) representaba 2.6 años, mientras que la vibrisa más pequeña (V11) sólo tiene un tiempo almacenado de 2.3 meses. Posteriormente se infirieron los valores de *Clo-a* y TSM mediante imágenes satelitales de cada 8 días para las fechas contenidas en cada una de las vibrisas. En promedio, se encontró un desfase de 2.5 meses entre la *Clo-a* y los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$; mientras que el desfase que se presentó entre la TSM y los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ fue de 2.4 y 2.2 meses respectivamente.

Palabras clave:

Clorofila, temperatura superficial del mar, análisis de Fourier, desfase, tasa de crecimiento.

Abstract

Isotopic signatures from C and N present in metabolically inert tissues as vibrissae reflect the diet consumed on the time of its synthesis; thus, this type of tissues with continued growth, chronologically records the movements and the dietary history of individuals, including several years of information. In this study we determined if the values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ recorded along the vibrissae of the California sea lion, reflects the variation in the concentration of chlorophyll-*a* (Clo-*a*) and sea surface temperature (SST) of the area surrounding San Esteban island. In June 2011, 11 vibrissae from adult females were collected, and were posteriorly cutted on the largest possible number of fragments, allowing the analysis of 712 fragments total. For the isotopic values obtained for each vibrissa and for environmental parameters, a Fourier analysis was performed to determine the periodicity recorded. The periodicity recorded in $\delta^{15}\text{N}$ values and their correlation with the length of the vibrissa allowed to estimate a growth rate (0.005 mm/day) using the von Bertalanffy model. It was estimated that the longest vibrissa (V10) represented 2.6 years, while the smallest vibrissa (V11) had only registered 2.3 months. Subsequently, values of Clo-*a* and TSM were inferred using satellite images of every 8 days corresponding to the dates obtained in each vibrissa. On average, it was found a phase shift of 2.5 months between the Clo-*a* and the values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$, while the phase shift between SST and the values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ was 2.4 and 2.2 months respectively.

Keywords:

Chlorophyll a, sea surface temperature, Fourier analysis, phase shift , growth rate .

1. Introducción

Los organismos se enfrentan constantemente a cambios que les impone el medio que habitan y esto se debe en gran medida a la variabilidad ambiental. La variabilidad ambiental puede tener un carácter temporal y/o espacial y; mientras mayor sea dicha variación, mayor capacidad de adaptación deberán desarrollar los organismos. La variabilidad temporal generalmente está ligada a la estacionalidad, mientras que la variabilidad espacial está asociada a la heterogeneidad del medio (Koch *et al.*, 2009; Cottingham *et al.*, 2001).

La variabilidad ambiental afecta la estructura de las comunidades biológicas a través de cambios temporales en la disponibilidad de los recursos. Lo anterior provoca fluctuaciones estacionales en la riqueza, composición, abundancia y diversidad de estas comunidades (Bertram *et al.*, 2001; Arnould *et al.*, 2011). Por tanto, los organismos despliegan una serie de estrategias adaptativas, principalmente para optimizar sus hábitos alimenticios y para maximizar su éxito reproductivo cuando las condiciones son favorables (Lea *et al.*, 2006; Rolland *et al.*, 2009).

La incidencia de la variabilidad ambiental sobre los hábitos alimenticios de una especie se puede inferir midiendo el grado de relación entre la dieta y los factores ambientales (Dalerum y Angerbjörn, 2005; Hood y Sterner, 2010). La variación estacional en las fuentes de alimento puede ser crucial para la comprensión de la dinámica de la población; así mismo las tendencias en la dieta a largo plazo pueden ser importantes para evaluar los efectos ecológicos en el medio ambiente asociados al cambio climático (Reid y Croxall, 2001).

Actualmente, una herramienta que nos permite hacer inferencias acerca de la dieta de un organismo es el análisis de isótopos estables de carbono y nitrógeno ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$) que revela información sobre el alimento asimilado por periodos variables de tiempo (días, meses o años), dependiendo del tejido analizado, y permite estimar el nivel y amplitud trófica de los individuos y sus poblaciones (Tieszen *et al.*, 1983; Bearhop *et al.*, 2004; Cherel *et al.*, 2007); aunque no permite determinar la identidad específica de las presas (Porrás-Peters *et al.*, 2008; Iverson *et al.*, 2004).

El tiempo de integración de los isótopos estables de carbono y nitrógeno depende del metabolismo y de la tasa de renovación del tejido que se utiliza (piel, hueso, músculo, pelo, vibrisas, sangre, etc.)(Tieszen *et al.*, 1983; Bearhop *et al.*, 2004). Hay tejidos corporales de formación secuencial que no sufren metabolización debido a su composición química, como por ejemplo las garras, plumas, barbas, bigotes o vibrisas (formados de queratina) y dientes (de dentina), por lo que se convierten en archivos inalterados de información de mediano o largo plazo (Rubenstein y Hobson, 2004; Hall-Aspland *et al.*, 2005). Con esa información secuencial se pueden discernir cambios en el uso de hábitats y el tipo de

recursos alimenticios que los animales consumen a lo largo de periodos considerables en un sitio o durante su ciclo migratorio; incluso es posible determinar si han sido sometidos a periodos de hiper e hipotrofia (Hirons *et al.*, 2001b). Por ejemplo, las bandas de dentina en los dientes de mamíferos marinos se asocian a cambios periódicos en la tasa de calcificación como resultado de variaciones estacionales en la intensidad de alimentación de los individuos (McLaren, 1958); por lo tanto y una vez que se conoce la tasa de depositación de estas capas (meses, años) los valores isotópicos de estas bandas se usan para identificar la variación interanual de la dieta (Hobson y Sease, 1998; Hobson *et al.*, 2004; Newsome *et al.*, 2006).

Un caso interesante lo representan las vibrisas (bigotes), que pueden integrar información acumulada y secuencial de uno o más años dependiendo de la especie (Hirons *et al.*, 2001a; Lewis *et al.*, 2006), y por tanto permiten rastrear cambios estacionales e interanuales en la alimentación del animal (Darimont y Reimchen, 2002; Bearhop *et al.*, 2004; Hall-Aspland *et al.*, 2005).

La vibrisa es un tejido que se encuentra en todos los pinnípedos (otáridos, fócidos y odobénidos). En los otáridos, crecen aparentemente a una tasa constante, y no se muda como ocurre con el pelaje, por lo que pudieran registrar información alimenticia del animal por varios años ($\sim 3-5$ años) y permitir con ello la reconstrucción de la historia trófica del individuo asociada al cambio estacional (Hirons *et al.*, 2001a; Hall-Aspland *et al.*, 2005).

Todos los mamíferos pasan por un periodo de dependencia alimenticia llamado lactancia. El lobo marino de California, es un otárido que presenta una lactancia prolongada, generalmente de un año (Riedman, 1990) aunque en ocasiones llega a extenderse hasta dos o tres (Newsome *et al.*, 2006; Elorriaga-Verplancken y Auriol-Gamboa, 2008). El extenso periodo de lactancia obliga a las hembras a permanecer en las áreas reproductivas durante todo el año y en caso de tener crías consecutivas, el periodo de residencia en la misma localidad se extiende por varios años o toda la vida. Esta característica de la historia de vida de las hembras de lobo marino, hace que sean altamente filopátricas, es decir, que pasan la mayor parte de su vida en una zona o región.

Dada la alta filopatría de las hembras, es posible predecir que con el tiempo se establezcan áreas de alimentación específicas en cada colonia o grupo de colonias (Szteren y Auriol-Gamboa, 2011), lo que podría derivar en algún grado de especialización en el aprovechamiento de los recursos locales (García-Rodríguez y Auriol-Gamboa, 2004; Porras-Peters *et al.*, 2008; Szteren y Auriol-Gamboa, 2011).

Esta característica juega un papel clave en la determinación de la estructura de la cadena alimentaria de la especie (Bowen, 1997), por lo que conocer su dieta y variación en el tiempo puede aportar información sobre la plasticidad de estos organismos ante

cambios estacionales y climáticos, así como al grado de estrés al que están expuestos (Aurioles-Gamboa y Camacho-Ríos, 2007; Páez-Rosas y Aurioles-Gamboa, 2010).

Dado que la medición de plasticidad de la dieta, entendida como la habilidad de un organismo o población a adaptarse a cambios en el tipo y calidad de su alimento, es de gran importancia para entender la respuesta que tienen distintas especies ante el inminente cambio climático, en el presente estudio se propone 1) explorar si existen variaciones en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de las vibrisas de hembras adultas de *Z. californianus* de la isla San Esteban (SE), Golfo de California y 2) determinar si estas variaciones están acopladas al cambio estacional de temperatura y productividad marina.

Las diferencias isotópicas esperadas pueden ser tanto de los valores absolutos de cada isótopo, como del grado de la variación de los ciclos observados. Los valores absolutos permitirán determinar el cambio de nivel trófico de las presas y el tipo de ambiente en que son consumidas, mientras que las variaciones cíclicas (estacionales) podrán ser interpretadas en relación a la variación temporal de parámetros oceanográficos como la concentración superficial de clorofila “a” (Clo-*a*) y temperatura superficial del mar (TSM). Es decir, el grado de acoplamiento entre la variabilidad ambiental y la variación isotópica a lo largo de las vibrisas.

2. Antecedentes

El lobo marino de California es el único pinnípedo que se reproduce en el GC y su población mínima ha sido estimada entre 24,062 y 31,159 individuos (Szteren *et al.*, 2006) de los cuales, aproximadamente el 80 % se concentra entre las provincias de RA, NGC y AGC. De acuerdo a Auriolles-Gamboa y Zavala-González (2004), la gran concentración en estas zonas está determinada por la riqueza alimentaria de sus aguas, ya que en esta zona se concentra una mayor cantidad de nutrientes esenciales para el fitoplancton lo que tiene un efecto directo en los siguientes niveles de la cadena trófica (Álvarez Borrego *et al.*, 1978).

Las características ambientales determinan el hábitat donde los lobos marinos mantienen sus colonias y se alimentan. De acuerdo con Gentry *et al.* (1986), los sitios de reproducción de los otáridos de aguas templadas y principalmente de aguas tropicales tienden a estar cerca de las zonas de surgencias, a menudo asociadas a masas de agua frías. La temperatura afecta principalmente la abundancia y distribución de las presas, mientras que la concentración de Clo-*a* es un indicador de la productividad primaria y, en consecuencia de la abundancia de las presas que los lobos marinos consumen a través de una cascada trófica ascendente (Soto *et al.*, 2004; Le Boeuf y Crocker, 2005).

Se sabe que los lobos marinos depredan sobre una amplia variedad de presas, tanto pelágicas como bentónicas, las que pueden variar temporal y geográficamente; algunas investigaciones sugieren que el lobo marino de California tiene una dieta muy variada, por lo que se le considera un depredador oportunista (Auriolles-Gamboa *et al.*, 1984). Sin embargo, otros trabajos indican que *Z. californianus* es una especie que tiende a seleccionar sus presas, prefiriendo peces que formen cardúmenes grandes (Lowry *et al.*, 1991; García-Rodríguez y Auriolles-Gamboa, 2004; Porras-Peters *et al.*, 2008) por lo cual también se ha definido como especialista plástico (Lowry *et al.*, 1991).

En la RA se le puede encontrar en seis colonias reproductivas (Fig. 1) (Auriolles-Gamboa y Zavala-González, 2004), siendo la colonia de San Esteban la más poblada con alrededor de ~ 5600 individuos (Szteren *et al.*, 2006). Esta colonia exhibe una alta producción de críos y se considera que en los últimos años está en aumento (Szteren y Auriolles-Gamboa, 2011). A pesar de ser la colonia más grande del Golfo, poco se conoce a cerca de su ecología trófica, pues son escasos los estudios que se han llevado a cabo sobre su dieta. Los resultados reportados por García-Rodríguez y Auriolles-Gamboa (2004) y Porras-Peters *et al.* (2008) demuestran que los lobos marinos de SE utilizan una alta variedad de hábitats marinos para alimentarse, dentro de la zona pelágica consumen presas como *Sardinops sagax*, *Trachurus symmetricus* y algunas especies de la familia Myctophidae; dentro del sistema

bento-pelágico se alimentan de especies como *Trichiurus lepturus*; mientras que en el ambiente demersal ingieren especies como *Sebastes macdonaldi*, *Merluccius angustimanus*, *Haemulopsis leuciscus* y algunas especies de la familia Synodontidae; dentro de la dieta también destacan cefalópodos como *Dosidicus gigas*, *Gonatus spp.*, *Histioteuthis spp.* y *Octopus spp.* Esta dieta muestra una variación durante todo el año (García-Rodríguez y Auriol-Gamboa, 2004) posiblemente modulada por las variaciones estacionales en la diversidad, abundancia y calidad alimenticia de las presas Rodríguez-Valenzuela (2009).

Los estudios anteriores se realizaron por medio del análisis de excretas que se basa en la identificación de estructuras duras como otolitos de peces y picos de cefalópodos. Estas partes duras tienen una morfología específica a nivel de especie por lo que se puede cuantificar la importancia relativa de cada presa en la dieta de los lobos marinos. La estimación de la importancia relativa adolece sin embargo de sesgos por la digestión diferencial de estas estructuras (Reynolds y Aebischer, 1991; Darimont y Reimchen, 2002).

El análisis de isótopos estables de carbono y nitrógeno es una alternativa de gran alcance ya que los valores isotópicos obtenidos de los tejidos animales son el reflejo de los registros promedios de la dieta, lo que permite eliminar algunas de las deficiencias de los estudios tradicionales (Dalerum y Angerbjörn, 2005).

Las estimaciones cuantitativas de las fuentes de alimento se pueden hacer utilizando diferentes tejidos o en su caso, el factor de discriminación (^{13}C o $^{15}\text{N}_{\text{dieta-tejido}}$) específico de cada tejido (Newsome *et al.*, 2006). En la mayoría de los casos, los consumidores están enriquecidos en el isótopo pesado (^{13}C o ^{15}N) relativo a sus dietas (Fry, 1988). Para tejidos similares o cuerpos enteros, el enriquecimiento es aproximadamente 1 ‰ para el carbono y entre 2 y 5 ‰ para el nitrógeno (Newsome *et al.*, 2006, 2010). El enriquecimiento del isótopo pesado que se presenta con el aumento del nivel trófico, se ha utilizado ampliamente para caracterizar las redes alimenticias terrestres y marinas y determinar la fuente(s) principal de la presa y la zona de forrajeo para carnívoros y herbívoros en diferentes ecosistemas (Hobson *et al.*, 1994; Michener y Schell, 1994).

En los pinnípedos el factor de discriminación de algunos tejidos ha sido estimado mediante experimentos de alimentación controlada y los resultados son relativamente consistentes entre taxones (Dalerum y Angerbjörn, 2005; Newsome *et al.*, 2010). El análisis en diferentes tejidos de fócidos arrojó valores de $\delta^{15}\text{N}$ que van desde 1.7 ‰ para células rojas de la sangre hasta 3.1 ‰ para el hígado (Hobson *et al.*, 1996; Lesage *et al.*, 2002), mientras que para las vibrisas se encontró un factor de discriminación de 2.8 ‰ (Hobson *et al.*, 1996).

En la investigación llevada a cabo por Mote-Herrera (2011), además se planteó que la variación ambiental está expresada en las vibrisas, partiendo del siguiente supuesto: sí la

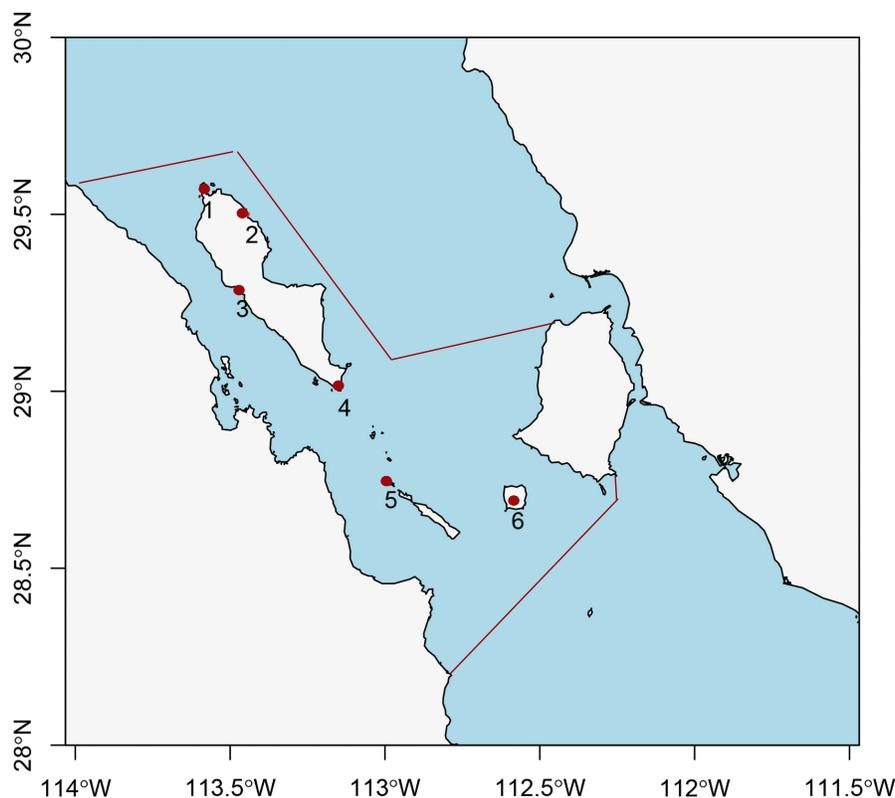


Figura 1: Localización de las seis colonias reproductoras de lobo marino de California en la RA, Golfo de California. 1. Isla Granito, 2. Los Cantiles, 3. Los Machos, 4. El Partido, 5. El Rasito y 6. San Esteban.

señal isotópica que se registra en un tejido es producto del alimento ingerido y, dado que el ambiente influye en la disponibilidad de las presas, entonces los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ que se cuantifican en un tejido son el reflejo de las condiciones ambientales que inciden en la zona. Se logró determinar que el perfil isotópico de $\delta^{15}\text{N}$ presente a lo largo de la longitud de la vibrisa de *Z. californianus* tiene una correlación significativa con la variación ambiental que se presenta en el sistema a lo largo del tiempo, y que se presenta con un desfase de 4-5 meses (2). Sin embargo, los resultados de este estudio han sido difíciles de interpretar debido a que las vibrisas fueron colectadas en distintos periodos de tiempo, de animales de ambos sexos y probablemente de distinto estado de madurez sexual; además de que este trabajo se llevó a cabo en dos localidades con características ambientales y oceanográficas diferentes (Bahía Magdalena y Bahía de La Paz, BCS, México), lo que derivó en un sesgo en los resultados.

En la presente investigación también se va a medir la relación entre el perfil de $\delta^{15}\text{N}$

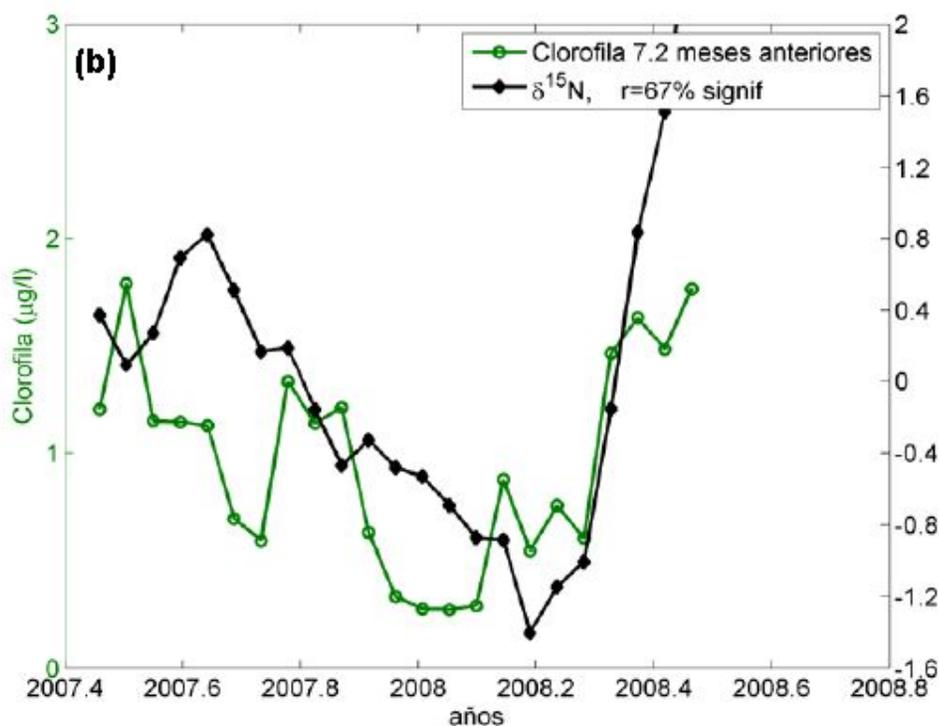


Figura 2: Correlación entre el perfil isotópico y la Clo-*a* lo largo del tiempo observada en una vibrisa de hembra de lobo marino de California de la localidad de Bahía Magdalena, BCS, México. Tomada de de [Mote-Herrera \(2011\)](#).

y $\delta^{13}\text{C}$ con relación a la variabilidad ambiental pero en vibrisas colectadas en el periodo de una semana para eliminar el sesgo asociado a la fecha de colecta. Todas las muestras fueron tomadas en una sola colonia para tener una mejor caracterización de las variables ambientales que inciden en la zona. Para lo anterior, se eligió la lobera de la isla SE, la colonia reproductora más grande del GC y que se encuentra localizada en la RA. Ésta zona se caracteriza por la presencia de varios frentes térmicos provocados por la turbulencia que se origina durante el paso de la marea a través de los estrechos del archipiélago ([Danell-Jiménez et al., 2009](#)). Entre la Península de Baja California y las islas de San Lorenzo y SE se produce una fuerte corriente de marea además de marcados cambios estacionales de temperatura que van desde los 15 °C en invierno hasta los 30 °C en verano ([Inda-Díaz et al., 2010](#)). Estas características oceanográficas generan la existencia de distintos hábitats o ambientes con potenciales diferencias de presas, que podrían ser aprovechados por la población y generar dietas distintas.

Las vibrisas se seleccionaron exclusivamente de hembras, ya que al ser residentes permanentes aseguró que la señal isotópica fuera producto de las condiciones de la zona y por último se confirmó que todas fueran hembras adultas reproductoras ya que tenían cría al momento de su captura.

3. Justificación

Las relaciones isotópicas de carbono (^{12}C - ^{13}C) y nitrógeno (^{14}N - ^{15}N) en los tejidos animales son el reflejo de la dieta que presentan los individuos. Esta dieta es modulada por las condiciones ambientales que prevalecen en el ecosistema, de modo que cuando estas condiciones no son favorables todos los niveles de la cadena trófica son afectados, en especial los depredadores tope. Algunas especies tenderán a desarrollar nuevas estrategias alimenticias con la finalidad de compensar la escasez y/o baja calidad de sus presas.

Detectar la incidencia de las condiciones ambientales sobre los organismos puede ser difícil, debido a las complejas interacciones que se producen y a las restricciones logísticas que limitan el rango y mediciones factibles de las regiones oceánicas. Los isótopos estables podrían ser una herramienta que nos permita obtener este tipo de información si se corrobora que las firmas isotópicas de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ presentan una correlación con las variables ambientales que inciden en la zona.

En el presente trabajo se ha planteado determinar si los cambios en la señal isotópica presentes a lo largo de la longitud de las vibrisas del lobo marino de California reflejan los cambios de las condiciones ambientales presentes en el ecosistema.

Comprender el grado de ajuste entre las razones isotópicas de C y N en las vibrisas y los factores ambientales permitirá medir de manera indirecta el grado de adaptación de cada animal analizado al medio que lo rodea.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Determinar la relación de la variación de isótopos estables de C y N en vibrisas de hembras de *Zalophus californianus* de la isla San Esteban, Sonora, México, con la variabilidad ambiental.

4.2. Objetivos particulares

- Construir la variación de isótopos estables de C y N a lo largo de las vibrisas de hembras adultas y definir si existe un patrón (frecuencia) estacional isotópico en las vibrisas de *Z. californianus* de la isla San Esteban
- Analizar las variaciones en la concentración de Clo-*a* y la TSM derivadas de imágenes satelitales en la región adyacente a isla SE
- Relacionar las variaciones isotópicas de las vibrisas con las variaciones de Clo-*a* y la TSM de la zona.
- Estimar el nivel y la amplitud trófica de hembras de lobo marino de SE con base en el análisis de isótopos estables de C y N en vibrisas.

5. Área de estudio

El Golfo de California es un mar con más de 1400 km de largo y su anchura en la región interior va de 150 a 200 km. Se divide en varias provincias, indicadas en la figura 3: (a) zona de entrada, (b) Sur del Golfo de California (SGC), (c) Archipiélago o zona de las Grandes Islas, (d) Norte del Golfo de California (NGC) y (e) Alto Golfo de California (AGC) (Lavín y Marinone, 2003). El Golfo de California es un mar subtropical que presenta una productividad primaria excepcionalmente alta (Zeitzschel, 1969) debido a la gran disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica originada por la circulación termohalina (Bray y Robles, 1991), mezcla vertical (Álvarez Borrego y Lara-Lara, 1991) y surgencias costeras que se presentan principalmente en invierno y primavera (Badan-Dangon *et al.*, 1985; Álvarez Borrego *et al.*, 1978). Estas condiciones varían a lo largo del Golfo y en función de la estación climática, por lo que el Golfo de California es una de las regiones pesqueras más productivas de México (Zeitzschel, 1969) y es considerado a nivel mundial como una región altamente relevante para la conservación y el manejo sustentable (Lluch-Cota *et al.*, 2007).

La Isla San Esteban se sitúa dentro del Golfo de California en la provincia del Archipiélago, a 11.6 km al sur de la costa SW de la Isla Tiburón y tiene una área de 42 km² (Fig. 1) (Carreño y Helenes-Escamilla, 2002).

Las cuencas de "San Esteban", "Tiburón" y "San Pedro Mártir", alcanzan profundidades de 900 m. Ésta es una de las características batimétricas más sobresalientes de la región, y enmarca un régimen hidrográfico único. Las cuencas funcionan como embudos y restringen la circulación entre las áreas oceanográficas Golfo norte y Golfo central. Por otro lado, actúan como punto de generación de la mezcla intensa de masas de agua por fuertes corrientes de marea. Se presenta una gran mezcla de agua entre las islas San Lorenzo y San Esteban, alcanzando profundidades mayores a 500 metros, por lo que se acarrea agua fría y rica en nutrientes (Simpson *et al.*, 1994).

La situación geográfica de las grandes islas (Tiburón y Ángel de la Guardia), produce turbulencia en sus cercanías, principalmente a causa de las intensas corrientes de marea, las cuales generan procesos de mezcla considerables así como surgencias y, por ende, las bajas temperaturas que se presentan a lo largo del año. Los vientos del noroeste causan surgencias en la costa este durante el invierno y primavera y los vientos del sur causan surgencias en la costa oeste durante el verano (Lluch-Cota, 2000). Además se reportan marcados cambios estacionales en el nivel del mar, temperatura y salinidad (Ripa y Marinone, 1989), así como una fuerte disipación de energía de las mareas (Argote *et al.*, 1995).

Entre los estrechos de las islas y los umbrales se producen zonas con aguas frías de

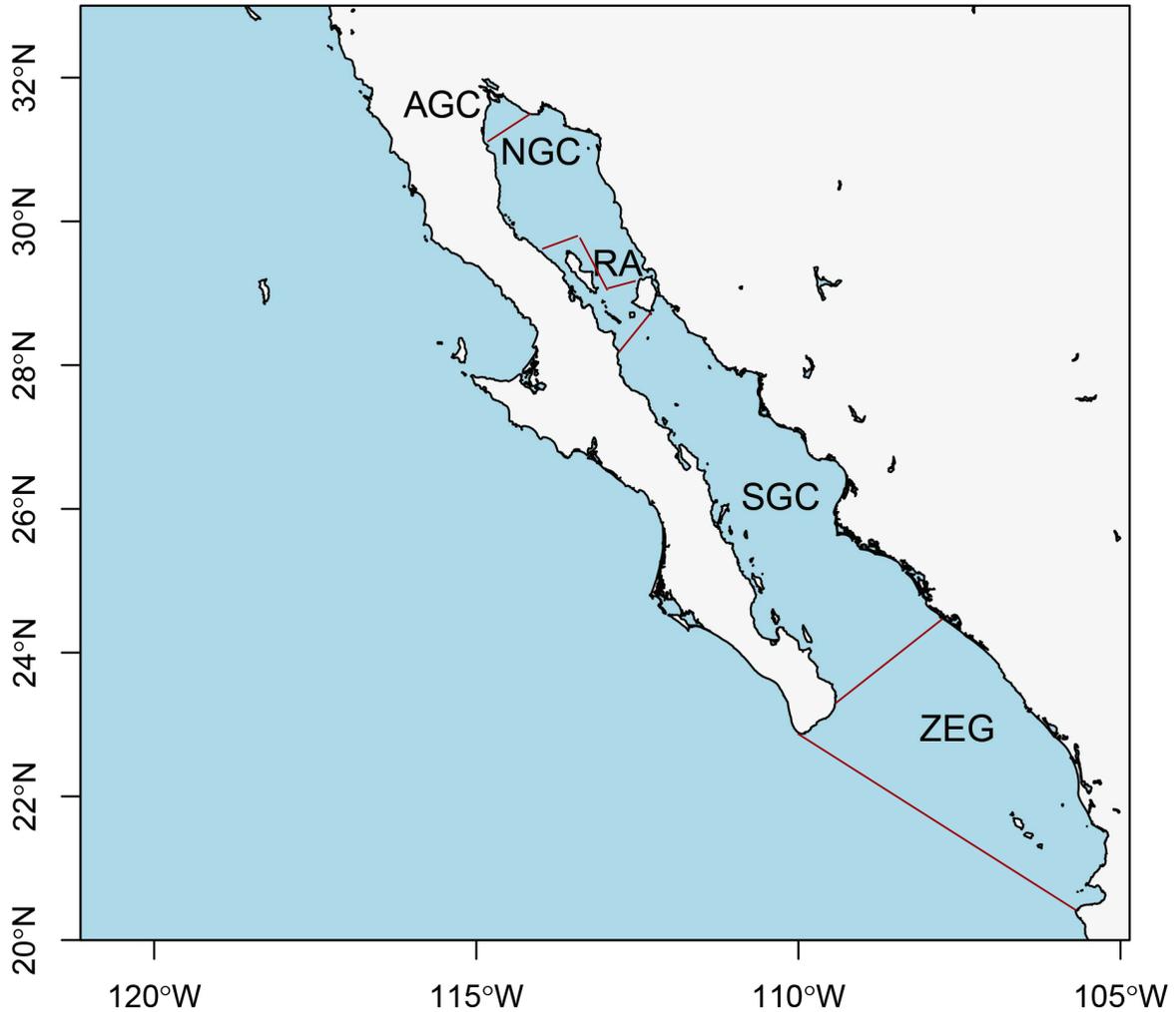


Figura 3: Golfo de California y las cinco provincias en las que se ha dividido de acuerdo a Lavín y Marinone (2003).

satélite (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1994) y ricas en CO_2 (dióxido de carbono). En la RA no solo existe un transporte vertical de carbono inorgánico, sino también de nutrientes (Álvarez Borrego *et al.*, 1978; Gaxiola-Castro *et al.*, 1995), y de metales traza (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001). Este aporte de nutrientes es continuo y muy probablemente modulado quincenalmente por las mareas (Hidalgo-González y Álvarez Borrego, 2001; Martínez-Díaz-de León *et al.*, 2006), registrándose los valores máximos de clorofila durante el verano (Valdez-Holguín *et al.*, 1999). Estas características oceanográficas particulares en el área de la RA han generado un ambiente ideal para el establecimiento de poblaciones ícticas de origen boreal (Castro-Aguirre *et al.*, 1995).

6. Material y Métodos

6.1. Fase de campo

Durante la temporada reproductiva 2011, en el periodo del 22 al 28 de Junio se capturaron once hembras adultas de *Z. californianus* en la lobera de la isla SE (Fig. 1); se eligieron hembras que tuvieran cría para asegurar el estatus de madurez sexual y reproductivo y así reducir la variabilidad interindividual asociada al sexo y categoría de edad. Las capturas se realizaron con redes tipo mariposa de mango largo, diseñadas especialmente para capturar lobos marinos. Las hembras fueron anestesiadas para facilitar su manejo y la obtención de muestras. Un grupo de veterinarios expertos en fauna silvestre del Zoológico de Chicago se encargó de la anestesia y manejo de los individuos. De cada hembra se tomaron tres vibrisas (las más largas) con pinzas para extraerlas desde la raíz y obtener la información isotópica completa. En los días de muestreo se encontró una hembra muerta a la que se le tomó una vibrisa, esta hembra fue identificada como V11 dentro de los resultados. Las muestras se colocaron en sobres de papel etiquetados con la información correspondiente a la fecha y lugar de muestreo así como la categoría de edad, sexo, tipo de muestra y el número de identificación asignado a cada individuo (ID).

Durante la misma salida se colectaron distintas especies de peces, bivalvos, macroalgas, equinodermos, cefalópodos y aves en los alrededores de la isla. Estas muestras fueron colocadas en bolsas de plástico etiquetadas con la información correspondiente a la zona y día de colecta y preservadas en congelación hasta su análisis.

Por otra parte, en mayo del 2013 se llevó a cabo un muestreo de introspección de cardúmenes pelágicos a lo largo del GC, en este muestreo se capturaron diferentes especies de peces mediante una red de arrastre con una luz de malla de 3/4 de pulgada. De este muestreo se obtuvieron algunos peces colectados en las zonas aledañas a SE. Dentro de las especies muestreadas están *Sardinops sagax*, *Scomber japonicus*, *Benthoosema panamense*, *Argentina sialis*, *Oligoplites refulgens* y *Merluccius productus*. La colecta de las diferentes especies permitió obtener información adicional que sirvió para estimar el nivel trófico de los animales y la zona de alimentación.

6.2. Fase de laboratorio

6.2.1. Preparación de las vibrisas

Con la finalidad de abarcar un mayor tiempo en cuanto al espectro trófico reflejado en las vibrisas, se analizó sólo la vibrisa más larga de cada hembra. A cada vibrisa se le dio un tratamiento previo al análisis isotópico en el Laboratorio de Ecología de Pinnípedos del

CICIMAR, que consistió en medir la longitud de la vibrisa y retirar la cutícula que envuelve a la raíz para eliminar los lípidos presentes en esta capa. Se ha demostrado que los lípidos están enriquecidos en ^{12}C y por lo tanto pueden sesgar los valores de $\delta^{13}\text{C}$ haciéndolos más negativos. Después se lavó con jabón libre de fosfatos y agua destilada para desechar impurezas y con un cortaúñas se cortó en fragmentos cuyo peso osciló entre los 0.8 y 1.2 mg (por requerimientos del laboratorio de isótopos). Para contar con una referencia de la longitud de los fragmentos seccionados, después de cada cinco cortes la vibrisa era medida en su totalidad. Cada fragmento se colocó en un vial de 0.2 ml previamente marcado con el ID de la hembra y el número correspondiente al fragmento. A los viales se le añadió una solución de hexano-acetona (1:1) hasta llenarlos completamente con el fin de eliminar rastros de lípidos y contaminantes. Para la extracción total de la solución de hexano-acetona, los viales fueron colocados en la campana de extracción por aproximadamente cuatro horas.

6.2.2. Preparación de los muestras de peces, crustáceos y moluscos

De las diferentes especies colectadas de aves, peces, cefalópodos, crustáceos y algas se tomó un pequeño fragmento de tejido blando, se colocó en una caja Petri y se lavó en tres tiempos con agua destilada. Posteriormente cada caja Petri se colocó en la estufa a 60°C hasta que la muestra se secase completamente (aproximadamente 96 horas). Una vez seca, la muestra se maceró y homogenizó en un mortero de ágata y se colocó en un vial etiquetado con el número de identificación de la especie.

6.3. Análisis isotópico

Los fragmentos de vibrisa, así como entre 0.8 y 1.2 mg de tejido de las otras especies se colocaron en micro-capsulas de estaño de 3.3 x 5 mm. Las cápsulas fueron pesadas en una microbalanza (Sartorius microbalance, con una precisión de $0.1\ \mu\text{g}$) y posteriormente colocadas en un contenedor especial (tray) para su traslado.

La determinación de las razones isotópicas de carbono y nitrógeno a través de la combustión de CO_2 y N_2 (nitrógeno) se llevó a cabo en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de California, Davis mediante el analizador elemental de interfaz PDZ Europa ANCA-GSL con el espectrómetro de masas de relación isotópica PDZ Europa 20-20 y en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de Wyoming mediante el analizador elemental EA-IRMS. En el laboratorio de la Universidad de California se analizaron las muestras de tres vibrisas, así como las muestras de todos los peces, crustáceos, moluscos y macroalgas; mientras que las muestras de las otras ocho vibrisas se

analizaron en la Universidad de Wyoming. El análisis en ambos laboratorios consiste en cargar las muestras en un inyector automático que está conectado al Analizador Elemental (EA por sus siglas en inglés). El EA está acoplado a un Espectrómetro de Masas de Razones Isotópicas (IRMS por sus siglas en inglés) a través de una interfaz de escisión abierta. Durante este proceso, la muestra pesada se deja caer en un reactor de combustión de Cr_2O_3 (óxido de cromo (III)) a $1050\text{ }^\circ\text{C}$ empujado por una corriente portadora de helio que ha sido enriquecido con O_2 (oxígeno). Bajo estas condiciones, la cápsula de estaño se inflama, elevando la temperatura de la muestra a $1800\text{ }^\circ\text{C}$, formando H_2O (agua), CO_2 (dióxido de carbono) y N_2 (nitrógeno). Cualquier gas formado que contenga halógenos o azufre es removido químicamente y los productos de combustión restantes son enviados a un reactor de reducción de Cu^+ (cobre) a $650\text{ }^\circ\text{C}$, donde los productos de combustión incompleta (NO_x , CO , etc.) se reducen y el O_2 en exceso se elimina. El agua es entonces separada químicamente del helio. Los gases de producto final (N_2 , CO_2) se separan mediante una columna de cromatografía de gases antes de entrar en el IRMS. Los gases puros de referencia (N_2 y CO_2 en un grado altamente puro) entran en el espectrómetro de masas cada 24 muestras para garantizar la calibración adecuada de la masa (Más información en: Universidad de Davis y Universidad de Wyoming).

Las proporciones isotópicas resultantes de cada muestra se convirtieron y reportaron en los valores convencionales delta (δ), en partes por mil, mediante la siguiente fórmula:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ o } \delta^{15}\text{N} = \left[\left(\frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estandar}}} \right) - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

Donde $\delta^{15}\text{N}$ o $\delta^{13}\text{C}$ es la proporción expresada en partes por mil (‰) entre el contenido de ^{15}N o ^{13}C de la muestra y la del estándar. R_{muestra} y R_{estandar} son las razones de $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ o $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de la muestra y el estándar. Un valor positivo o alto de δ indica que la muestra presenta más isótopos pesados que el estándar, mientras que un valor negativo o bajo de δ indica que la muestra presenta menos concentración de isótopos pesados que el estándar (Haines y Montague, 1979). De esta manera se asegura que todos los datos entre los diferentes estudios y laboratorios sean comparables.

6.4. Eliminación de fragmentos de la punta

Previamente se mencionó que los fragmentos de vibrisa deben tener un peso específico para su análisis isotópico, por lo que para cumplir con esta condición fue necesario cortar la vibrisa en fragmentos de distintas longitudes, siendo los fragmentos de la punta los más largos debido a que esta parte de la vibrisa es más delgada y ligera. El tener fragmentos de distintas longitudes propició que el tiempo de información isotópica contenida en cada

uno fuera distinto, es decir, suponiendo que en un fragmento pequeño está contenida un mes de información, en un fragmento más largo la información contenida es mayor. Bajo esta premisa, se contempló un escenario difícil el tratar de trabajar series de tiempo con distintas ventanas temporales.

Por lo que se planteó la pregunta sobre qué tan factible sería retirar fragmentos de la punta sin que se viera comprometido el análisis principal de la tesis. Para despejar esta interrogante se tomó la decisión de primero analizar isotópicamente sólo tres vibrisas. Con los valores isotópicos de estas tres vibrisas se realizó un análisis exploratorio mediante una serie de Fourier utilizando la rutina *Periods* (González-Rodríguez, en preparación), desarrolla mediante el lenguaje de programación [MATLAB \(2010b\)](#). Este análisis consiste en un ajuste armónico a un ciclo descendiente de una serie de tiempo, mediante la función:

$$X = A \cdot \cos(\omega t - F_i) \quad (2)$$

Donde:

A = amplitud

$\omega = 2\pi \cdot \text{periodo}^{-1}$

F_i = fase

Cada vibrisa fue sometida a este análisis armónico (Apéndice A) en varias ocasiones; una con el total de datos isotópicos y las otras con datos parciales (se retiraban segmentos de cinco fragmentos). En cada uno de los análisis se obtuvieron diferentes periodicidades y cada nueva periodicidad era comparada con la inicial, con el fin de buscar que aún se pudieran observar los rasgos de la periodicidad inicial. El análisis se detuvo cuando se observó que los periodos eran diferentes a los iniciales.

Una vez que se concluyó con este análisis se determinó que era posible reducir el número de muestra a analizar y sobre todo permitió eliminar la incertidumbre que generaba la punta de la vibrisa. Se procedió a analizar isotópicamente el resto de las vibrisas.

6.5. Variables ambientales

Se relacionó la variación de los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ a lo largo de la vibrisa con las siguientes variables:

6.5.1. Concentración superficial de Clo-*a* y valores de TSM

Estos valores se infirieron a partir de imágenes satelitales nivel 3 (L3) captadas por el sensor MODIS-AQUA con una resolución de 4x4 km (oceancolor.gsfc.nasa.gov) a unos

500 m de la isla SE. Estos datos de imágenes están en el formato hierarchical data format (HDF; <http://hdfgroup.org>) y para poder hacer las extracciones de este tipo de archivos, así como de la zona de interés, se empleó el lenguaje de programación **MATLAB** (2010b). Las imágenes seleccionadas corresponden a compuestos de ocho días, desde enero de 2005 hasta diciembre del 2011 (46 datos semanales por año).

6.6. Ajuste estacional

El ajuste estacional a las variables de TSM y Clo-*a*, así como el de los perfiles de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ se realizó mediante la rutina Periods (González-Rodríguez, en preparación), la cual nos permitió identificar todos los componentes armónicos y parámetros de una serie de tiempo (Ec. 3).

$$Xt = T_t + Y_t + Et \quad (3)$$

Mediante Periods se encontraron los principales parámetros de los componentes armónicos de Fourier (amplitud, periodo y fase). En esta rutina, el proceso de identificación de los periodos se detiene cuando la adición de un nuevo armónico para el modelo no puede producir un resultado estadísticamente significativo. Las periodicidades de salida de la forma de descenso cíclico pueden ser interpretadas o relacionadas con otros eventos ambientales conocidos ya que se encuentran de forma secuencial por su orden de importancia en la explicación de los residuos.

6.7. Tasa de crecimiento de la vibrisa

La tasa de crecimiento de las vibrisas se estimó de acuerdo al modelo de crecimiento de von Bertalanffy y de un modelo lineal; estos dos modelos tienen diferentes criterios en cuanto al crecimiento que presenta un organismo o en nuestro caso, un tejido. El modelo lineal considera que el crecimiento de la vibrisa es continuo por lo que los segmentos de iguales longitudes representan un intervalo de tiempo similar en cualquier parte de la vibrisa (Hirons *et al.*, 2001a); mientras que en el modelo de von Bertalanffy la relación de longitud y el tiempo está dada de forma exponencial, considerándose que hay un crecimiento más rápido al inicio y que la asíntota se alcanza al aproximarse a la longitud máxima de la vibrisa (Hall-Aspland *et al.*, 2005). En el modelo sencillo de von Bertalanffy, la relación entre la longitud (L) y el tiempo (t) viene dada por:

$$L_t = L_y * [1 - \exp(-k(t-t_o))] \quad (4)$$

Donde:

L_t = Longitud a la edad t

L_y = Longitud máxima promedio analizada isotópicamente

k = Tasa de crecimiento

t = Edad

t_0 = Edad hipotética cuando la longitud es igual a cero

Para determinar la relación de los parámetros ambientales y los perfiles isotópicos de C y N registrados a lo largo de la vibrisa era necesario determinar el tiempo que representaba cada fragmento de la vibrisa, por lo que la ecuación se resolvió matemáticamente para obtener la edad de la vibrisa como sigue:

$$t = t_0 - \left(\frac{1}{k}\right) * \ln \left(1 - \left(\frac{L_t}{L_y}\right)\right) \quad (5)$$

Dentro de los parámetros que se necesitaron para calcular la edad de la vibrisa hacía falta la estimación de k . Esta se obtuvo mediante un método iterativo (Solver, aplicación para Excel) en el cual progresivamente se van calculando aproximaciones a la solución de un problema. En este método se usaron los parámetros conocidos L_t y t .

t se determinó mediante una correlación (Pearson) entre el número de periodos registrados en los perfiles isotópicos de las vibrisas y la longitud (sólo la parte de la vibrisa que fue analizada isotópicamente) de cada una de ellas. [Hirons *et al.* \(2001a\)](#) consideraron que cada oscilación que se presenta en los perfiles isotópicos de las vibrisas es producto de la productividad estacional que se registra en el ecosistema y que por lo tanto cada oscilación corresponde a un año de vida del animal.

El resultado de este proceso, nos indicó que cada dos periodos registrados en los valores isotópicos de nitrógeno de las vibrisas corresponden a un año de vida del animal debido a que en la región del Archipiélago se presentan dos picos de mayor productividad al año, lo cual se ve reflejado en los periodos que se registran en el perfil isotópico del nitrógeno de las vibrisas (Fig. 4). Se usó la longitud promedio que se analizó isotópicamente de las vibrisas para correlacionarla con el número de periodos registrados, esto dio como resultado que en 69 mm de vibrisa se registraron 4 periodos en los valores de nitrógeno lo cual representa dos años ($t = 730$ días). Este tiempo se usó como límite en el modelo iterativo para estimar el valor de k .

Una vez que se obtuvo el valor de k , la estimación del crecimiento de la vibrisa se realizó mediante la función `growth: fitting growth curves to length- or weight-at-age data`, de la paquetería `Fishmethods` ([Nelson, 2013](#)) creada para R ([R Core Team, 2013](#)); en esta

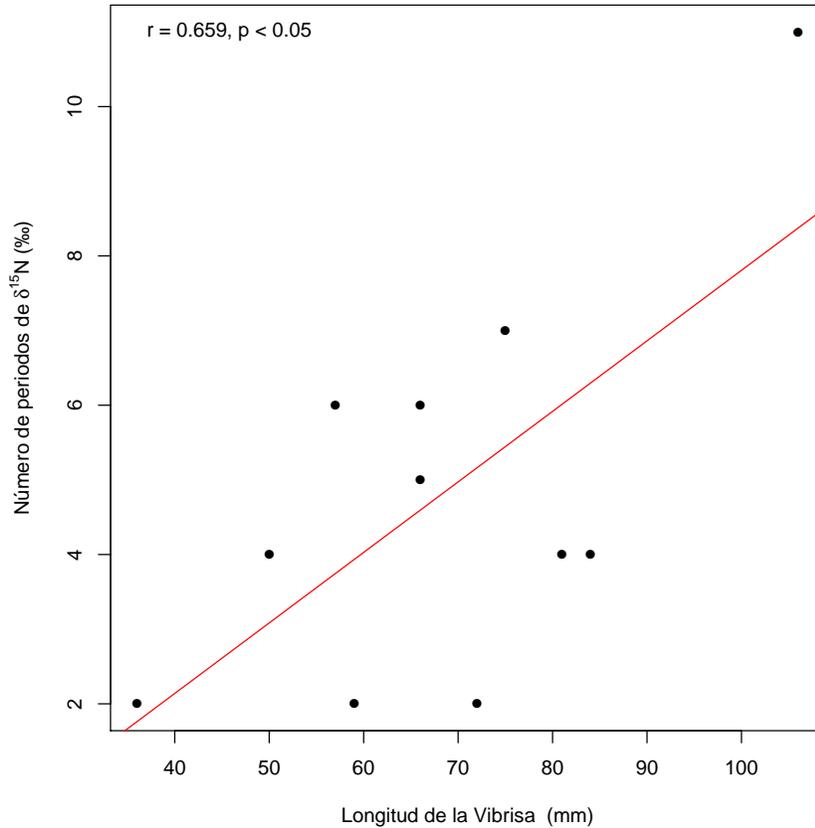


Figura 4: Correlación entre la longitud de la vibrisa y el número de periodos encontrados en el perfil isotópico de $\delta^{15}\text{N}$ de las vibrisas.

función el crecimiento se ajusta a la curva estándar de crecimiento de von Bertalanffy utilizando mínimos cuadrados no lineales. El principio de los mínimos cuadrados establece que de todas las rectas o curvas que representa a una nube de puntos, la que tiene la suma mínima de los cuadrados de las distancias de cada punto a tal recta o curva, es la de mejor ajuste. Se utilizan los cuadrados de las distancias, porque de esa forma no importa si el punto está por debajo o por arriba de la recta o curva de mejor ajuste (Campos Aranda, 2003).

Los parámetros utilizados fueron los siguientes:

$Sinf(L_y)$ = Valor de longitud (analizada isotópicamente) de la vibrisa más larga

$Size$ = El vector de tamaño (longitud) de los datos. Aquí se especificó el modelo a seguir (Ec. 4)

$Unit$ = Tamaño de la unidad igual a 1

k = Valor semilla

$t_0 = 0$

$Age(t)$ = el vector de las edades relacionadas con el vector del tamaño

En el modelo lineal, la tasa de crecimiento se obtuvo mediante el modelo:

$$y = mx + b \tag{6}$$

Donde:

b = ordenada al origen

y = Longitud máxima observada (longitud que se analizó isotópicamente)

x = tiempo (edad, que fue estimada previamente $t = 730$)

m = pendiente de la recta

Dentro de estos parámetros, nos hacía falta la estimación de la pendiente de la recta. Para resolver la incógnita, la ecuación se resolvió de la siguiente manera:

$$m = \frac{x}{y} \tag{7}$$

Donde:

$b = 0$

$y = 69$ mm (longitud promedio de las vibrisas)

m = incógnita

$x = 730$ días

6.8. Relación de los parámetros ambientales y los perfiles isotópicos de las vibrisas

Una vez resuelto el modelo de von Bertalanffy, ya es posible modelar el crecimiento de las vibrisas, sin embargo aún falta ubicar en el tiempo calendario el valor de t_0 . Es decir saber la fecha de inicio de crecimiento de la vibrisa. Esto es indispensable para poder hacer las comparaciones de las variables ambientales y sincronizarlas en el tiempo.

Para este paso de la metodología era importante conocer los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ de las vibrisas, los valores de Clo- a y TSM de la zona adyacente a SE y el valor de la tasa de crecimiento (k) estimada para las vibrisas.

Para conocer qué tiempo representaba cada fragmento de la vibrisa se linealizó el modelo de von Bertalanffy (Ec. 8). En esta parte de la metodología se tomaron en cuenta

las medidas que se registraron cada cinco fragmentos cuando la vibrisa fue cortada, esto sirvió como una referencia para obtener la medida que representó cada fragmento.

$$T_x = T_o - \left(\frac{1}{k}\right) * \log \left(1 - \left(\frac{Longs}{Linf}\right)\right) \quad (8)$$

Donde:

T_x = es el tiempo que representan cinco fragmentos

$T_0 = 0$

$k = 0.005$

$Linf = 107$ (máxima longitud (analizada) de las vibrisas)

$Longs =$ longitud de cada vibrisa

Una vez que los fragmentos de vibrisa tuvieron una medida aproximada se parametrizaron de acuerdo a la Ec. 8. Una vez resuelto el modelo de von Bertalanffy, ya es posible modelar el crecimiento de las vibrisas, sin embargo aún falta ubicar en el tiempo calendario el valor de t_0 . Es decir saber la fecha de inicio de crecimiento de la vibrisa. Esto es indispensable para poder hacer las comparaciones de las variables ambientales y sincronizarlas en el tiempo.

Con el rango de fechas que representa cada vibrisa, se buscaron los valores que registraron la Clo- a y la TSM para esas fechas y, a través de una correlación cruzada, se obtuvo el desfase que se presenta entre la variable ambiental y la respuesta en la señal isotópica. En términos generales, la función de correlación cruzada es una medida útil del grado y fuerza asociativa entre dos series temporales así como la dirección de esta asociación (Gras, 2001)

6.9. Estimación de la amplitud y nivel trófico

La amplitud trófica de las hembras de la lobería de San Esteban fue estimada bajo los criterios de Bearhop *et al.* (2004) y Newsome *et al.* (2007). Estos criterios se basan en la varianza de los valores isotópicos de $\delta^{15}\text{N}$ o $\delta^{13}\text{C}$, dado que ésta es proporcional a la amplitud del nicho trófico de la especie. Si la varianza es alta se considera una población de tipo generalista, en cambio si la varianza es baja se dice que la población presenta una estrategia de alimentación de tipo especialista. El límite propuesto para diferenciar una varianza alta de una baja es de 1 ‰, ya que este valor es mayor al error analítico y por lo tanto puede ser confiable para interpretarse en términos de significados biológicos (Jaeger *et al.*, 2009).

El nivel trófico se determinó mediante el algoritmo de Post (2002), el cual se basa en el enriquecimiento isotópico que presenta un consumidor en sus valores de $\delta^{15}\text{N}$. Este

enriquecimiento típicamente es de 3-4 ‰ relativo a su dieta.

$$NT = \lambda + \frac{(\delta^{15}N_{consumidor} - \delta^{15}N_{base})}{\Delta_n} \quad (9)$$

Donde:

λ = Es la posición trófica del organismo utilizado para estimar $\delta^{15}N_{base}$

$\delta^{15}N_{consumidor}$ = Es una medida directa del consumidor

$\delta^{15}N_{base}$ = Valor de $\delta^{15}N$ de un consumidor secundario

Δ_n = Es el enriquecimiento en $\delta^{15}N$ por nivel trófico

7. Resultados

Las once vibrisas procesadas mostraron longitudes diferentes ($\bar{X} = 15.05$ cm), por lo que el número de fragmentos fue distinto para cada vibrisa (Tabla 1).

Tabla 1: Relación de las vibrisas de *Zalophus californianus* de la lobera de SE. El ID es el código que se le asignó a cada vibrisa y NF el número de fragmentos en que se cortó

Vibrisa (ID)	Longitud (cm)	NF	Fecha de (colecta)
1	16.1	85	23-jun-11
2	15.2	85	23-jun-11
3	15.4	106	23-jun-11
4	17.5	107	24-jun-11
5	16.5	108	24-jun-11
6	15.4	89	24-jun-11
7	13.2	75	26-jun-11
8	12.7	96	26-jun-11
9	11.9	107	26-jun-11
10	19.9	153	27-jun-11
11	11.8	56	27-jun-11
X	14.9 ± 2.5		

7.1. Selección del tamaño mínimo de muestra de la variación isotópica a lo largo de la vibrisa

Con la eliminación secuencial de los fragmentos apicales de las vibrisas, se observó que era posible eliminar hasta un tercio de los fragmentos sin que se afectara de manera significativa la periodicidad que presentan los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$. Esta periodicidad serviría para llevar a cabo el análisis de relación entre las variables ambientales y los valores isotópicos.

A continuación se ejemplifica con una de las vibrisas (V3) el cómo se llegó a ésta determinación (el resultado de las otras dos vibrisas puede verse en el apéndice B).

La vibrisa (V3) constaba de 106 datos isotópicos; con el análisis armónico se obtuvo una serie de periodos para cada isótopo; para el $\delta^{13}\text{C}$ se obtuvieron tres periodos, mientras que para el $\delta^{15}\text{N}$ se obtuvieron siete periodos (Fig. 5).

Una vez que se obtuvieron los periodos iniciales (serie 1, Fig. 5), se procedió a retirar fragmentos de cinco en cinco de la punta hacia la raíz. Para cada nuevo juego de datos se aplicó un análisis armónico, resultando nuevos periodos para cada isótopo que fueron

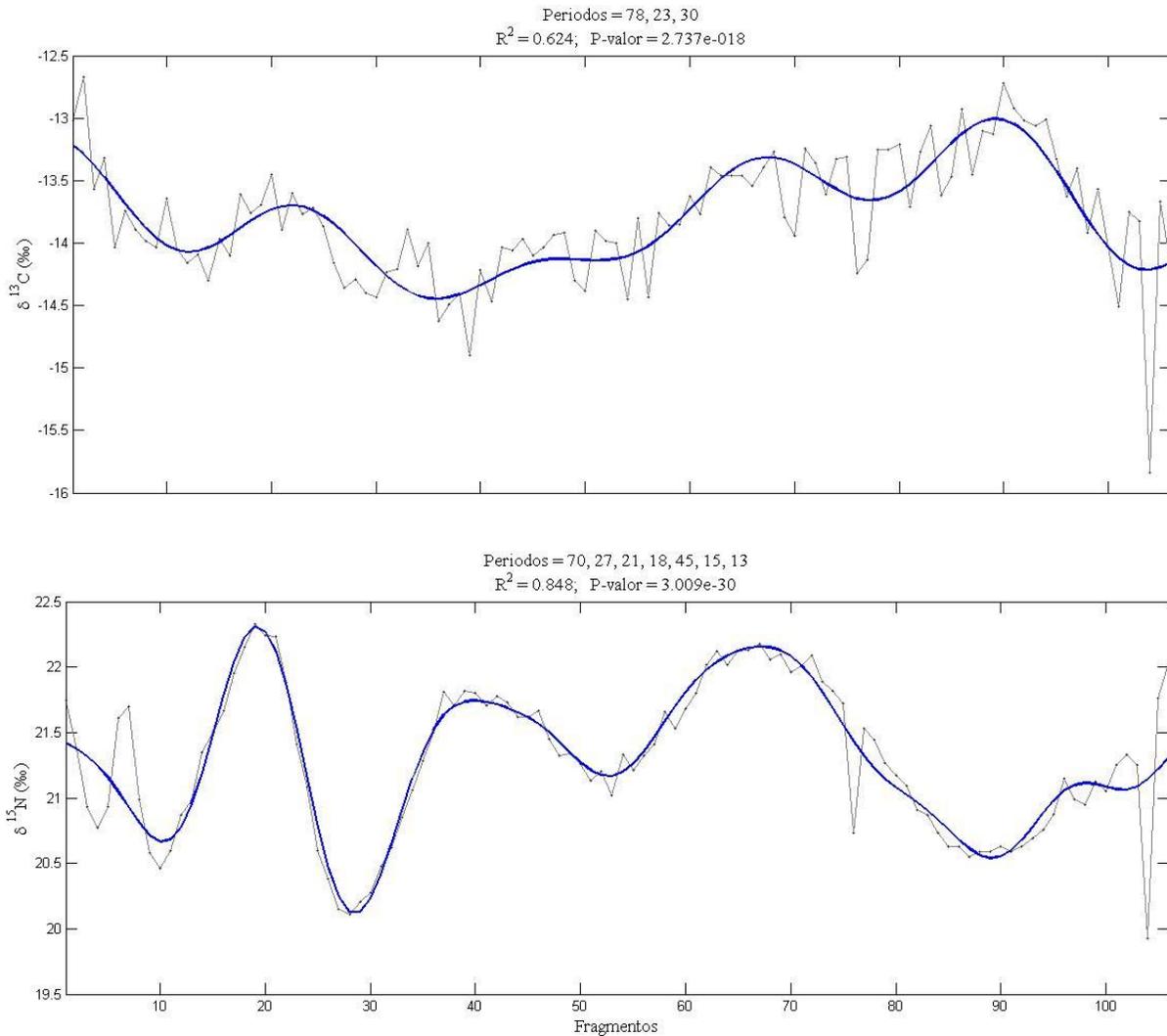


Figura 5: Periodos encontrados en los 106 datos de la vibrisa (V3) mediante el análisis armónico de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ (a) y $\delta^{15}\text{N}$ (b). La R^2 y la línea azul es el ajuste que hace el análisis armónico a los valores isotópicos.

comparados con la periodicidad inicial para constatar que aún se percibía la misma señal. En la tabla 2 se pueden apreciar las diferentes periodicidades que se obtuvieron para cada set de datos.

Este proceso se detuvo una vez que la periodicidad inicial comenzó perderse, es decir, cuando los números de la serie 1 dejaron de apreciarse en las nuevas series. Con estos resultados se dedujo que independientemente de la información que aporta la punta de la vibrisa la periodicidad se mantiene aunque esta se retire.

Una vez que se determinó que era viable retirar hasta un tercio de los fragmentos de la vibrisa se definió el tamaño de muestra que se analizaría por vibrisa (Tabla 3).

Tabla 2: Series de periodos encontrados en el $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la V3 en función del número de fragmentos (NF); así como el ajuste (R^2) que realiza el modelo

Serie	NF	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$	
		Periodos	R^2	Periodos	R^2
1	106	^a 78, ^b 23, 30	0.621	70, 27, 21, 18, 45, 15, 13	0.848
2	101	78, 23, 30	0.607	65, 27, 21, 18, 41, 15, 13	0.872
3	96	70, 23, 30	0.605	106, 61, 26, 21, 41, 18, 15	0.883
4	91	68, 43, 23, 31	0.638	57, 28, 22, 15, 17, 41, 13	0.892
5	86	67, 24, 33	0.628	59, 28, 22, 18, 15, 45	0.869
6	81	67, 24, 31	0.631	106, 67, 31, 23	0.845
7	76	68, 36, 26, 16	0.653	103, 57, 30, 23	0.834
8	71	75, 24, 35	0.64	67, 41, 25, 20, 4	0.832
9	71	75, 24, 35	0.64	67, 41, 25, 20, 4	0.832
10	71	75, 24, 35	0.64	67, 41, 25, 20, 4	0.832
11	71	^b 75, ^a 24, 35	0.64	67, 41, ^a 25, ^b 20, 4	0.832

^aLos números representan el fragmento en el cual se cumple un ciclo

^bEn color rojo se marcan los números que son similares o parecidos entre la serie 1 y la serie 8.

7.2. Estadística descriptiva de los valores isotópicos

Para cumplir con los objetivos estipulados en esta investigación se analizaron isotópicamente 713 fragmentos de vibrisa de once hembras adultas. En general, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ obtenidos en estas once vibrisas fueron de $-13.7 \text{‰} \pm 0.4 \text{‰}$ y $21.2 \text{‰} \pm 0.5 \text{‰}$ respectivamente (Tabla 3).

Para el $\delta^{13}\text{C}$, las vibrisas 1, 6 y 11 son las que presentaron una mayor variación en sus valores; mientras que en el $\delta^{15}\text{N}$ los valores de las vibrisas 3 y 11 fueron los más variantes. Todos los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ por vibrisa presentaron una distribución asimétrica (Fig. 6).

Se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ($p < 0.05$) la cual sugirió que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de cada una de las vibrisas no provienen de una población normalmente distribuida. Para observar las posibles diferencias entre los valores isotópicos de las vibrisas se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, que mostró de diferencias significativas tanto en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ ($H = 81.14$, $gl = 10$, $p < 0.001$) como en los de $\delta^{15}\text{N}$ ($H = 277.86$, $gl = 10$, $p < 0.001$). La prueba Post-hoc de Tukey mostró que había diferencias significativas entre los valores isotópicos de C (Tabla 4) y N (Tabla 5) de todas las vibrisas.

Tabla 3: Número de fragmentos (NF) analizados isotópicamente así como la longitud que representaron estos fragmentos, sus valores de media y error estándar (EE) del $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$.

Vibrisa (ID)	Longitud analizada (mm)	NF analizados	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$	
			$\bar{X} \pm$	EE	$\bar{X} \pm$	EE
1	66	55	-13.4	0.08	20.7	0.05
2	59	55	-14.7	0.05	20.8	0.05
3	72	71	-14.6	0.06	21.4	0.06
4	84	72	-14.5	0.06	21.2	0.05
5	81	73	-14.9	0.03	21.9	0.05
6	66	60	-14.0	0.08	21.2	0.04
7	50	45	-13.4	0.04	21.4	0.04
8	57	65	-14.8	0.02	21.9	0.04
9	75	72	-14.6	0.06	21.2	0.03
10	106	110	-14.8	0.03	21.4	0.04
11	36	35	-13.4	0.10	22.4	0.22
\bar{X}	6.8 ± 1.8					

Tabla 4: Estadístico Post-hoc de Tukey aplicado a los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de todas las hembras.

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0.964	0.067	1	0.000	0.000	0.999	0.006	0.740	0.001	0.997
2	0.964		0.802	0.996	0.007	0.000	0.627	0.306	0.999	0.184	0.619
3	0.067	0.802		0.159	0.605	0.109	0.011	0.999	0.970	0.999	0.017
4	1	0.996	0.159		0.000	0.000	0.982	0.018	0.917	0.004	0.972
5	0.000	0.007	0.605	0.000		0.995	0.000	0.981	0.031	0.936	0.000
6	0.000	0.000	0.109	0.000	0.995		0.000	0.565	0.001	0.340	0.000
7	0.999	0.627	0.011	0.982	0.000	0.000		0.000	0.288	0.000	1
8	0.006	0.306	0.999	0.018	0.981	0.565	0.000		0.610	1	0.001
9	0.740	0.999	0.970	0.917	0.031	0.001	0.288	0.610		0.468	0.306
10	0.001	0.184	0.999	0.004	0.936	0.340	0.000	1	0.468		0.000
11	0.997	0.619	0.017	0.972	0.000	0.000	1	0.001	0.306	0.000	

Tabla 5: Estadístico Post-hoc de Tukey aplicado a los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de todas las hembras.

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0.972	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.490	0.000	0.000	0.000
2	0.972		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.997	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000		0.571	0.000	0.589	1	0.000	0.673	1	0.000
4	0.000	0.000	0.571		0.000	1	0.525	0.007	1	0.409	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.589	1	0.000		0.535	0.001	1	0.446	0.000
7	0.000	0.000	1	0.525	0.000	0.535		0.000	0.616	1	0.000
8	0.490	0.997	0.000	0.007	0.000	0.018	0.000		0.004	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.67353	1	0.000	1	0.616	0.004		0.521	0.000
10	0.000	0.000	1	0.409	0.000	0.446	1	0.000	0.521		0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

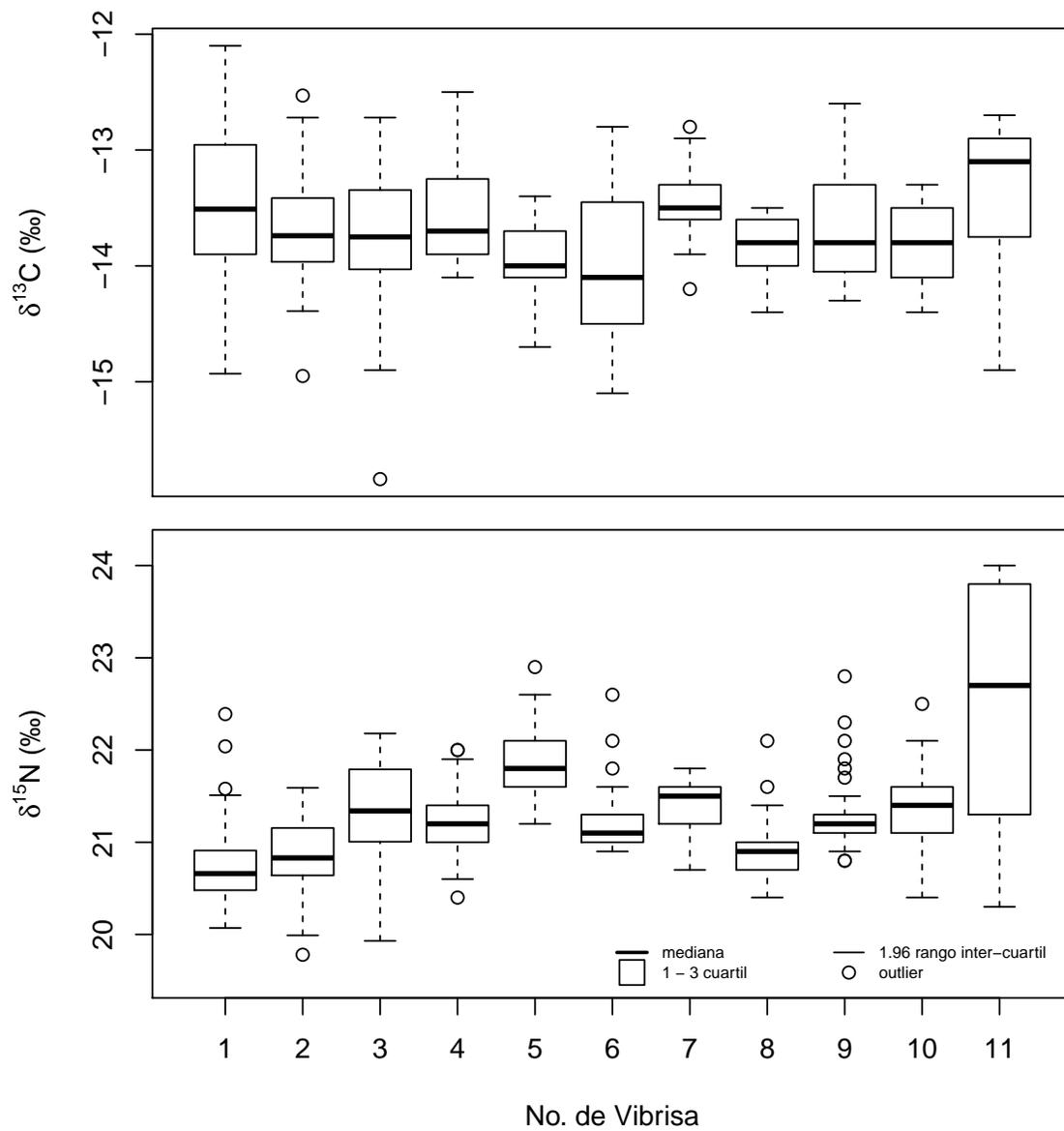


Figura 6: Distribución de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de las vibrisas de las hembras de *Z. californianus* de la isla San Esteban

7.3. Variación isotópica a lo largo de la vibrisa

Se construyó el perfil isotópico de cada vibrisa con los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ que se obtuvieron a lo largo de su longitud. Estos perfiles muestran el comportamiento que registró cada razón isotópica a través del tiempo. En general se observa que las vibrisas presentan una sincronía en los dos isótopos, lo que puede sugerir una estacionalidad en los valores (Fig. 7 y 8).

El número de oscilaciones que registra cada isótopo es distinto en todas las vibrisas, siendo el nitrógeno el que registra las oscilaciones más marcadas. Al agrupar los perfiles isotópicos de cada razón isotópica de todos los individuos (Fig. 9), se observa una mayor sincronía en la primera parte de la vibrisa que parte de la raíz y que se va perdiendo hacia la punta.

7.4. Variabilidad ambiental aledaña a la isla San Esteban

Mediante imágenes satelitales tomadas por el sensor MODIS del satélite AQUA se infirieron los valores de concentración de Clo-*a* y TSM de la zona aledaña a la isla SE. Con el fin de obtener un buen registro de la variabilidad ambiental que prevalece en esta área se tomaron promedios semanales de enero del 2005 a diciembre del 2011.

Se sabe que el lobo marino tiene un ámbito de alimentación cotidiano de aproximadamente 70 km (Feldkamp *et al.*, 1989; Kuhn *et al.*, 2003; Villegas-Amtmann *et al.*, 2011), en la figura 10 se denota con un círculo rojo la posible zona de alimentación del lobo marino de SE y dentro de esta zona el promedio de la concentración de Clo-*a* fue de $1.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, mientras que la TSM osciló en $22.4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Fig. 10-A y 10-B respectivamente).

Con los valores inferidos a través de las imágenes satelitales se construyeron series de tiempo para cada una de las variables ambientales; en el caso de la concentración de Clo-*a* se puede observar que al año se presentan dos picos de máxima productividad (Fig. 11-A), el primer pico se registra a finales de primavera y es el de mayor intensidad, registrando valores promedio de $2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; el segundo pico se registra en los meses de otoño y principios de invierno, y en comparación al primer, este registra valores cercanos a $1.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Para esta zona los valores mínimos de clorofila oscilan en $0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Por otra parte la TSM registra una fluctuación al año; las temperaturas mínimas $<14 \text{ }^\circ\text{C}$ se presentan en invierno; mientras que las máximas $>30 \text{ }^\circ\text{C}$ se registraron en verano (Fig. 11-B).

El set de datos de cada variable fue analizado estadísticamente mediante una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis la cual indicó que tanto la concentración de Clo-*a* (H (6, N= 322)= 11.14, $p >0.05$) como la TSM (H (6, N= 322)= 4.04, $p >0.05$) no presentan

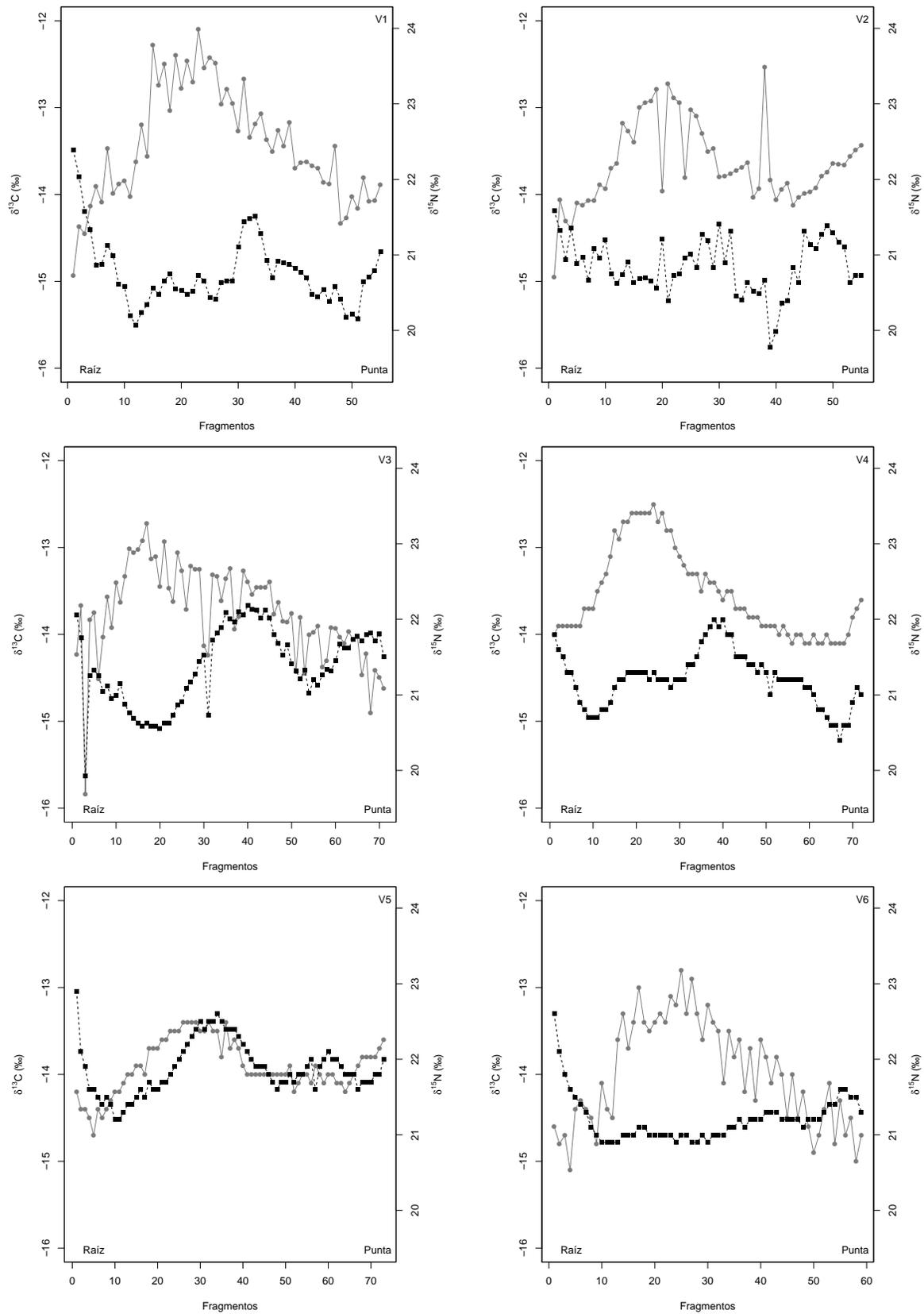


Figura 7: Perfiles isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ (círculo gris) y $\delta^{15}\text{N}$ (cuadrado negro) de los valores secuenciales de las once vibrisas. La raíz y la punta denotan la orientación de las vibrisas.

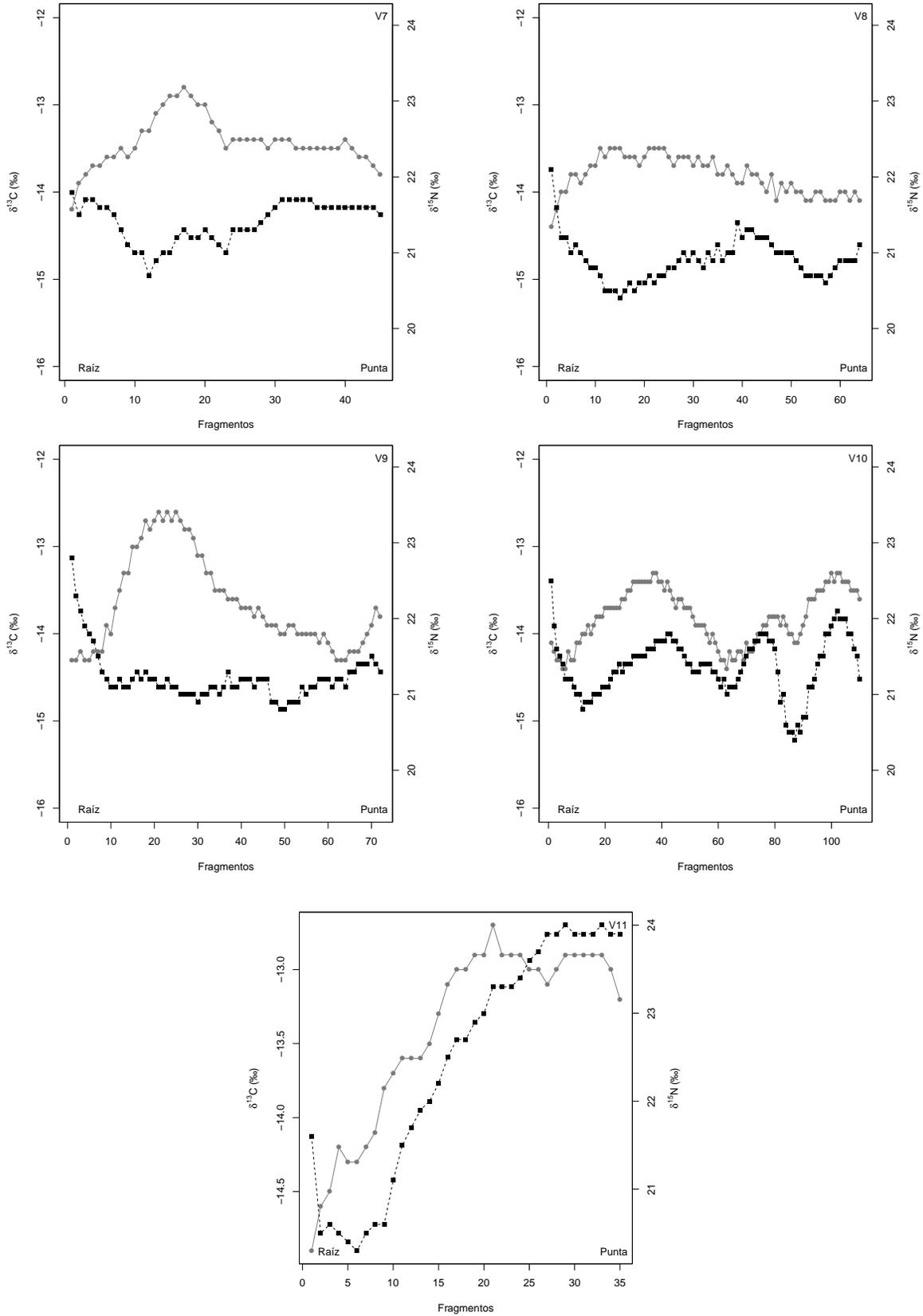


Figura 8: Continuación de la figura 7... Para el caso de la vibrisa 11 se modificó la escala para ambos isótopos debido a que el rango que presenta en sus valores es diferente al resto de las vibrisas.

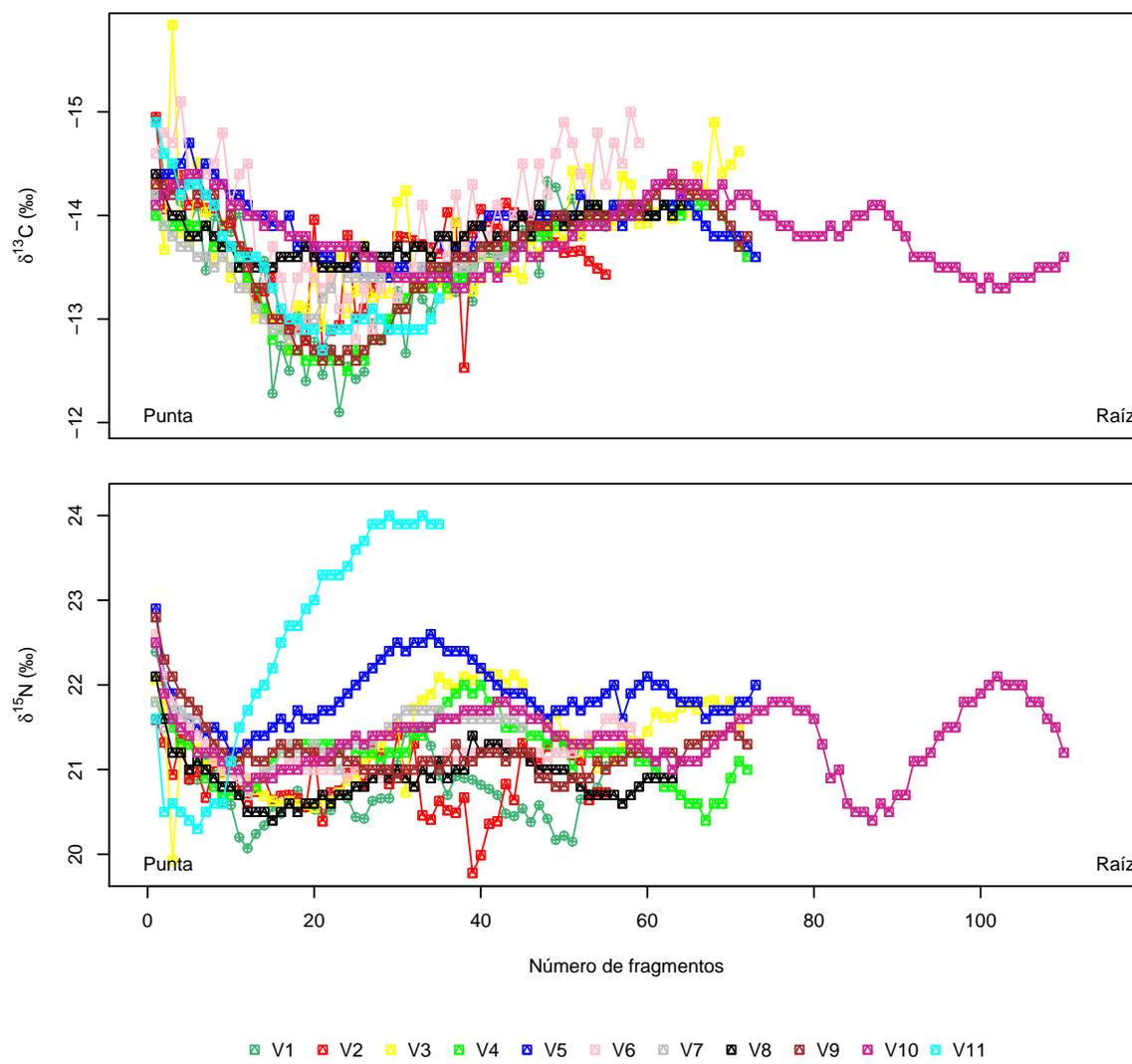


Figura 9: Agrupación de las vibrisas por perfil isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$. La raíz (información reciente) y la punta (información más antigua) denotan la orientación de la vibra.

diferencias significativas interanuales a lo largo de los 7 años analizados.

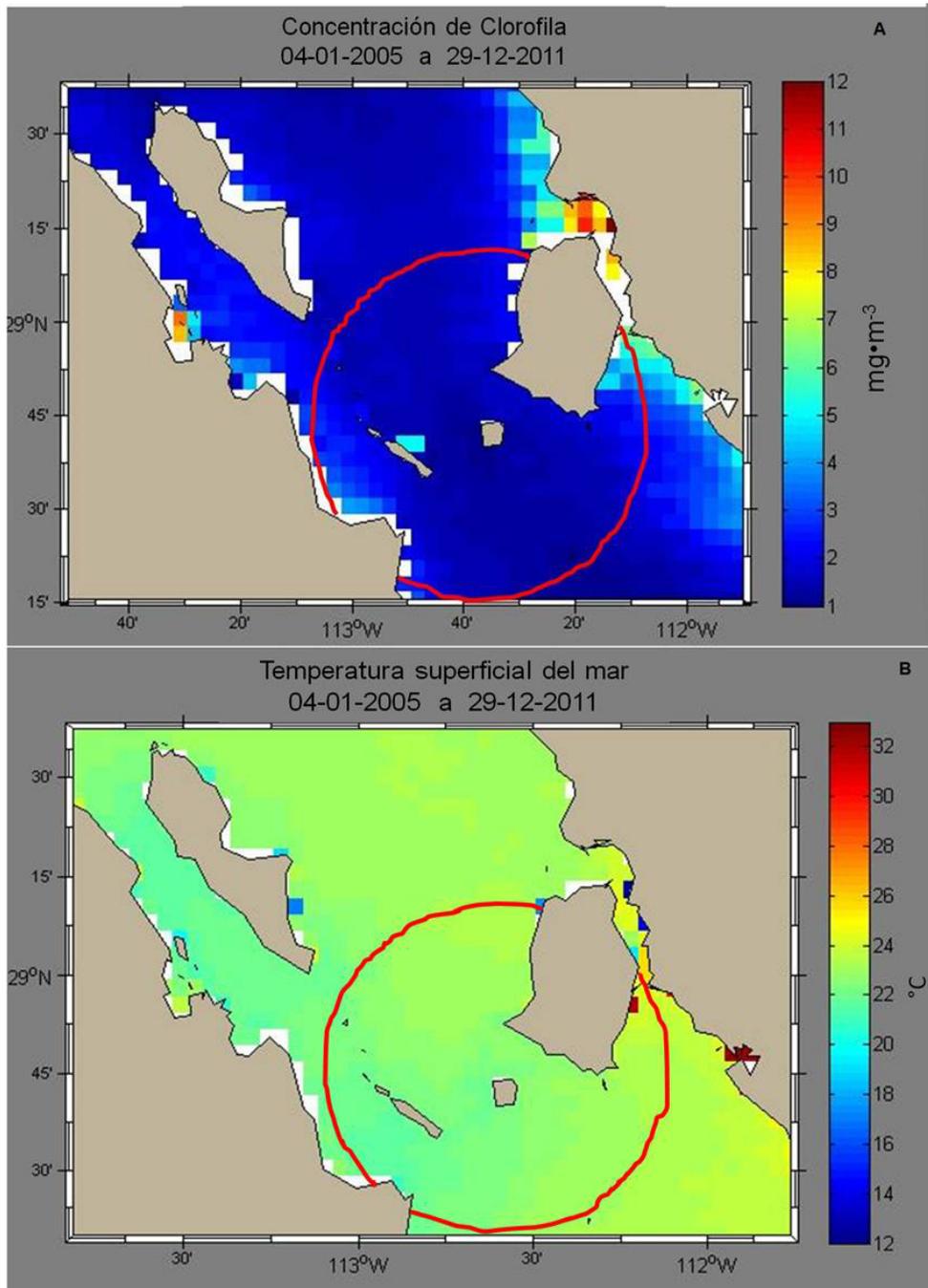


Figura 10: Imagen promedio (7 años) de la concentración de Clo-a (A) y TSM (B) de la zona adyacente a la isla SE. El círculo rojo representa la posible zona de alimentación sobre la cual las hembras de esta lobera podrían estar depredando.

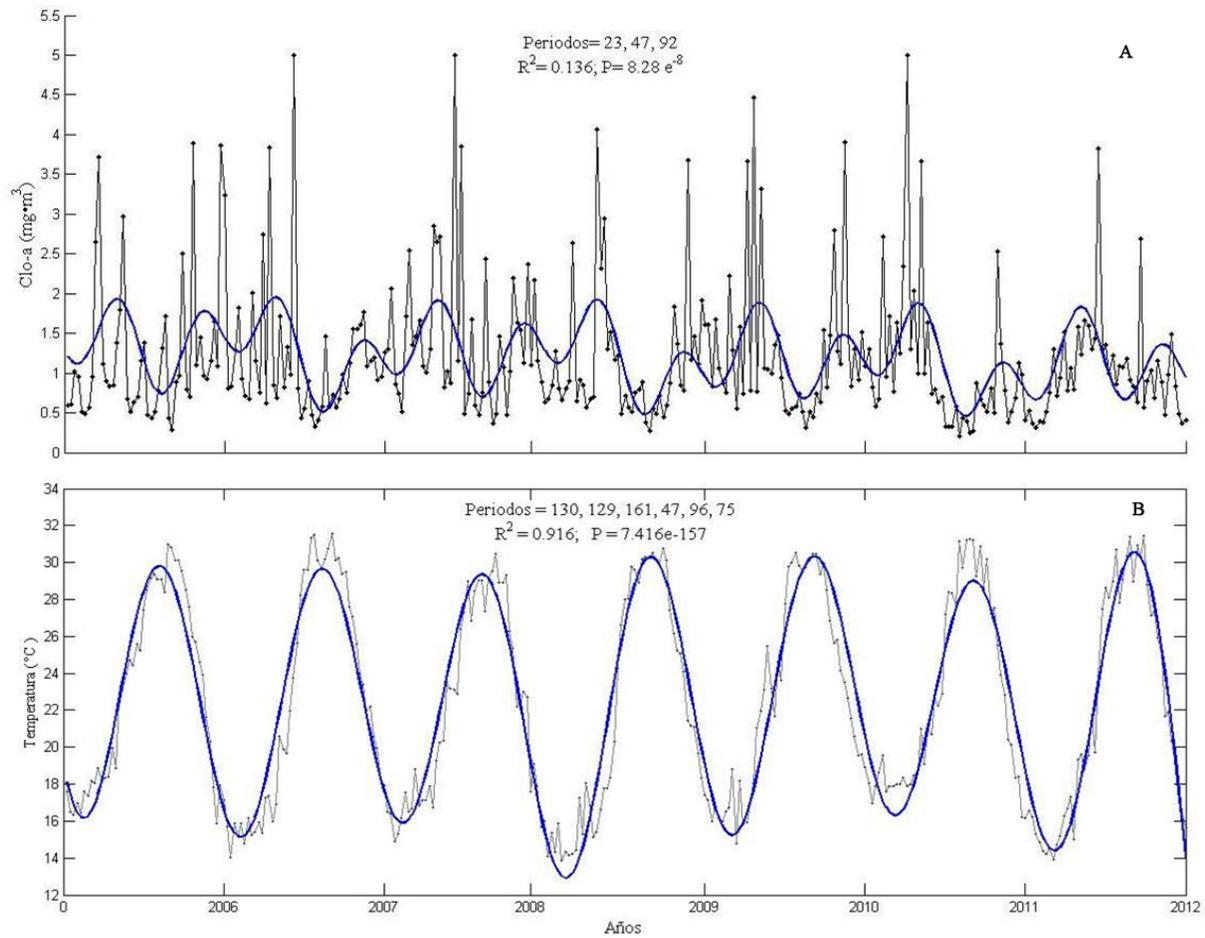


Figura 11: Series de tiempo de Clo-a (A) y TSM (B) de la zona aledaña a la isla SE.

7.5. Tasa de crecimiento de las vibrisas

7.5.1. Modelo de von Bertalanffy

La estimación de los parámetros de t y k se realizó de la siguiente manera:

La t que se utilizó se obtuvo a través de la correlación entre la longitud de la vibrisa y la periodicidad que se encontró mediante el análisis de Fourier (Fig. 4).

En la determinación de k se tomó en cuenta la longitud promedio que se analizó de las vibrisas (69 mm)(Tabla 3) para tener como límite de crecimiento dos años de vida. Esto permitió obtener un valor de k de 0.005 mm/día

Una vez que se obtuvieron los parámetros de k y t se procedió a estimar la tasa de crecimiento para cada vibrisa mediante la función *growth*.

En promedio, la tasa de crecimiento estimada fue de 0.005 mm/día para las vibrisas de las hembras de lobo marino de California de la lobera de SE. Esta función además de estimar lak también estimó la t_0 para cada una de las vibrisas (Tabla 6).

Tabla 6: Tasa de crecimiento de cada una de las vibrisas. Se muestra la t_0 estimada por la función. Al final de la tabla se observan los valores de k y t_0 estimados para la longitud promedio de las vibrisas, así como los valores de desviación estándar (DE).

ID	Tamaño de la Vibrisa (mm)	k-valor (mm/día)	t_0
1	66	0.005	-18.49
2	59	0.005	-31.61
3	72	0.005	-25.47
4	84	0.005	-22.67
5	81	0.005	-22.72
6	66	0.0052	-27.12
7	50	0.0049	-37.17
8	57	0.0049	-32.53
9	75	0.005	-24.73
10	106	0.005	-18.69
11	36	0.0049	-48.55
X	69	0.005	-26.25
+ DE (19)	88	0.005	-21.22
- DE (19)	50	0.0049	-36.83

En la figura 12 se muestra la curva de crecimiento de la vibrisa que se obtiene mediante el modelo de von Bertalanffy usando la tasa de crecimiento de 0.005 mm/día.

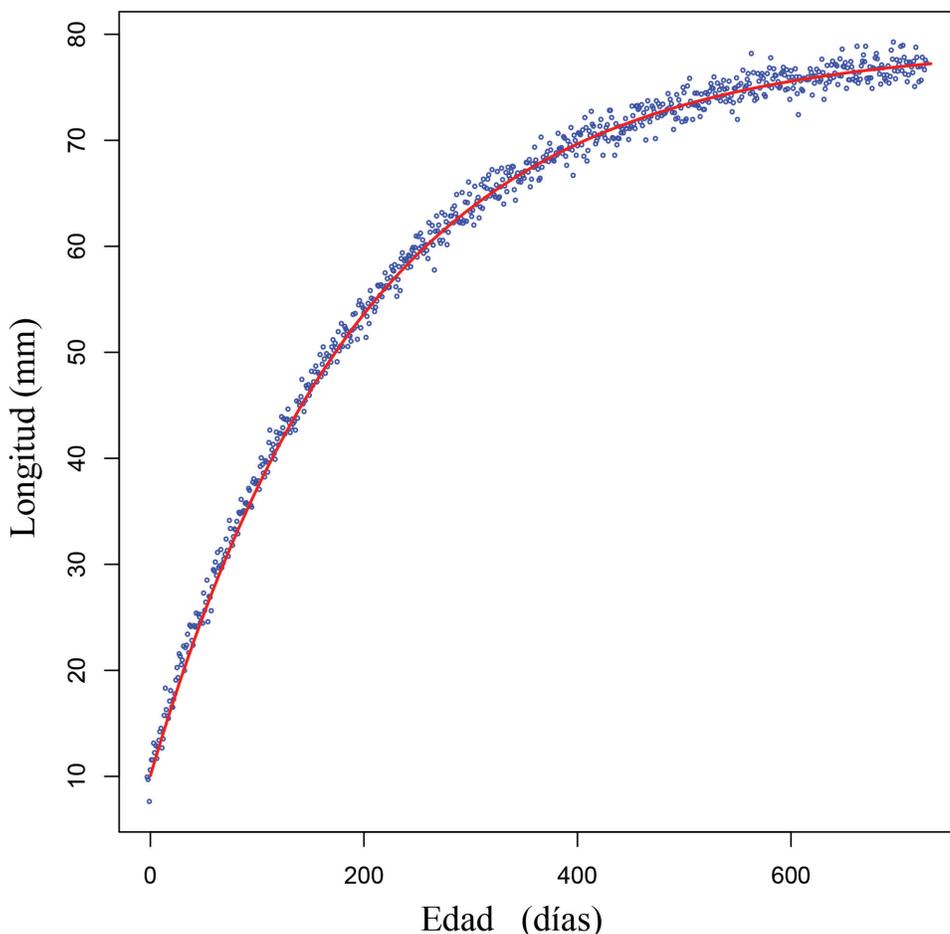


Figura 12: Relación entre la longitud de la vibrisa y la edad por medio del modelo de von Bertalanffy. En este caso se ilustra la curva de la longitud promedio (69 mm) de las vibrisas.

7.5.2. Modelo lineal

La estimación de tasa de crecimiento de la vibrisa mediante el modelo lineal se realizó a través de una regresión lineal entre la edad y la longitud de la vibrisa (Fig. 13). Se calculó una tasa diaria aproximadamente constante de 0.10 mm/d.

7.6. Relación de la variabilidad ambiental con la señal isotópica

Una vez que se determinó la k de la vibrisa, se procedió a correlacionar la variación isotópica con la periodicidad de los valores de Clo- a y TSM.

Se obtuvo que la vibrisa 10 es la que tiene un mayor tiempo de información isotópica, aproximadamente 2.6 años, mientras que la vibrisa 11 sólo representa 2.3 meses (tabla 7), lo cual puede ser entendido en términos de tamaño, entre más grande sea la vibrisa, mayor

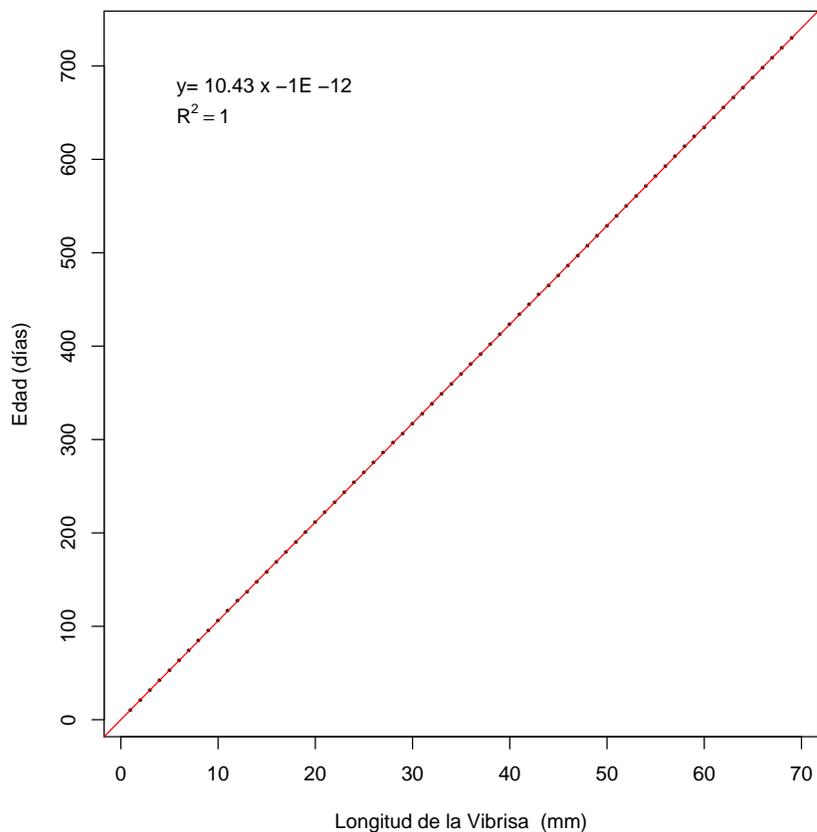


Figura 13: Relación entre la longitud de la vibrisa y la edad mediante el modelo lineal.

tiempo de registro isotópico estará contenido.

Una vez establecida la fecha de inicio de la vibrisa se buscaron datos ambientales para la misma fecha. Se buscó que los resultados de las correlaciones cruzadas (desfase) fueran expresados en días para ver la respuesta de la señal isotópica de las vibrisas respecto a las variaciones de Clo-*a* y TSM. El ajuste óptimo que se encontró para cada una de la vibrisas se puede apreciar en la tabla 8, en donde para fines prácticos el desfase se presenta en meses

El tiempo promedio de desfase que se presenta entre los valores $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ y la variación de Clo-*a* es de 2.5 meses, mientras que el desfase encontrado entre los valores isotópicos con relación a la TSM es de 2.3 meses. Es decir, una vez que se presenta un cambio en la concentración de Clo-*a* este tarda en promedio 2.5 meses en reflejarse en los valores isotópicos, mientras que el efecto de la temperatura tarda 2.3 meses en observarse en la señal isotópica.

En la figura 14 se observa la correlación que existe entre las variables ambientales y los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en función al desfase encontrado en cada vibrisa (para fines prácticos sólo se presentan tres gráficos, correspondientes a las vibrisas 9, 10 y 11, el resto

Tabla 7: Estimación de la fecha a la cual corresponde el último fragmento de la punta, así como los días de información contenida en cada una de las vibrisas de las hembras de *Zalophus californianus*.

ID	Número de Fragmentos	Fecha estimada	
		del último fragmento de la punta analizado	Días contenidos en la vibrisa
1	66	13/12/2010	190
2	59	13/01/2011	160
3	72	11/11/2010	222
4	84	19/08/2010	297
5	81	13/09/2010	281
6	66	13/12/2010	191
7	50	17/02/2011	127
8	57	21/01/2011	152
9	75	24/10/2010	240
10	106	30/11/2008	940
11	36	01/04/2011	83

Tabla 8: Tiempo de desfase estimado en meses entre los periodos de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de las vibrisas de las hembras de lobo marino de California respecto a la variación de Clo-*a* y TSM.

ID	Clo- <i>a</i>		TSM	
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
1	2.9	2.6	2.6	3.0
2	3.2	3.1	2.3	3.0
3	2.3	2.8	2.9	3.0
4	2.8	2.0	3.0	3.0
5	1.1	3.0	1.2	3.0
6	3.0	2.7	2.5	0.2
7	2.3	2.3	2.3	2.3
8	3.1	3.1	3.1	3.1
9	3.0	2.5	2.4	1.0
10	2.5	2.8	3.0	2.6
11	0.9	0.9	1.0	0.1
X	2.5 ± 0.8	2.5 ± 0.6	2.4 ± 0.7	2.2 ± 1.2

de los gráficos se puede apreciar en el apéndice C)

En la gráfica de la vibrisa 10 (Fig. 14) se puede apreciar que aproximadamente en marzo del 2010 y marzo del 2011 se presenta un cambio en los valores $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, así como en la valores de Clo-*a* y TSM. Este cambio se presenta como una ligera caída en los

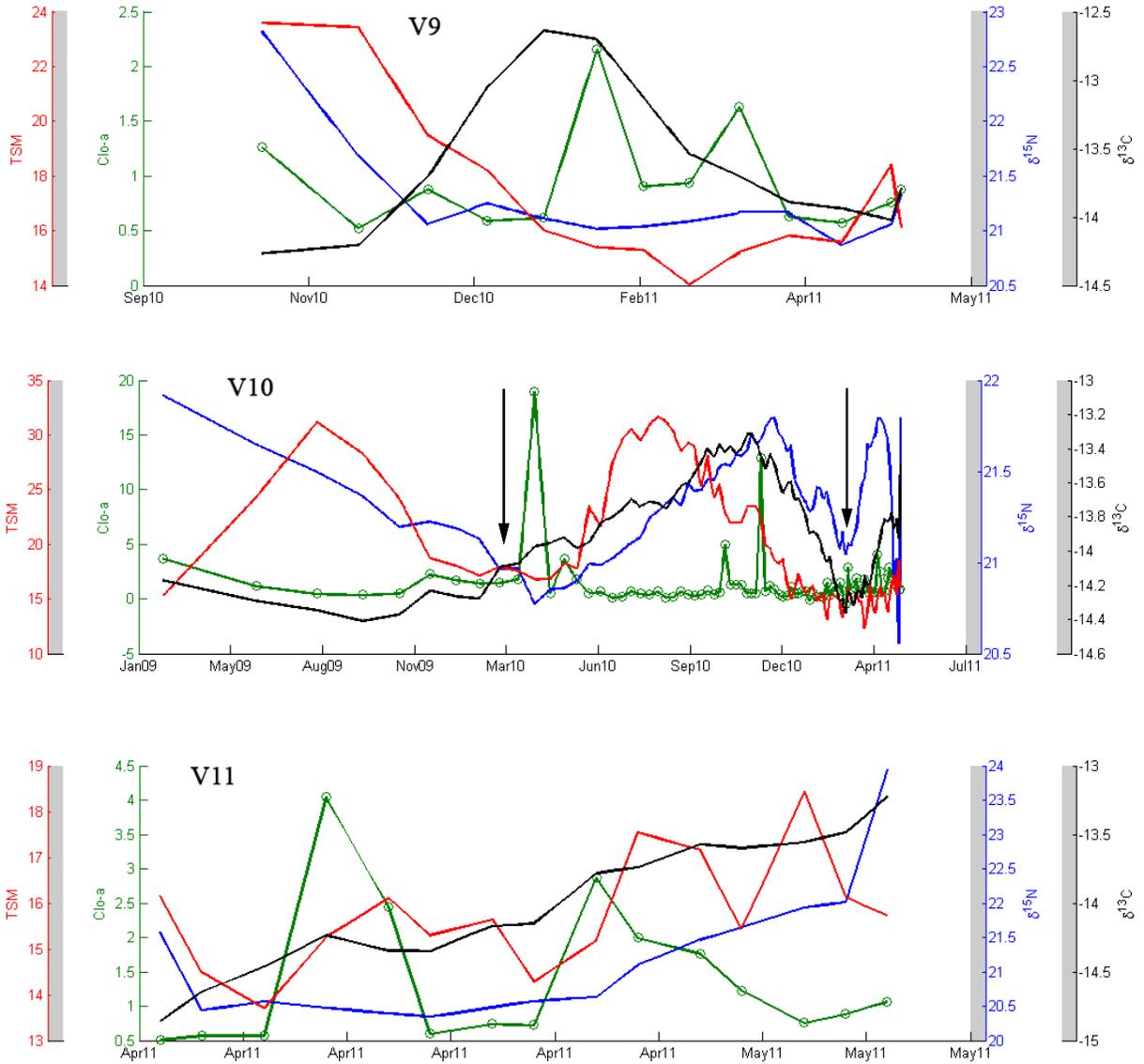


Figura 14: Correlación de las once vibrisas entre los perfiles isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) (línea negra) y $\delta^{15}\text{N}$ (‰) (línea azul) con respecto a los valores de Clo-*a* ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) (línea verde) y TSM ($^{\circ}\text{C}$) (línea roja).

valores de cada variable. El hecho de que este cambio se presente en dos años continuos y en aproximadamente las mismas fechas sugiere un efecto de la ciclicidad de la variación ambiental que incide en la zona aledaña a SE.

Este efecto también se puede observar en las vibrisas 1, 2, 3, 4, 5 y 8 pero sólo para las fechas de febrero-marzo del 2011, dado que el tiempo de información que registraron fue menor (Apéndice C).

7.7. Ecología trófica de las hembras de *Z. californianus* de la isla San Esteban

La amplitud trófica de las hembras de SE se calculó mediante la varianza de los valores de $\delta^{15}\text{N}$ que se obtuvieron en cada vibrisa. Si analizamos la varianza individual, ésta presenta un rango que va desde 0.07 (registrado por la hembra 7) a 1.8 (de la hembra 11), lo cual propone que las hembras de la isla SE presentan distintos grados en el gradiente especialistas-generalistas, esta conclusión sin embargo, podría verse influenciada por los valores registrados en la vibrisa 11, los cuales sugieren que posiblemente se trate de un juvenil lactante y por lo cual sus valores de $\delta^{15}\text{N}$ se ven enriquecidos en comparación de las otras hembras. Por esto razón, para la estimación promedio de la amplitud trófica de las hembras no se tomaron en cuenta los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa 11. El valor promedio de la varianza de las vibrisas fue de $S^2 = 0.14$, lo cual indica que las hembras de esta lobera son depredadores de tipo especialista.

En la figura 15 se muestran los valores isotópicos de todas las vibrisas, así como la media y el error estándar de cada una de ellas. En el gráfico se destaca la agrupación de las vibrisas al centro, lo cual sugiere que las hembras de la lobera de SE comparten los recursos alimenticios y que el valor observado en la vibrisa once probablemente se deba a un cambio ontogénico y no al tipo de dieta consumida.

El nivel trófico se calculó mediante el algoritmo propuesto por Post (2002) donde se utiliza el valor de $\delta^{15}\text{N}$ del consumidor (21.7 ‰) que se calculó mediante el promedio de los valores isotópicos de los tres primeros fragmentos de la vibrisa de todas las hembras dado que la información isotópica contenida en estos fragmentos puede ser equiparable en tiempo a la información isotópica contenida en el tejido de las especies muestreadas en la zona durante el periodo en que se hizo la colecta de organismos.

El $\delta^{15}\text{N}$ de la base se representó con el promedio de los valores isotópicos de las macroalgas que se muestrearon en la zona adyacente a la Isla San Esteban, asimismo, el nivel trófico de la base fue de uno, ya que las algas representan el primer eslabón de la cadena trófica. El factor de discriminación que se utilizó fue el estimado para las vibrisas de 2.8

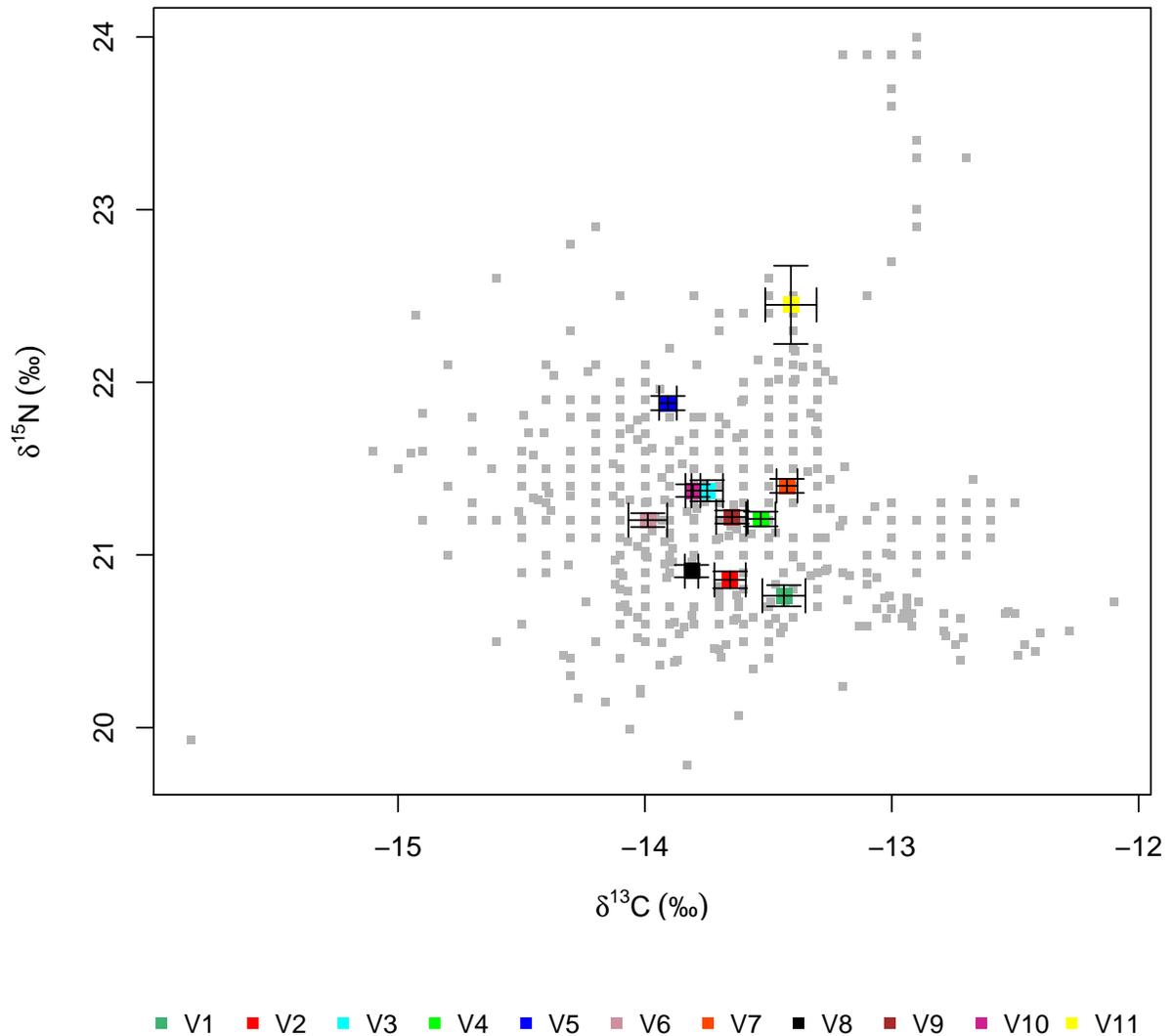


Figura 15: Representación gráfica de la media y error estándar de los valores isotópicos de las vibrisas. Los puntos en escala de grises son todos los valores isotópicos de las vibrisas, mientras que los puntos a color es la media de los valores de cada vibrissa más el error estándar.

‰ (Hobson *et al.*, 1996). Con base en estos números, se obtuvo un NT promedio de 4.1 (el rango de NT varió de 3.8 a 4.3) para las hembras de la isla SE, lo cual las cataloga como un depredador carnívoro secundario terciario (Mearns *et al.*, 1981).

En la Tabla 9 se presentan los valores isotópicos que se obtuvieron de las especies que se muestrearon en la zona adyacente a la isla. Entre las especies muestreadas se encuentran peces, moluscos, crustáceos y macroalgas. Sin embargo, debido a que para varias especies el número de muestra fue limitado, no fue posible calcular el error estándar (ES).

Las especies se separaron en dos grupos en función al número de muestra disponible; en el primer se encuentran las especies que registran un número de muestra ≥ 3 , y en el segundo grupo se ubican las especies con un número de muestra ≤ 2 .

Con los valores de error estándar calculados para algunas de las especies (Tabla 9) que se muestrearon en la zona se esquematizó parte de la trama trófica que se presenta en ese ecosistema (Fig. 15. En este esquema las hembras de lobo marino de California se posicionan en lo alto de la trama, ocupando el penúltimo eslabón de la trama alimentaria (Aurioles-Gamboa *et al.*, 2013).

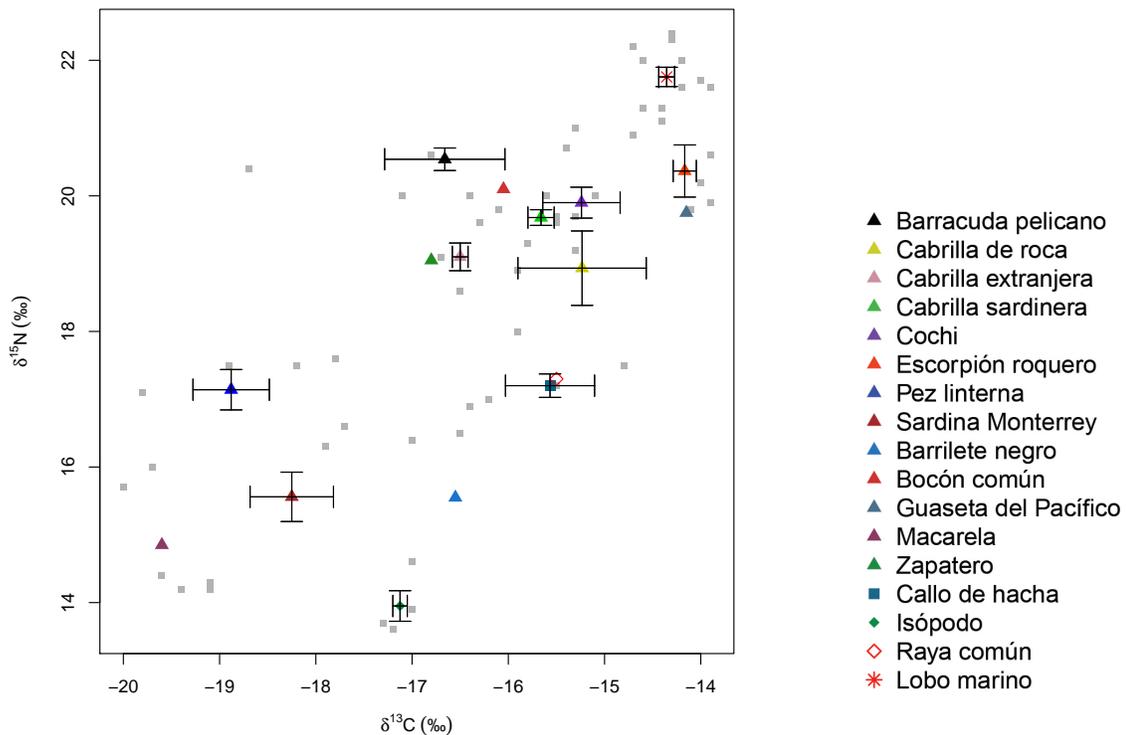


Figura 16: Parte de la estructura de la cadena trófica marina adyacente a isla SE. Cada especie está representada por su valor de media y error estándar. Los peces están representados por triángulos, los condriictios por rombos, los crustáceos por cuadrados. Los rombos en color gris son los valores de cada una las muestras que se obtuvieron.

Tabla 9: Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de especies adyacentes a isla San Esteban. Número de muestra (n) y error estándar (EE) de la media.

Nombre común	Especies	n	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$	
			\bar{X}	EE	\bar{X}	EE
^a Barracuda pelícano	<i>Sphyraena idiastes</i>	5	-16.7	0.63	20.64	0.18
^a Cabrilla de roca	<i>Paralabrax maculatofasciatus</i>	3	-15.2	0.69	18.9	0.58
^a Cabrilla extranjera	<i>Paralabrax auroguttatus</i>	4	-16.5	0.1	19.1	0.2
^a Cabrilla sardinera	<i>Mycteroperca rosacea</i>	5	-15.6	0.13	19.7	0.09
^a Cochi	<i>Balistes madrensis</i>	5	-15.2	0.4	19.9	0.22
^a Escorpión roquero	<i>Scorpaena mystes</i>	3	-14.2	0.12	20.7	0.4
^a Pez linterna	<i>Benthoosema panamense</i>	5	-18.87	0.89	17.16	0.67
^a Sardina Monterrey	<i>Sardinops sagax</i>	10	-18.24	1.36	15.55	1.16
^b isópodo	<i>Isopoda spp.</i>	3	-15.5	0.46	17.2	0.17
^c Callo de hacha	<i>Pinna rugosa</i>	4	-17.1	0.05	14	0.25
^a Barrilete negro	<i>Euthynnus lineatus</i>	2	-16.56	-	15.55	-
^a Bocón gigante	<i>Opistognathus rhomaleus</i>	2	-16.08	-	20.08	-
^a Guaseta del Pacífico	<i>Alphestes immaculatus</i>	2	-14.13	-	19.72	-
^a Macarela	<i>Scomber japonicus</i>	2	-19.6	-	14.88	-
^d Raya redonda común	<i>Urobatis halleri</i>	2	-15.52	-	17.28	-
^a Tieso	Ophichthidae sp.	2	-12.5	-	17.56	-
^a Zapatero	<i>Oligoplites refulgens</i>	2	-16.81	-	19.01	-
^a Argentina del Pacífico Norte	<i>Argentina sialis</i>	1	-19.42	-	17.57	-
^a Bonito mono	<i>Sarda orientalis</i>	1	-19.96	-	19.25	-
^a Burro pecos	<i>Haemulon scudderii</i>	1	-17.42	-	19.01	-
^a Dorado	<i>Coryphaena hippurus</i>	1	-16.81	-	17.74	-
^a Merluza	<i>Merluccius productus</i>	1	-16.47	-	17.93	-
^a Pargo coconaco	<i>Hoplopagrus guentherii</i>	1	-15.56	-	19.04	-
^a Serrano guaseta	<i>Serranus psittacinus</i>	1	-16.28	-	18.69	-
^a Tiburón puerco	<i>Heterodontus francisci</i>	1	-17.88	-	18.56	-
^a Volador puerco	<i>Fodiator rostratus</i>	1	-16.31	-	18.65	-
^b Cangrejo	Brachyura spp	1	-14.42	-	12.98	-
^b Langosta zapato	<i>Scyllarides astori</i>	1	-16.02	-	15.24	-
^c Pulpo manchado	<i>Octopus bimaculatus</i>	1	-13.97	-	16.89	-
^e Chlorophyta	<i>Ulva lactuca</i>	1	-9.2	-	15.49	-
^e Chlorophyta	<i>Ulva lobata</i>	1	-11.23	-	12.78	-
^e Ochrophyta	<i>Sargassum johnstonii</i>	1	-13.32	-	13.09	-
^e Rhodophyta	<i>Grateloupia violacea</i>	1	-9.91	-	11.79	-
^e Rhodophyta	<i>Chondracanthus squarulosos</i>	1	-12.66	-	13.19	-
^e Rhodophyta	Kallymenia sp	1	-31.53	-	11.48	-

^apeces

^bcrustáceo

^cmolusco

^dcondrictio

^emacroalga

Tabla 10: Caracterización de la ecología trófica de cada hembra mediante los valores isotópicos de C y N. Promedios, valores mínimos y máximos, varianza individual (S^2) y nivel trófico (NT). Los números en rojo no se tomaron en cuenta para obtener el promedio de la varianza.

Hembra	$\delta^{13}\text{C}$				$\delta^{15}\text{N}$				NT
	\bar{X}	min	max	$^a S^2$	\bar{X}	min	max	S^2	
1	-13.40	-14.90	-12.10	0.42	20.80	20.70	22.40	0.21	4.20
2	-13.60	-14.90	-12.50	0.22	20.80	19.80	21.60	0.13	3.90
3	-13.70	-15.80	-12.70	0.28	21.40	19.90	22.20	0.26	3.90
4	-13.50	-14.10	-12.50	0.25	21.20	20.40	22.00	0.13	4.10
5	-13.90	-14.70	-13.40	0.10	21.90	21.20	22.90	0.13	4.30
6	-14.00	-15.10	-12.80	0.36	21.20	20.90	22.60	0.10	4.30
7	-13.40	-14.20	-12.80	0.08	21.40	20.70	21.80	0.07	4.10
8	-13.80	-14.40	-13.50	0.05	20.90	20.40	22.10	0.08	4.10
9	-13.60	-14.30	-12.60	0.29	21.20	20.80	22.80	0.10	4.30
10	-13.80	-14.40	-13.30	0.10	21.40	20.40	22.50	0.15	4.10
11	-13.40	-14.90	-12.70	0.38	22.40	20.30	24.00	1.80	3.80
\bar{X}	-13.65	-14.70	-12.81	0.22	21.33	20.50	22.45	0.14	4.10

^a $S^2 > 1$, depredador de tipo generalista; $S^2 < 1$, depredador de tipo especialista (Jaeger *et al.*, 2009)

En la tabla 10 se muestra un resumen de los valores isotópicos que se obtuvieron en cada una de las vibrisas, y con los cuales fue posible calcular el nivel trófico cada hembra, así como su la amplitud trófica.

8. Discusión

8.1. Variabilidad ambiental

Los valores de TSM y la concentración de Clo-*a* mostraron que la variabilidad ambiental que incide sobre la zona aledaña a la isla SE presenta una ciclicidad inter-anual que no fue significativamente diferente, por lo menos durante el tiempo analizado del 2005 al 2012. Esto sugiere que esta escala de variación no es tan importante en la región. La variación intra-anual manifiesta dos picos en la concentración de Clo-*a*, uno en primavera y el otro en otoño, lo cual concuerda con las surgencias estacionales que se registran en invierno-primavera y verano (Lluch-Cota, 2000).

Esta variación ambiental intra-anual se aprecia en la Fig.20-V10. En lo que respecta a los años 2010-2011 se observa que los valores tanto de Clo-*a*, así como los de temperatura sufren alteraciones que se manifiestan a través de subidas y bajadas. Cuando los valores de temperatura presentan un incremento los de Clo-*a* decrecen y viceversa, cuando los valores de Clo-*a* van en aumento la temperatura tiende a disminuir. Lo cual tiene su explicación en los múltiples fenómenos oceanográficos que inciden en la región. Una vez que se registra un evento de surgencia, de frentes o giros, así como la presencia de corrientes se incrementa potencialmente la distribución y disponibilidad de nutrientes en áreas contiguas o circundantes (Palter *et al.*, 2005; Gruber, 2008) que son aprovechados por el fitoplancton.

Las menores temperaturas superficiales que se registraron durante el tiempo analizado se presentan a finales de otoño y principios de primavera, con valores que oscilan entre los 13.8 y 20 °C; temperaturas ideales para la anchoveta del norte (*E. mordax*), especie que se ha registrado en la RA entre los meses de otoño y primavera, cuando las temperaturas oscilan entre 15 y 17 °C (Green-Ruiz y Hinojosa-Corona, 1997). La sardina Monterrey (*Sardinops sagax*) es otra especie que registra grandes concentraciones durante todo el año (Lluch-Belda *et al.*, 2000), pero su mayor abundancia se concentra al sur de la RA, cuando las TSM oscilan entre los 17 y 20.8 °C (Hammann *et al.*, 1998).

E. mordax y *S. sagax* son especies muy importantes dentro de la dieta del lobo marino de California, tanto en las colonias de la RA así como para otras colonias en ambas costas de la Península de Baja California (Espinosa de los Reyes Ayala, 2007). Su disponibilidad y abundancia, así como la de otras presas potenciales como *Trachurus symmetricus*, *Trichiurus lepturus*, *Scomber japonicus*, *Dosidicus gigas*, por citar algunas, pueden afectar la abundancia local o regional de este pinnípedo (Trillmich *et al.*, 1991).

Estudios realizados en las loberas que se concentran en la RA sugieren que cuando *S. sagax* escasea o presenta fluctuaciones en su abundancia, afecta de manera directa a todos los componentes del ecosistema, incluyendo a los depredadores tope como el lobo

marino (Aurioles-Gamboa, datos no publicados), originando que colonias reproductoras donde esta presa es dominante como Los Machos, Cantiles, Granito y Rasito presenten baja proporción de críos, una baja tasa de crecimiento poblacional y por consiguiente una probabilidad mayor de extinción (García-Rodríguez y Aurioles-Gamboa, 2004; Szteren *et al.*, 2006)

Ante los efectos que tiene el ambiente sobre la disponibilidad y abundancia de las presas, los lobos marinos son capaces de responder a esta variabilidad ambiental mediante la flexibilidad en la selección de presas, el uso de lugares de alimentación alternos, y el tiempo que pasan en el mar en búsqueda de alimento (García-Rodríguez y Aurioles-Gamboa, 2004; Aurioles-Gamboa y Camacho-Ríos, 2007; Costa *et al.*, 2007). Cuando las condiciones ambientales son favorables se refleja en la disponibilidad de nutrientes para los productores primarios y probablemente se traduzca en mayor abundancia de presas para los depredadores de mayor nivel trófico, como el lobo marino (Barber *et al.*, 1981; Hutchings *et al.*, 1995; Croll *et al.*, 2005); cuando esto ocurre, las hembras pasan menor cantidad de tiempo en el mar. Pero cuando las condiciones ambientales son adversas, las hembras pasan más tiempo en el mar y transitan mayores distancias en búsqueda de otros destinos de alimentación. Esto sugiere que las hembras de lobo marino de California aunque limitadas por el cuidado permanente a sus crías son capaces de alterar su comportamiento de forrajeo dependiendo de las condiciones del ambiente con el fin de encontrar los recursos suficientes para cubrir sus demandas energéticas así como la de sus crías (Costa *et al.*, 2007; Villegas-Amtmann *et al.*, 2011) .

8.2. Variación isotópica a lo largo de la vibrisa

Las firmas isotópicas presentes en tejidos metabólicamente inertes como lo son las vibrisas, reflejan la dieta consumida en el momento de su síntesis; así, este tipo de tejidos con continuo crecimiento y que no se mudan registran cronológicamente los movimientos e historia alimenticia de los individuos por un periodo de hasta varios años (Hirons *et al.*, 2001a; Rubenstein y Hobson, 2004; Kernaléguen *et al.*, 2012). Recientemente se ha sugerido que los tejidos que aportan información secuencial pueden ser usados para entender las estrategias de alimentación (generalista o especialista) e historia de vida de los individuos dentro y entre poblaciones (Hirons *et al.*, 2001b; Newsome *et al.*, 2010; Kernaléguen *et al.*, 2012).

La serie de valores que se obtuvieron a lo largo de las vibrisas oscilaron entre -15.8 a -12.1 ‰ en el $\delta^{13}\text{C}$, y entre 19.8 a 24.0 ‰ en $\delta^{15}\text{N}$. Estos rangos pueden tener su explicación en tres procesos, 1) cambios temporales en la dieta/posición trófica, 2) cambios en las áreas de alimentación y 3) cambios isotópicos en la base trófica (Hirons *et al.*, 2001b).

8.2.1. Variación trófica/dieta

Para explicar este punto me basaré en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ dado el incremento aproximado de 3-5 ‰ que se registra en los tejidos de los consumidores con respecto a la dieta (Fig. 17) (DeNiro y Epstein, 1978; Minagawa y Wada, 1984; Owens, 1987).

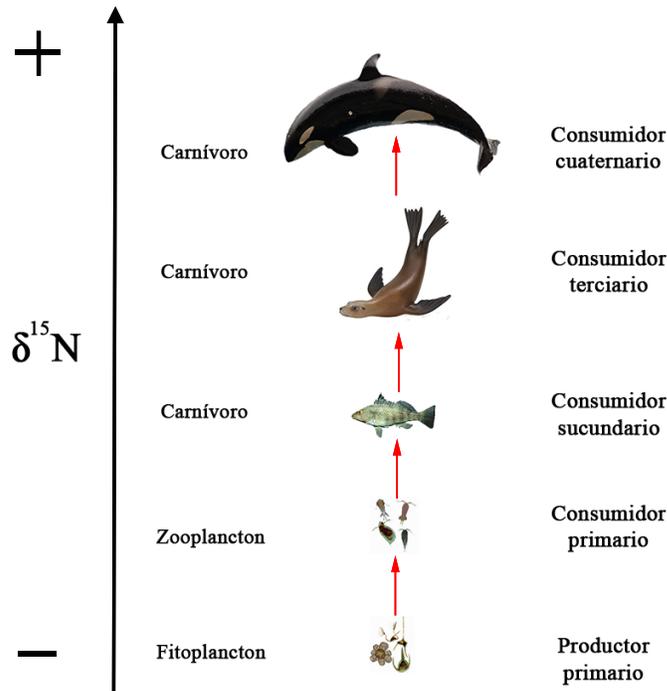


Figura 17: Esquemización del enriquecimiento isotópico del $\delta^{15}\text{N}$ que se registra con el aumento del nivel trófico en el GC. En promedio, el $\delta^{15}\text{N}$ se incrementa entre 2.5 y 5 ‰ con el aumento del nivel trófico, para el GC se ha estimado en 2.7 ‰ (Aurioles-Gamboa *et al.*, 2013).

El fraccionamiento isotópico estimado en las vibrisas con respecto a la dieta es de 2.8 ‰ para $\delta^{15}\text{N}$ (Hobson *et al.*, 1996). De acuerdo con este fraccionamiento, las presas potenciales que han sido registradas para esta lobera deberían presentar valores menores a 21.7 ‰; lo que coincide con los valores registrados en *Scomber japonicus*, pez nerítico-pelágico de NT = 3.1 que ha sido registrado en la dieta de los lobos de SE durante la temporada reproductiva (Porrás-Peters *et al.*, 2008) y el cual presentó valores de 14.8 ‰; *S. sagax* es una especie de NT = 2.4 reportada anteriormente la temporada de primavera a otoño (García-Rodríguez y Aurioles-Gamboa, 2004; Porrás-Peters *et al.*, 2008) y registró de valores de 15.5 ‰; *Argentina sialis* de NT = 3.1 que también ha sido cuantificada dentro de la dieta presentó valores de 17.5 ‰. Dentro de la diversidad de presas que se han registrado en SE ha destacado la familia Mycthopidae ya que prácticamente se ha cuan-

tificado durante todo el año (García-Rodríguez y Auriol-Gamboa, 2004; Porras-Peters *et al.*, 2008), dentro de esta familia encontramos a la especie *Benthoosema panamense*, pez océano-pelágico de NT=3.1 que presentó valores de 17.1 ‰. Otras de las especies que abundan en la RA y que se han documentado como presas preferenciales en loberas de esta región y que por lo tanto valdría la pena considerar dentro de la dieta de la lobera de San Esteban son *Merluccius productus*, pez pelágico que presento valores de 17.9 ‰ y *Dosidicus gigas*, cefalópodo que registra valores isotópicos de 17.2 ‰ (Díaz-Gamboa, 2009).

Estos cambios en la composición y diversidad de presas con diferente nivel trófico tienen un efecto directo en la señal isotópica registrada en los tejidos del lobo marino (Porras-Peters *et al.*, 2008; Auriol-Gamboa *et al.*, 2009), por lo que las fluctuaciones en los valores podrían deberse a este efecto.

Sin embargo, no todas las oscilaciones de $\delta^{15}\text{N}$ tienen su explicación en el cambio de nivel trófico o cambio de dieta, hay factores fisiológicos como la gestación o la lactancia que pueden disminuir los valores $\delta^{15}\text{N}$ (Fuller *et al.*, 2005). Por ejemplo, la vibrisa de la hembra 11 registra valores en el $\delta^{15}\text{N}$ de 24.0 ‰ en la punta (parte más antigua de la vibrisa), lo cual fue inusual con respecto a los valores de las otras vibrisa, donde la mayoría no presenta valores mayores a 22 ‰. Posteriormente este valor alto fue seguido por una disminución aguda en el $\delta^{15}\text{N}$, lo cual representa probablemente el período de lactancia, destete y posteriormente un cambio de dieta. Los valores altos son característicos de jóvenes lactantes que se alimentan de leche y por lo tanto presentan valores más enriquecidos de $\delta^{15}\text{N}$ que el de sus madres (Hobson y Sease, 1998; Newsome *et al.*, 2006; Elorriaga-Verplancken *et al.*, 2012).

El efecto del amamantamiento sobre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ ha sido informado en análisis ontogénicos realizados en hueso y dientes de mamíferos marinos (Newsome *et al.*, 2006; Elorriaga-Verplancken *et al.*, 2012). Kernaléguen *et al.* (2012) mencionan que las vibrisas pueden registrar a una escala muy fina la secuencia ontogénica que se presenta desde el nacimiento hasta la edad adulta, documentando así una serie de acontecimientos ontogénicos como el amamantamiento prolongado; un brusco destete, asociado con una caída rápida de $\delta^{15}\text{N}$; la transición entre la lactancia y el consumo de otras fuentes de alimento, posiblemente de un nivel trófico menor y el desarrollo progresivo de una estrategia de alimentación. Por las razones anteriores, es que la vibrisa de la hembra 11 probablemente no tiene una edad mayor a 5 años y dado que la lactancia en esta especie varía de 1 a 3 años (Newsome *et al.*, 2006; Elorriaga-Verplancken y Auriol-Gamboa, 2008), posiblemente estos valores representen el cambio ontogénico (Fig. 18).

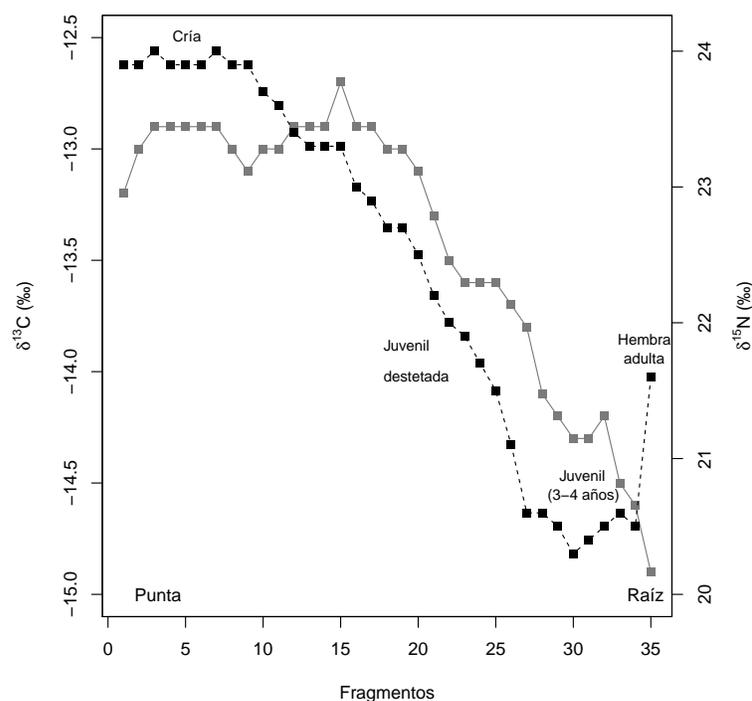


Figura 18: Posibles cambios ontogénicos registrados en una vibrisa de hembra de *Z. californianus*. La parte más joven o reciente de la vibrisa aparece a la derecha. El cuadro negro representa los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y los cuadros en gris son los valores de $\delta^{13}\text{C}$.

8.2.2. Cambios en las áreas de alimentación

Una disminución en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en los tejidos de un consumidor puede ser debido al cambio entre la zona de alimentación; por ejemplo, hay organismos con alimentación bentónica que cambian a una alimentación pelágica que es más empobrecida en ^{13}C (Fig. 19) (Hobson y Welch, 1992; France y Peters, 1997). Por lo tanto, mediante los valores de $\delta^{13}\text{C}$ es posible evaluar las diferencias relacionadas con los cambios en los hábitats de forrajeo.

Dentro del GC, la diversidad de dietas que presenta *Z. californianus* varía geográficamente, tal vez influenciado por la variabilidad estacional de las presas (Aurioles-Gamboa *et al.*, 1984; Lowry *et al.*, 1991). En la región NGC (Isla Lobos y Consag) las presas principales presentan hábitos pelágicos y bentónicos. En la RA (Los Cantiles, Partido, Rasito, San Esteban, incluyendo a San Pedro Mártir y San Pedro Nolasco) hay una dominancia de presas de hábitos pelágicos, y finalmente, en las colonias del SGC (Los islotes y Farallón de San Ignacio) las presas más importantes presentan hábitos dermesales y bentónicos (Porrás-Peters *et al.*, 2008). Enfocándonos en las colonias reproductivas de la RA, García-Rodríguez y Aurioles-Gamboa (2004) describen que la diversidad de la dieta varía

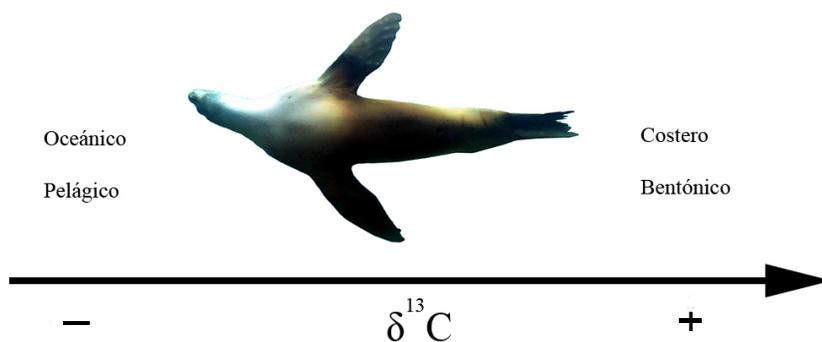


Figura 19: Enriquecimiento que se registra del $\delta^{13}\text{C}$ con respecto a las zonas de forrajeo. Los valores más empobrecidos se encuentran en los ambientes pelágicos y oceánicos, mientras que los valores más enriquecidos son característicos de las zonas costeras y bentónicas.

temporal y espacialmente, de ahí que se conformen cuatro grupos de colonias: 1) San Pedro Mártir, San Esteban y Rasito, cuyo consumo preferente es el pez linterna, 2) Los Machos, donde se consume macarela y sardina Monterrey, 3) Isla Granito, con preferencias por el pez sable y anchoveta y 4) Los Cantiles e Isla Lobos, caracterizado por el consumo de pez sapo y pez sable. Estas cuatro áreas indican diferencias en los hábitos del lobo marino o la explotación de diferentes fuentes de alimento.

Dada la fuerte fidelidad que presentan las hembras de *Z. californianus* al sitio reproductivo, se conoce que durante la lactancia estas no tienden a desplazarse más allá de 70 km alrededor de la colonia en búsqueda de alimento (Feldkamp *et al.*, 1989; Kuhn, 2006; Villegas-Amtmann *et al.*, 2011). Por consiguiente, las proporciones de isótopos estables que presentan las hembras de esta especie pueden estar determinadas por el tipo de ambiente de las presas disponibles en el área y las fluctuaciones isotópicas que se observan pueden sugerir el patrón de movimientos tanto de las hembras como de las presas (Hirons *et al.*, 2001b). El comportamiento individual de las hembras se presenta como una capacidad de respuesta a los cambios ambientales sin que hasta el momento se tenga certeza si es resultado de la plasticidad o de una prolongada especialización individual que sirve como un amortiguador para hacer frente a la variabilidad ambiental (Kuhn, 2006). Este comportamiento individual podría explicar la variación de los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ que se da entre las vibrisas ya que cada una presenta un patrón isotópico característico.

8.2.3. Composición isotópica de la base trófica

A pesar de que los valores isotópicos entre las vibrisas son diferentes, estos presentan cierto grado de sincronía, en particular en la región de la vibrisa metabolizada más re-

cientemente (cercana a la raíz) (Figura 6), por lo que es muy probable que los valores de la dieta estén modulados por factores ambientales que inciden de manera estacional en la zona. Las variaciones isotópicas a lo largo de las vibrisas pueden ser el resultado de diferencias originadas en la base de la cadena alimentaria y vías metabólicas de los organismos (DeNiro y Epstein, 1978; Hobson y Welch, 1992; France y Peters, 1997).

Se puede decir que las variaciones estacionales de los parámetros físicos, tales como la temperatura y la disponibilidad de nutrientes pueden causar cambios basales en los valores isotópicos de los productores primarios (Kelly, 2000). Cualquier cambio en las relaciones de isótopos estables en el fitoplancton (base de la cadena alimentaria), tales como el carbono y las fuentes de nutrientes y su tasa de crecimiento, tienen un efecto directo en los siguientes niveles de la cadena alimentaria hasta reflejarse en depredadores tope como lobos marinos (Hirons *et al.*, 2001b).

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en consumidores marinos pueden cambiar sin haberse modificado la dieta o la posición trófica, ya que este valor también es influenciado por la composición del fitoplancton en la trama alimentaria. La composición isotópica del fitoplancton se ve afectada por la composición isotópica de carbono inorgánico disuelto y el fraccionamiento que se produce durante el crecimiento de las células de la planta. Estas diferencias isotópicas se incorporan o transfieren a todos los consumidores de la red alimentaria (Hirons *et al.*, 2001b).

Mientras que el $\delta^{15}\text{N}$ depende de todas las diferentes fuentes de N (escorrentías, deposición atmosférica, NO_3^- subsuperficial y la fijación de N_2), estas pueden modificar el $\delta^{15}\text{N}$ de la línea base de la trama trófica marina, aunque su impacto varía claramente tanto lateralmente como verticalmente a través de la columna de agua. Más allá de las variaciones impuestas por la composición isotópica de las diferentes fuentes de N, los procesos biológicos dominan el movimiento del nitrógeno a través de los ecosistemas marinos y pueden dar lugar a variaciones notables en el $\delta^{15}\text{N}$ de los reservorios de nitrógeno biológicamente activas (Montoya *et al.*, 2007) Graham *et al.*, 2010.

El cómo afectan los cambios ambientales que inciden en la zona aledaña a la isla SE sobre la señal isotópica que se registra en las vibrisas se aborda con mayor detenimiento en el apartado de la correlación de la variabilidad ambiental con la variación isotópica.

8.3. Crecimiento de la vibrisa

La vibrisas en un tejido adecuado para explorar los patrones en la variación de la dieta, ya que registra los cambios de la alimentación por periodos de varios años (Cherel *et al.*, 2007; Newsome *et al.*, 2009). La longitud de la vibrisa puede ser transformada en medidas de tiempo y así lograr relacionar las razones isotópicas con periodos del año específicos

(Hall-Aspland *et al.*, 2005).

Para poder relacionar las razones isotópicas de las vibrisas de *Z. californianus* con la variación ambiental de la zona aledaña a isla SE se estimó una tasa de crecimiento promedio de 0.005 mm/día para este tejido con el modelo de von Bertalanffy. La estimación de la tasa de crecimiento con el modelo lineal simple fue de 0.10 mm/día. Las diferencias en la tasa de crecimiento de estos dos modelos se debe a que en modelo lineal se considera que los segmentos de iguales longitudes representan un intervalo de tiempo similar en cualquier parte de la vibrisa (Hirons *et al.*, 2001b); mientras que en el modelo de von Bertalanffy la relación de longitud y el tiempo está dada de forma exponencial, considerándose que hay un crecimiento más rápido al inicio y que la asíntota se alcanza al aproximarse a la longitud máxima de la vibrisa (Hall-Aspland *et al.*, 2005).

Por medio del modelo lineal simple se ha estimado la tasa de crecimiento de la vibrisa para diferentes especies de pinnípedos; en fócidos como la foca de puerto *Phoca vitulina* la tasa de crecimiento se determinó basándose en experimentos con marcadores de glicina. En este caso la glicina enriquecida en $\delta^{15}\text{N}$ se incorpora pocos días después de la inoculación marcando este momento en el tiempo y posteriormente es posible medir el crecimiento ocurrido hasta el momento de la recolecta (Hirons *et al.*, 2001a), sin embargo, la estimación de la tasa fue irregular. En la foca leopardo *Hydrurga leptonyx* la relación entre las oscilaciones del $\delta^{15}\text{N}$ y la edad permitió obtener una tasa de crecimiento de 0.08 mm/día (Hall-Aspland *et al.*, 2005), mientras que en otáridos como el lobo marino de Steller *Eumetopias jubatus* se estimó un crecimiento que osciló entre 0.10 y 0.17 mm/día usando marcadores de glicina (Hirons *et al.*, 2001a), por último, para el lobo marino de California *Z. californianus* se ha reportado un crecimiento de 0.16 mm/día, estimado mediante la relación significativa que se presentó entre la longitud de la vibrisa y el número de ciclos anuales de $\delta^{15}\text{N}$ presentes a lo largo de la misma (Mote-Herrera, 2011). La tasa de crecimiento estimada en este estudio (modelo lineal) es similar a lo establecido para el lobo marino de Steller y a lo reportado para el lobo marino de California de las colonias reproductivas de Bahía Magdalena en la costa del Pacífico de la Península de Baja California y Los Islotes en Bahía de la Paz, al sur del Golfo de California (Tabla 11).

La diferencia en la tasa de crecimiento de la vibrisa estimada por Mote-Herrera y la reportada en este estudio posiblemente se deba a los diversos factores ambientales que inciden en las diferentes regiones (Maldonado *et al.*, 1995; Leonel, 2003; González-Suárez *et al.*, 2009), así como las diferencias genéticas y morfológicas que se presentan entre los lobos marinos del Golfo de California y la costa occidental de la península de Baja California; estas diferencias han servido para clasificar a la población del lobo marino de California de esta zona en tres grupos: Alto Golfo de California, Sur de la Península y

Tabla 11: Tasa de crecimiento estimada para las vibrisas de diferentes especies de pinnípedos mediante el modelo lineal simple y el modelo de von Bertalanffy.

Especies	Clases de edad	Modelo	Crecimiento (mm/d)	Animales libres o cautivos	Autor
Otáridos					
Lobo fino del Antártico <i>Arctocephalus gazella</i>	Macho	von Bertalanffy	0.10 – 0.16	Animales libres	Cherel et al., 2009
Lobo marino de Steller <i>Eumetopias jubatus</i>	Machos y hembras adultos y subadultos	Modelo lineal simple	0.10 – 0.17	Animales libres y en cautiverio	Hirons et al., 2001
Lobo marino de California <i>Zalophus californianus</i>	Hembras adultas	von Bertalanffy	0.005	Animales libres	Presente estudio
	Machos y hembras adultas	Modelo lineal simple	0.16	Animales libres	Mote-Herrera, 2011
Fócidos					
Foca leopardo <i>Hydrurga leptonyx</i>	3-no clasificados	Modelo lineal simple	0.08	Animales libres y en cautiverio	Hall-Aspland et al., 2005
	Hembras	von Bertalanffy	0.003		
Foca gris <i>Halichoerus grypus</i>	Hembras	von Bertalanffy	0.24	Animales cautivos	Greaves et al., 2004
Foca de puerto <i>Phoca vitulina</i>	Machos	Modelo lineal simple	0.33	Animales cautivos	Hirons et al., 2001
	Machos y hembras	Modelo lineal simple	0.075	Animales cautivos	Zhao and Schell, 2004

parte Superior de la Costa Baja (González-Suárez *et al.*, 2009).

En cuanto a la estimación de la tasa mediante el modelo de von Bertalanffy, Greaves *et al.* (2004) sugirieron que el crecimiento de las vibrisas sigue un patrón similar a la curva de este modelo dado que el crecimiento de los organismos no es continuo. La tasa estimada de 0.005 mm/día para *Z. californianus* en el presente estudio es cercana a la estimada para *Hydrurga leptonyx* de 0.003 mm/día (Hall-Aspland *et al.*, 2005).

En este trabajo, aunque se presentan los resultados obtenidos de dos diferentes estimaciones para la tasa de crecimiento de un tejido, hay que tener en cuenta que en la naturaleza los organismos presentan un crecimiento de acuerdo a su metabolismo basal, el cual esta influenciado por diversos factores como: estado reproductivo, tamaño corporal, actividad fisiológica, sexo, temporada del año, temperatura, disponibilidad de alimento, entre otros factores (Harris y Benedict, 1918; McLaren, 1958; Seibel y Drazen, 2007). Por consiguiente, la curva del modelo de von Bertalanffy es la que nos brinda una mejor estimación de la tasa de crecimiento que presenta un tejido, dado que el crecimiento de cada órgano o tejido aumenta hasta alcanzar un máximo y luego se reduce (von Bertalanffy, 1964).

8.4. Variación ambiental y su influencia sobre los valores basales de los isótopos estables de C y N

Los ecosistemas marinos como ya se ha mencionado, son altamente dinámicos, cambian a escalas espaciales y temporales bajo una variedad de influencias (Bertram *et al.*, 2001; Misarti *et al.*, 2009). Detectar estos cambios puede ser difícil, debido a las complejas interacciones tróficas que se producen y a las restricciones logísticas que limitan el rango y mediciones factibles de las regiones oceánicas (Fulton *et al.*, 2004)

Estudios recientes llevados a cabo con isótopos estables en vibrisas de otáridos han sugerido que las oscilaciones isotópicas que se registran en este tejido pueden estar influenciadas por la estacionalidad ambiental de las zonas en las que habitan las especies (Hirons *et al.*, 2001a; Cherel *et al.*, 2009) y que por lo tanto podrían ser una herramienta que nos permita medir las señales del medio ambiente (Kernaléguen *et al.*, 2012).

En el presente estudio se observó que la periodicidad que se registró en los valores isotópicos de C y N de las vibrisas podría estar influenciada por la productividad marina que se registra en la RA, producto de los diversos factores oceanográficos que ahí inciden.

La RA representa un fuente potencial de CO₂ hacia la atmósfera debido a los intensos procesos de mezcla vertical que ahí ocurren (Zirino *et al.*, 1997; Hidalgo-González *et al.*, 1997), como consecuencia directa del efecto combinado de la interacción de las corrientes

de marea y la batimetría (Lavín y Marinone, 2003). Se cree que la combinación de factores como la variación estacional del volumen de las masas de agua, en conjunto con la intensidad de la mezcla por efecto de la marea y la batimetría, influyen sobre los cambios espaciales y temporales de las variables del sistema del CO₂ en la RA (Hernández-Ayón *et al.*).

Estos cambios en la disponibilidad del CO₂ afectan de la siguiente manera la señal del $\delta^{13}\text{C}$. Se conoce que la disponibilidad de nutrientes impulsa el afloramiento de fitoplancton y aumenta el valor de ^{12}C del CO₂ acuoso en una parte por mil según su concentración debido a la absorción preferencial de ^{12}C por el fitoplancton durante la fotosíntesis. Una baja concentración de CO₂ acuoso puede conducir a una menor discriminación isotópica durante la fotosíntesis (Hidalgo-González y Álvarez Borrego, 2001; Graham *et al.*, 2010), es decir, la disponibilidad de CO₂ acuoso es uno de los factores que más incidencia tiene sobre los valores de $\delta^{13}\text{C}$ del fitoplancton, en regiones costeras, especialmente en regiones ecuatoriales, donde la columna de agua es fuertemente estratificada, los niveles bajos de nutrientes conducen a bajas tasas de crecimiento, por lo que la concentración de CO₂ es menor y los valores $\delta^{13}\text{C}$ en los productores primarios son más empobrecidos (Hobson *et al.*, 1995; Graham *et al.*, 2010); mientras que los valores más enriquecidos se encuentran en las regiones más productivas, como las zonas de surgencia. En nuestros resultados se observa este efecto; en ellos se aprecia que los valores más enriquecidos de $\delta^{13}\text{C}$ que se registraron en las vibrisas se asocian a la concentración de Clo-*a* que se midió en las zonas aledañas a SE. En términos prácticos se ha considerado a la Clo-*a* como una medida de la biomasa fitoplanctónica, entonces a mayores concentraciones de Clo-*a* una mayor discriminación del ^{12}C y por lo tanto se registran valores de $\delta^{13}\text{C}$ enriquecidos.

Al igual que en el $\delta^{13}\text{C}$, los valores de $\delta^{15}\text{N}$ están influenciados por la dinámica física del océano. Este factor ejerce múltiples efectos sobre la distribución y esparcimiento de la señal isotópica del nitrógeno en combinación con alteraciones químicas impuestas por uno o varios procesos biológicos (fijación de N₂, asimilación, nitrificación, desnitrificación, etc.) (Altabet, 2006) que inciden de manera directa sobre la señal isotópica de los diferentes compuestos nitrogenados, en especial la señal del nitrato (NO₃⁻). En la mayoría de las regiones oceánicas, la producción primaria está basada en los suministros de NO₃⁻. Los valores de $\delta^{15}\text{N}$ en el fitoplancton reflejan dos factores importantes: 1) el valor de $\delta^{15}\text{N}$ del NO₃⁻ suministrado a la zona eufótica, especialmente a través del afloramiento de aguas profundas ricas en NO₃⁻, y 2) el grado de absorción del NO₃⁻ por el fitoplancton (Graham *et al.*, 2010). Durante la asimilación de NO₃⁻ el fitoplancton marino tiene preferencia por el isótopo más liviano (^{14}N) lo cual origina un enriquecimiento isotópico de $\sim 5 - 7 \text{‰}$ (Sigman *et al.*, 1997). Durante la posterior transferencia de este N orgánico reducido,

el zooplancton tiende a excretar amonio isotópicamente más ligero. Como consecuencia el zooplancton se encontrara relativamente más enriquecido que su fuente de alimento y esto también se verá reflejado en los siguientes niveles de la trama trófica. De esta forma el nitrógeno orgánico exportado será el reflejo de la contribución de la fuente de N, del fitoplancton y del zooplancton (Altabet *et al.*, 1999).

Por tales motivos es que se aprecia que los valores más enriquecidos de $\delta^{15}\text{N}$ de las vibrisas se asocian a los meses de surgencia y que en general, las fluctuaciones que se presentan en este isótopo son producto de la variación ambiental que incide en la región.

8.5. Correlación entre las variables de Clo-*a* y TSM con los valores isotópicos de C y N de las vibrisas de las hembras de SE

La correlación entre la variabilidad de Clo-*a* y TSM con respecto a la señal isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ presentó un desfase de 2.4 y 2.3 meses respectivamente. Es decir, una vez que se detecta un cambio en la concentración de Clo-*a* o TSM este tiende a reflejarse en los valores isotópicos de la vibrisa del lobo marino de SE después de 2.4 meses. Lo anterior puede tener su explicación en los flujos de energía que se presentan entre los diferentes niveles de la trama trófica (Rigler, 1975; Mendlewicz y Ranier, 1977), ya que la captación de la señal isotópica no se da de manera simultánea en toda la trama, es decir, una vez ocurren cambios en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y del $\delta^{15}\text{N}$ en el fitoplancton como producto de la variación ambiental que incide en el ecosistema, estos cambios tardarán un tiempo en reflejarse en el zooplancton y posteriormente tardarán otro tiempo en reflejarse en los peces que conforman el siguiente nivel trófico, y así sucesivamente hasta verse reflejado en el nivel trófico más alto (Schell *et al.*, 1989; O' Reilly *et al.*, 2002). Las tasas de crecimiento de la población de fitoplancton son aproximadamente de 1.2 d^{-1} o superiores, y por lo tanto su señal de isótopos estables representa la captación de carbono y nitrógeno de sus fuentes de los últimos días, mientras que las tasas de crecimiento estimado en el zooplancton va de días a semanas (O' Reilly *et al.*, 2002) (Fig. 19).

¿De qué depende el tiempo que tarda en reflejarse la variación del ambiente en la señal isotópica del depredador? Posiblemente dependa de la disponibilidad de nutrientes a lo largo del año. Mote-Herrera (2011), realizó un trabajo similar a este, pero lo llevó a cabo con lobos marinos de dos localidades diferentes, Bahía Magdalena (BM) (Costa del Pacífico de la Península de Baja California) donde se ubica la colonia reproductora de Isla Margarita y en Bahía de La Paz (BLP) (Golfo de California) donde se ubica la colonia de Los Islotes. El tiempo de desfase que se registró entre la variación de la concentración de

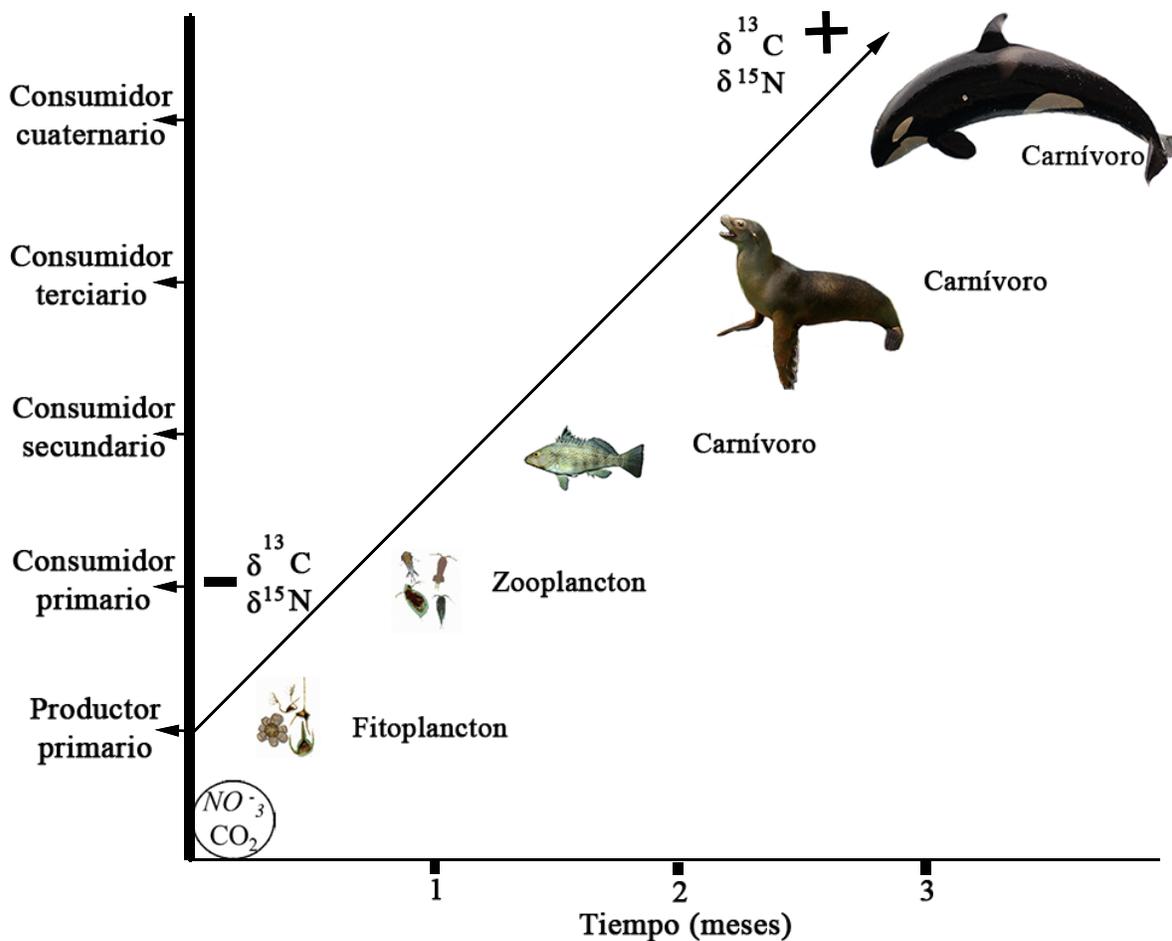


Figura 20: Esquematzación del tiempo que transcurre entre la modificación de los valores basales de los isótopos de C y N del fitoplancton hasta que son reflejados en las vibrisas de lobo marino de SE.

Clo-*a* y la señal del $\delta^{15}\text{N}$ fue de 3.4 meses para BM y de 6 meses para BLP. Si comparamos la variación ambiental que se presenta en estas localidades podemos ver que las condiciones ambientales son muy diferentes. [Mote-Herrera \(2011\)](#) describe que BM y BLP presentan una marcada estacionalidad, definida por un momento de mayor producción en la zona, para BLP hay una concentración promedio de $2.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ de Clo-*a* como resultado de eventos de surgencias por condiciones de mezcla, estratificación y la presencia de un giro ciclónico; mientras que en BM se tiene una concentración promedio de $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ dada la gran influencia por parte de la Corriente de California; por su parte SE presentan dos picos de producción al año producto de las surgencias y de la intensa mezcla por parte de

las mareas obteniendo una concentración de Clo-*a* de $1.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Sin embargo la variación que se presenta en la concentración de clorofila a lo largo del año es muy variante en las tres localidades, los rangos de concentración de Clo-*a* que se registran en BLP van de 0.2 a $3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; en BM van de 0.2 a $6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; mientras que en SE la concentración de Clo-*a* presenta un rango más amplio que va de 0.3 a $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Lo anterior sugiere que hay una mayor disponibilidad de nutrientes a lo largo del tiempo y por lo tanto la entrada de energía a la trama trófica de SE es continua.

8.6. Aspectos de la ecología trófica de las hembras de lobo marino

Los hábitos alimentarios y la alimentación determinan la posición de los animales dentro de las redes tróficas, y define además su papel ecológico. En los mamíferos marinos, los alimentos y hábitos de alimentación se han registrado con observaciones directas mediante el análisis de excretas y contenido estomacal, o inferida por métodos indirectos, como las proporciones de isótopos estables (Pauly *et al.*, 1998).

8.6.1. Nivel trófico

Muchos estudios utilizan niveles tróficos, ya que son fáciles de definir, y caracterizar el papel funcional de los organismos, y facilitar las estimaciones de flujo de energía o de materia a través de las comunidades ecológicas. Para el lobo marino de California de manera directa se ha estimado un NT de 4.1 (Lowry *et al.*, 1991; Pauly *et al.*, 1998), que lo cataloga como depredador carnívoro secundario (Mearns *et al.*, 1981). En esta clasificación se contempla que la dieta de este otárido se basa principalmente por invertebrados bentónicos en un 10 % (NT=2.2), en un 20 % por calamares pequeños, (<50 cm, NT=3.2), un 15 % por calamares grandes (>50 cm, NT=3.7), 25 % por pequeños peces pelágicos (NT=2.7) y un 30 % de la dieta la conforman una amplia variedad de peces, principalmente dermesales (NT=3.3) (Pauly *et al.*, 1998).

Sin embargo, este valor estimado de nivel trófico varía de acuerdo al área donde se localiza la colonia de lobo marino, García-Rodríguez y Auriolles-Gamboa (2004) reportan diferentes valores para las colonias de la RA; San Esteban registra un NT= 3.36, El Rasito presenta un NT= 3.91, el NT de Los Machos es de 3.96, Los Cantiles registra el NT más alto de 4.67, Granito presenta un NT= 4.02 e Isla Lobos tiene un NT=3.81. Estas diferencias en los valores de NT que se da entre las loberas de la RA se explican en función de la dieta que presenta cada colonia, dado que cada una presenta diferente gama de presas.

El análisis de excretas y contenidos estomacales sólo se limitan a aportar información

de los días en los cuales se lleva a cabo la colecta de muestras, por lo que su alcance en tiempo es limitado y probablemente no se tenga un registro de las fluctuaciones en la dieta que se presentan por los cambios ambientales. Además, durante el proceso metabólico se presenta la pérdida o el desgaste de las estructuras que nos ayudan a identificar a las presas (Browne *et al.*, 2002). Por ejemplo, los otolitos de algunas especies son muy frágiles lo que probablemente afecta la precisión de la estimación de la dieta (Sweeney y Harvey, 2011). Las sardinas son una de esas especies, y, por consiguiente la probabilidad de detectar a la sardina en heces disminuye (Lluch-Cota *et al.*, 1999; Sweeney y Harvey, 2011).

Por su parte, la medición indirecta que se hace de la dieta a través de las razones isotópicas nos proporciona una medida continua de los niveles tróficos que integran la asimilación de los flujos de energía a través de las diferentes vías tróficas que conducen a un organismo. Los isótopos estables tienen el potencial de registrar de forma simultánea las interacciones tróficas complejas que se presentan a través de las comunidades (Peterson y Fry, 1987). El NT estimado mediante los valores de $\delta^{15}\text{N}$ usando el algoritmo de Post (2002), fue de 4.1, consistente al reportado por Pauly *et al.* (1998). Este último valor fue calculado con los valores reportados por Lowry *et al.* (1991) mediante el análisis de excretas. El que estos dos valores sean similares a pesar de la técnica empleada para su cálculo puede tener su explicación en el tiempo de información trófica que recaba cada estudio. Lowry *et al.* (1991) analizaron excretas de la Isla San Nicolás durante seis años, por lo que sus resultados contemplan la variación intra e interanual en la dieta de los lobos marinos. Así mismo, las vibrisas proporcionan información de la dieta por más de dos años, y al igual que el estudio de Lowry *et al.* (1991), la información contenida a lo largo de las vibrisas manifiesta la variación que se presenta en la dieta intra e interanualmente.

8.6.2. Amplitud trófica

Al lobo marino de California se le ha considerado como un depredador oportunista debido a la diversidad de su dieta (Aurioles-Gamboa *et al.*, 1984; Sánchez-Arias, 1992), sin embargo, otros trabajos indican que *Z. californianus* es una especie que tiende a seleccionar sus presas (Lowry *et al.*, 1991; García-Rodríguez y Aurioles-Gamboa, 2004; Porrás-Peters *et al.*, 2008) por lo cual también se ha definido como especialista plástico (Lowry *et al.*, 1991).

El valor promedio de amplitud trófica calculada mediante los criterios de Bearhop *et al.* (2004) y Newsome *et al.* (2007) fue de 0.29, lo cual cataloga a las hembras de SE como un depredador especialista, sugiriendo de esta forma la explotación de presas y ambientes específicos. Esta especialización puede representar una respuesta adaptativa a la reducción de los recursos alimentarios y el aumento de la competencia intraespecífica y por lo tanto

puede ser un índice útil de salud de la población con respecto a la abundancia de presas (Tinker *et al.*, 2007).

9. Conclusiones

- Las variables ambientales de Clo-*a* y TSM que inciden en las zonas aledañas a SE presentaron una ciclicidad interanual por lo menos durante el periodo 2005 a 2012. Se presentan dos picos de productividad al año asociados a eventos de surgencia. El valor promedio de la concentración de Clo-*a* fue de $1.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; mientras que la TSM promedio oscilo en $22.4 \text{ }^\circ\text{C}$
- La correlación entre la longitud de la vibrisa y el número de periodos registrados en el $\delta^{15}\text{N}$ permitió inferir que dos periodos corresponden a un año de vida del lobo marino de California de la isla SE.
- La tasa de crecimiento estimada para la vibrisa mediante el modelo de crecimiento de von Bertalanffy fue de 0.005 mm/día ; mientras que por el modelo lineal se estimó una tasa de crecimiento de 0.10 mm/día .
- La disponibilidad de CO_2 y NO_3^- en la RA como producto de la variación ambiental tiene un efecto directo en los valores isotópicos de C y N del fitoplancton, y por consiguiente en los valores isotópicos de toda la trama trófica.
- El desfase que se presenta entre la señal isotópica de C y N con relación a los cambios de concentración de Clo-*a* y TSM registrados a lo largo de la vibrisa fue en promedio de 2.4 meses.
- Dado que las vibrisas contienen archivos inalterables de información pueden ser una herramienta que nos permita identificar cambios ontogénicos desde el nacimiento hasta la edad adulta. Además esta información puede servir como herramienta para observar el efecto de la variabilidad ambiental sobre los organismos.
- La ecología trófica de la especie cataloga a las hembras de SE como un depredador carnívoro secundario ya que el valor de $\text{NT} = 4.0$; mientras que el valor de 0.6 en la amplitud trófica las cataloga como un depredador especialista.

Literatura citada

- Altabet, M. A., 2006. Isotopic tracers of the marine nitrogen cycle: Present and past. Pages 251–293 *in* Marine organic matter: biomarkers, isotopes and DNA. Springer.
- Altabet, M. A., C. Pilskaln, R. Thunell, C. Pride, D. Sigman, F. Chavez, y R. Francois. 1999. The nitrogen isotope biogeochemistry of sinking particles from the margin of the Eastern North Pacific. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* **46**:655–679.
- Álvarez Borrego, S., y J. Lara-Lara. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. En: Dauphin, J.P., Simoneit, B.R. (Eds.), *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*. American Association of Petroleum Geologist Memoirs **47**:555–567.
- Álvarez Borrego, S., J. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M. Acosta-Ruiz, y R. Schwartzlose. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* **5**:53–71.
- Argote, M., A. Amador, L. M.F., y J. Hunter. 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* **100**:103–118. URL <http://dx.doi.org/10.1029/95JC01500D0>.
- Arnould, J. P. Y., Y. Cherel, J. Gibbens, J. G. White, y C. L. Littnan. 2011. Stable isotopes reveal inter-annual and inter-individual variation in the diet of female Australian fur seals. *Marine Ecology Progress Series* **422**:291–302. URL <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v422/p291-302/N1>.
- Aurioles-Gamboa, D., y F. Camacho-Ríos. 2007. Diet and feeding overlap of two otariids, *Zalophus californianus* and *Arctocephalus townsendi*. Implications to survive environmental uncertainty. *Aquatic Mammals* **33**:315–326.
- Aurioles-Gamboa, D., C. Fox, F. Sinsel, y G. Tanos. 1984. Prey of the California sea lion (*Zalophus californianus*) in the Bay of La Paz, Baja California Sur, México. *Journal Mammal* **65**:519–521.
- Aurioles-Gamboa, D., S. D. Newsome, S. Salazar-Pico, y P. L. Koch. 2009. Stable isotope differences between sea lions (*Zalophus*) from the Gulf of California and Galápagos Islands. *Journal Information* **90**.

- Auriolles-Gamboa, D., M. Y. Rodríguez-Pérez, L. Sánchez-Velasco, y M. F. Lavín. 2013. Habitat, trophic level, and residence of marine mammals in the Gulf of California assessed by stable isotope analysis. *MEPS* **488**:275–290.
- Auriolles-Gamboa, D., y A. Zavala-González. 2004. Algunos factores ecológicos que determinan la distribución y abundancia del lobo marino *Zalophus californianus*, en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* **20**:535–553.
- Badan-Dangon, A., C. Koblinsky, y T. Baumgartner. 1985. Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanol* **8**:13–22.
- Barber, R. T., R. L. Smith, *et al.* 1981. Coastal upwelling ecosystems. In *Analysis of marine ecosystems*. Academic Press, New York pages 31–68.
- Bearhop, S., E. Colin, S. Adams, R. Fuller, y H. Macleod. 2004. Determining trophic niche width: A novel approach using stable isotope analysis. *Journal of Animal Ecology* **73**:1007–1012. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.0021-8790.2004.00861.x>.
- Bertram, D., D. Mackas, y S. McKinnell. 2001. The seasonal cycle revisited: interannual variation and ecosystem consequences. *Progress in Oceanography* **49**:283–307. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661101000271>.
- Bowen, W. 1997. Role of marine mammals in aquatic ecosystems. *Marine Ecology Progress Series* **158**:267–274. URL <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v158/p267-274/N1>.
- Bray, N., y J. Robles, 1991. Physical oceanography of the Gulf of California. Pages 511–553 *in* J. Dauphin y B. Simoneit, editors. *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*, volume 47. American Association of Petroleum Geologist Memoirs.
- Browne, P., J. Laake, R. DeLong, *et al.* 2002. Improving pinniped diet analysis through identification of multiple skeletal structures in fecal samples. *Fishery Bulletin* **100**.
- Campos Aranda, D. F. 2003. Introducción a los Métodos Numéricos: Software en Basic y aplicaciones en Hidrología Superficial. Capítulo **5**:93–127.
- Carreño, A., y J. Helenes-Escamilla, 2002. The geology and ages of the islands. Pages 14–40 *in* T. Case, M. Cody, y E. Ezcurra, editors. *Island Biogeography of the Sea of Cortés*. University of Oxford.

- Castro-Aguirre, J., E. Balart, y J. Arvizu-Martínez. 1995. Contribución al conocimiento del origen y distribución de la ictiofauna del Golfo de California, México. *Hidrobiológica* **5**:57–78.
- Cherel, Y., K. Hobson, C. Guinet, y C. Vanpe. 2007. Stable isotopes document seasonal changes in trophic niches and winter foraging individual specialization in diving predators from the Southern Ocean. *The Journal of animal ecology* **76**:826–836. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2656.2007.01238.x>.
- Cherel, Y., L. Kernaléguen, P. Richard, y C. Guinet. 2009. Whisker isotopic signature depicts migration patterns and multi-year intra- and inter-individual foraging strategies in fur seals **5**:830–832. URL <http://rsbl.royalsocietypublishing.org/content/5/6/830.abstract>.
- Costa, D. P., C. Kuhn, y M. Weise, 2007. Foraging ecology of the California sea lion: Diet, diving behavior, foraging locations, and predation impacts on fisheries resources. Technical report, University of California.
- Cottingham, K., B. Brown, y J. Lennon. 2001. Biodiversity may regulate the temporal variability of ecological systems. *Ecology Letters* **4**:72–85. URL <http://dx.doi.org/10.1046/j.1461-0248.2001.00189.x>.
- Croll, D. A., B. Marinovic, S. Benson, F. P. Chavez, N. Black, R. Ternullo, y B. R. Tershy. 2005. From wind to whales: trophic links in a coastal upwelling system. *Marine Ecology Progress Series* **289**:117–130.
- Dalerum, F., y A. Angerbjörn. 2005. Resolving temporal variation in vertebrate diets using naturally occurring stable isotopes. *Oecologia* **144**:647–658. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-005-0118-0>.
- Danell-Jiménez, A., L. Sánchez-Velasco, M. Lavín, y S. Marinone. 2009. Three-dimensional distribution of larval fish assemblages across a surface thermal/chlorophyll front in a semienclosed sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **85**:487–496. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771409004363>.
- Darimont, C., y T. Reimchen. 2002. Intra-hair stable isotope analysis implies seasonal shift to salmon in Gray wolf diet. *Canadian Journal of Zoology* **80**:1638–1642. URL <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/z02-149>.

- Díaz-Gamboa, R. E., 2009. Relaciones tróficas de los cetáceos teutófagos con el calamar gigante *Dosidicus gigas* en el Golfo de California. Tesis de doctorado, CICIMAR-IPN, La Paz, BCS.
- Delgadillo-Hinojosa, F., J. Macías-Zamora, J. Segovia-Zavala, y S. Torres-Valdés. 2001. Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Marine Chemistry* **75**:109–122. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304420301000287>.
- DeNiro, M. J., y S. Epstein. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **42**:495–506.
- Elorriaga-Verplancken, F., y D. Auriol-Gamboa. 2008. Trace metal concentrations in the hair of *Zalophus californianus* pups and their relation to feeding habits. *Biological Trace Element Research* **126**:148–164.
- Elorriaga-Verplancken, F., D. Auriol-Gamboa, S. D. Newsome, y S. F. Martínez-Díaz. 2012. $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values in dental collagen as a proxy for age-and sex-related variation in foraging strategies of California sea lions. *Marine Biology* pages 1–12.
- Espinosa de los Reyes Ayala, M. G., 2007. Variabilidad espacial de la dieta del lobo marino de California (*Zalophus californianus californianus*, Lesson 1828). Tesis maestría, CICESE.
- Feldkamp, S. D., R. L. DeLong, y G. A. Antonelis. 1989. Diving patterns of California sea lions, *Zalophus californianus*. *Canadian Journal of Zoology* **67**:872–883.
- France, R., y R. Peters. 1997. Ecosystem differences in the trophic enrichment of ^{13}C in aquatic food webs. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **54**:1255–1258.
- Fry, B. 1988. Food web structure on Georges Bank from stable, C, N and S isotopic compositions. *Limnology and Oceanography* **33**:1182–1190.
- Fuller, B. T., J. L. Fuller, N. E. Sage, D. A. Harris, T. C. O'Connell, y R. E. Hedges. 2005. Nitrogen balance and $\delta^{15}\text{N}$: why you're not what you eat during nutritional stress. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* **19**:2497–2506.
- Fulton, E. A., A. D. Smith, y C. R. Johnson. 2004. Effects of spatial resolution on the performance and interpretation of marine ecosystem models. *Ecological Modelling* **176**:27–42.

- García-Rodríguez, F., y D. Aurióles-Gamboa. 2004. Spatial and temporal variation in the diet of the California sea lion (*Zalophus californianus*) in the Gulf of California, Mexico. *Fishery Bulletin* **102**:47–62.
- Gaxiola-Castro, G., J. Garcia-Cordova, J. Valdez-Holguin, y M. Botello-Ruvalcaba. 1995. Spatial distribution of chlorophyll a and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research* **15**:1043–1059. URL <http://www.ingentaconnect.com/content/els/02784343/1995/00000015/00000009/art00071>.
- Gentry, R., D. Costa, J. Croxall, J. David, R. Davis, G. Kooyman, P. Majluf, T. McCann, y F. Trillmich, 1986. Synthesis and conclusions. Chapter 15, pages 220–264 *in* R. L. Gentry y G. L. Kooyman, editors. *Fur Seals: Maternal Strategies on Land and at Sea*. Princeton University Press: Princeton, New Jersey.
- González-Suárez, M., R. Flatz, D. Aurióles-Gamboa, P. Hedrick, y L. Gerber. 2009. Isolation by distance among California sea lion populations in México: redefining management stocks. *Molecular Ecology* **18**:1088–1099.
- Graham, B. S., P. L. Koch, S. D. Newsome, K. W. McMahon, y D. Aurióles, 2010. Using isoscapes to trace the movements and foraging behavior of top predators in oceanic ecosystems. Pages 299–318 *in* *Isoscapes*. Springer.
- Gras, J. A. 2001. *Diseños de series temporales: técnicas de análisis*. Edicions Univers. Barcelona.
- Greaves, D. K., M. O. Hammill, J. D. Eddington, D. Pettipas, y J. F. Schreer. 2004. Growth rate and shedding of vibrissae in the gray seal, *Halichoerus grypus*: a cautionary note for stable isotope diet analysis. *Marine Mammal Science* **20**:296–304.
- Green-Ruiz, Y. A., y A. Hinojosa-Corona. 1997. Study of the spawning area of the Northern anchovy in the Gulf of California from 1990 to 1994, using satellite images of sea surface temperatures. *Journal of plankton research* **19**:957–968.
- Gruber, N. 2008. The marine nitrogen cycle: overview and challenges. *Nitrogen in the marine environment* pages 1–50.
- Haines, E. B., y C. L. Montague. 1979. Food sources of estuarine invertebrates analyzed using $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios. *Ecology* **60**:48–56. URL <http://dx.doi.org/10.2307/1936467>.

- Hall-Aspland, A., T. Rogers, y R. Canfield. 2005. Stable carbon and nitrogen isotope analysis reveals seasonal variation in the diet of leopard seals. *Marine Ecology Progress Series* **305**:249–259. URL <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v305/p249-259/N1>.
- Hammann, M. G., M. Nevárez-Martínez, y Y. Green-Ruíz. 1998. Spawning habitat of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California: Egg and larval distribution 1956-1957 and 1971-1991. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* pages 169–179.
- Harris, J. A., y F. G. Benedict. 1918. A biometric study of human basal metabolism. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **4**:370.
- Hernández-Ayón, J., F. Delgadillo-Hinojosa, T. Camiro-Vargas, y M. López-Mariscal. ????. Estudio de las variables del CO₂.
- Hidalgo-González, R., y S. Álvarez Borrego. 2001. Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica Acta* **24**:19–28.
- Hidalgo-González, R. M., S. Álvarez-Borrego, y A. Ziriñi. 1997. Mezcla en la región de las grandes islas del Golfo de California: efecto en la pCO₂ superficial. *Ciencias marinas* **23**:317–327.
- Hirons, A., D. Schell, y D. Aubin. 2001*a*. Growth rates of vibrissae of harbor seals (*Phoca vitulina*) and Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*). *Canadian Journal of Zoology* **79**:1053–1061. URL <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/z01-055>.
- Hirons, A. C., D. M. Schell, y B. P. Finney. 2001*b*. Temporal records of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in North Pacific pinnipeds: inferences regarding environmental change and diet. *Oecologia* **129**:591–601.
- Hobson, K., W. Ambrose, y P. Renaud. 1995. Sources of primary production, benthic-pelagic coupling, and trophic relationships within the Northeast Water Polynya: insights from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine ecology progress series*. Oldendorf **128**:1–10.
- Hobson, K., J. Piatt, y J. Pitocchelli. 1994. Using stable isotopes to determine seabird trophic relationships. *Journal of Animal Ecology* **63**:786–798. URL <http://www.jstor.org/stable/5256>.
- Hobson, K., D. Schell, D. Renouf, y E. Noseworthy. 1996. Stable carbon and nitrogen isotopic fractionation between diet and tissues of captive seals: implications for dietary

- reconstructions involving marine mammals. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **53**:528–533. URL <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/f95-209>.
- Hobson, K., y J. Sease. 1998. Stable isotope analysis of tooth annuli reveals temporal dietary records: An example using Steller Sea lions. *Marine Mammal Science* **14**:116–129. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-7692.1998.tb00694.x>.
- Hobson, K., E. Sinclair, J. Thomason, y R. Merrick. 2004. Retrospective isotopic analyses of Steller sea lion tooth annuli and seabird feathers: A cross-taxa approach to investigating regime and dietary shifts in the Gulf of Alaska. *Marine Mammal Science* **20**:621–638. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-7692.2004.tb01183.x>.
- Hobson, K., y H. Welch. 1992. Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine Ecology Progress Series MESED*, **84**.
- Hood, J., y R. Sterner. 2010. Diet Mixing: Do animals integrate growth or resources across temporal heterogeneity? *The American Naturalist* **176**:651–663. URL <http://www.jstor.org/stable/10.1086/656489>.
- Hutchings, L., G. Pitcher, T. Probyn, y G. Bailey. 1995. The chemical and biological consequences of coastal upwelling. *Environmental Sciences Research Report ES* **18**:65–82.
- Inda-Díaz, E., L. Sánchez-Velasco, y M. Lavín. 2010. Three-dimensional distribution of small pelagic fish larvae (*Sardinops sagax* and *Engraulis mordax*) in a tidal-mixing front and surrounding waters (Gulf of California). *Journal of Plankton Research* **32**:1241–1254. URL <http://plankt.oxfordjournals.org/content/32/9/1241.abstract>.
- Iverson, S., C. Field, W. Bowen, y W. Blanchard. 2004. Quantitative fatty acid signature analysis: a new method of estimating predator diets. *Ecological Monographs* **74**:211–235. URL <http://dx.doi.org/10.1890/02-4105>.
- Jaeger, A., P. Blanchard, P. Richard, y Y. Cherel. 2009. Using carbon and nitrogen isotopic values of body feathers to infer inter-and intra-individual variations of seabird feeding ecology during moult. *Marine biology* **156**:1233–1240.
- Kelly, J. F. 2000. Stable isotopes of carbon and nitrogen in the study of avian and mammalian trophic ecology. *Canadian Journal of Zoology* **78**:1–27.

- Kernaléguen, L., B. Cazelles, J. P. Arnould, P. Richard, C. Guinet, y Y. Cherel. 2012. Long-term species, sexual and individual variations in foraging strategies of fur seals revealed by stable isotopes in whiskers. *PLoS one* **7**:e32916.
- Koch, E., E. Barbier, B. Silliman, D. Reed, G. Perillo, S. Hacker, E. Granek, J. Primavera, N. Muthiga, S. Polasky, B. Halpern, C. Kennedy, C. Kappel, y E. Wolanski. 2009. Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection. *Frontiers in Ecology and the Environment* **7**:29–37. URL <http://dx.doi.org/10.1890/080126>.
- Kuhn, C. E., 2006. Measuring at sea feeding to understand the foraging behavior of pinnipeds. Tesis de doctorado, University of California, Santa Cruz, CA.
- Kuhn, C. E., D. Auriolos, y D. Costa. 2003. Habitat utilization, diving and foraging behavior of adult females California sea lions (*Zalophus californianus*): Beyond physiological limits pages 14–19.
- Lavín, M., y S. Marinone, 2003. An overview of the physical oceanography of the Central Gulf of California. Pages 173–204 *in* O. Velasco-Fuentes, J. Sheinbaum, y J. L. Ochoa de la Torre, editors. *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Le Boeuf, B., y D. Crocker. 2005. Ocean climate and seal condition. *BMC Biology* **3**:9. URL <http://www.biomedcentral.com/1741-7007/3/9>.
- Lea, M., C. Guinet, Y. Cherel, G. Duhamel, L. Dubroca, P. Pruvost, y M. Hindell. 2006. Impacts of climatic anomalies on provisioning strategies of a Southern Ocean predator. *Marine Ecology Progress Series* **310**:77–94. URL <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v310/p77-94/N1>.
- Leonel, Z. L., 2003. Variaciones geográficas en morfometría craneal en machos adultos de lobo marino de California (*Zalophus californianus*) en México. Tesis maestría, CICI-MAR, IPN.
- Lesage, V., M. Hammill, y K. Kovacs. 2002. Diet-tissue fractionation of stable carbon and nitrogen isotopes in phocid seals. *Marine Mammal Science* **18**:182–193. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-7692.2002.tb01027.x>.
- Lewis, R., T. O’Connell, M. Lewis, C. Campagna, y A. Hoelzel. 2006. Sex-specific foraging strategies and resource partitioning in the southern elephant seal (*Mirounga leonina*).

- Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences **273**:2901–2907. URL <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/273/1603/2901.abstract>.
- Lluch-Belda, D., J. Elourduy-Garay, S. Lluch-Cota, y G. Ponce-Díaz. 2000. BAC. Centros de actividad biológica del Pacífico mexicano. La Paz, BCS México, CIBNOR-CICIMAR-CONACyT .
- Lluch-Cota, S. 2000. Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta* **23**:731–740. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0399178400001213>.
- Lluch-Cota, S., A. Aragón-Noriega, F. Arreguín-Sánchez, D. Auriolles-Gamboa, J. Bautista-Romero, R. Brusca, R. Cervantes-Duarte, R. Cortés-Altamirano, P. Del-Monte-Luna, E. Esquivel-Herrera, G. Fernández, M. Hendrickx, S. Hernández-Vázquez, H. Herrera-Cervantes, M. Kahru, M. Lavín, D. Lluch-Belda, D. Lluch-Cota, J. López-Martínez, S. Marinone, M. Nevárez-Martínez, S. Ortega-García, E. Palacios-Castro, A. Páres-Sierra, G. Ponce-Díaz, M. Ramírez-Rodríguez, S. Salinas-Zavala, R. Schwartzlose, y A. Sierra-Beltrán. 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress In Oceanography* **73**:1–26. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661107000134>.
- Lluch-Cota, S. E., D. B. Lluch-Cota, D. Lluch-Belda, M. Nevárez-Martínez, A. Parés-Sierra, y S. Hernández-Vázquez. 1999. Variability of sardine catch as related to enrichment, concentration, and retention processes in the central Gulf of California. CALIFORNIA COOPERATIVE OCEANIC FISHERIES INVESTIGATIONS REPORT pages 184–190.
- Lorenzen, C. J., 1966. A method for the continuous measurement of *in vivo* chlorophyll concentration. Pages 223–227 *in* Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, volume 13. Elsevier.
- Lowry, M. S., B. S. Stewart, C. B. Heath, P. K. Yochem, y J. M. Francis. 1991. Seasonal and annual variability in the diet of California sea lions *Zalophus californianus* at San Nicholas Island, California. *Fishery Bulletin-NOAA* **89**:331–336.
- Maldonado, J. E., F. O. Davila, B. S. Stewart, E. Geffen, y R. K. Wayne. 1995. Intraspecific genetic differentiation in California sea lions (*Zalophus californianus*) from southern California and the Gulf of California. *Marine Mammal Science* **11**:46–58.

- Martínez-Díaz-de León, A., I. Pacheco-Ruiz, F. Delgadillo-Hinojosa, J. Zertuche-González, A. Chee-Barragán, R. Blanco-Betancourt, J. Guzmán-Calderón, y A. Gálvez-Telles. 2006. Spatial and temporal variability of the sea surface temperature in the Ballenas-Salsipuedes Channel (Central Gulf of California). *Journal of Geophysical Research* **111**:1–7. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2005JC002940D0>.
- MATLAB. 2010b. version 7.10.0 (R2010b). The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- McLaren, I. 1958. The biology on the ringed seal (*Phoca hispida*) in the Eastern Canadian Arctic. *Fisheries Research Board of Canada* **118**:97.
- Mearns, A. J., D. R. Young, R. Olson, y H. A. Schafer. 1981. Trophic structure and the cesium-potassium ratio in pelagic ecosystems. *CalCOFI Rep* **22**:99–110.
- Mendlewicz, J., y J. D. Ranier. 1977. Number of trophic levels in ecological communities. *Nature* **268**:28.
- Michener, R., y D. Schell, 1994. Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs. Pages 138–157 *in* K. Lajtha y R. Michener, editors. *Stable isotopes in ecology and environmental science*. Blackwell Scientific Publications, Boston, MA.
- Minagawa, M., y E. Wada. 1984. Stepwise enrichment of $\delta^{15}\text{N}$ along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **48**:1135–1140.
- Misarti, N., B. Finney, H. Maschner, y M. J. Wooller. 2009. Changes in northeast Pacific marine ecosystems over the last 4500 years: evidence from stable isotope analysis of bone collagen from archeological middens. *The Holocene* **19**:1139–1151.
- Montoya, J. P., R. Michener, y K. Lajtha. 2007. Natural abundance of ^{15}N in marine planktonic ecosystems. *Stable isotopes in ecology and environmental science* pages 176–201.
- Mote-Herrera, S., 2011. $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en vibrisas de lobo marino de California (*Zalophus californianus*) como indicador de la variación trófica estacional en Bahía Magdalena y Bahía de La Paz, BCS, México. Tesis maestría, CICIMAR-IPN.
- Nelson, G. A., 2013. fishmethods: Fishery Science Methods and Models in R. URL <http://CRAN.R-project.org/package=fishmethods>.

- Newsome, S., M. Clementz, y P. Koch. 2010. Using stable isotope biogeochemistry to study marine mammal ecology. *Marine Mammal Science* **26**:509–572. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-7692.2009.00354.x>.
- Newsome, S., P. Koch, M. Etnier, y D. Aurióles-Gamboa. 2006. Using carbon and nitrogen isotope values to investigate maternal strategies in northeast Pacific otariids. *Marine Mammal Science* **22**:556–572. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-7692.2006.00043.x>.
- Newsome, S. D., C. Martínez del Río, S. Bearhop, y D. L. Phillips. 2007. A niche for isotopic ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment* **5**:429–436.
- Newsome, S. D., M. T. Tinker, D. H. Monson, O. T. Oftedal, K. Ralls, M. M. Staedler, M. L. Fogel, y J. A. Estes. 2009. Using stable isotopes to investigate individual diet specialization in California sea otters (*Enhydra lutris nereis*). *Ecology* **90**:961–974.
- O’ Reilly, C., R. Hecky, A. Cohen, y P.-D. Plisnier. 2002. Interpreting stable isotopes in food webs: recognizing the role of time averaging at different trophic levels. *Limnology and oceanography* pages 306–309.
- Owens, N. 1987. Natural Variations in "N". *Advances in marine biology* **24**:389.
- Palter, J. B., M. S. Lozier, y R. T. Barber. 2005. The effect of advection on the nutrient reservoir in the North Atlantic subtropical gyre. *Nature* **437**:687–692.
- Pauly, D., A. Trites, E. Capuli, y V. Christensen. 1998. Diet composition and trophic levels of marine mammals. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* **55**:467–481.
- Peterson, B. J., y B. Fry. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual review of ecology and systematics* **18**:293–320.
- Páez-Rosas, D., y D. Aurióles-Gamboa. 2010. Alimentary niche partitioning in the Galapagos sea lion, *Zalophus wolfebaeki*. *Marine Biology* **157**:2769–2781. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00227-010-1535-0>.
- Porrás-Peters, H., D. Aurióles-Gamboa, V. Cruz-Escalona, y P. Koch. 2008. Trophic position and overlap of sea lions (*Zalophus californianus*) in the Gulf of California, Mexico. *Marine Mammal Science* **24**:554–576. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-7692.2008.00197.x>.
- Post, D. M. 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology* **83**:703–718.

- R Core Team, 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Reid, K., y J. P. Croxall. 2001. Environmental response of upper trophic-level predators reveals a system change in an Antarctic marine ecosystem. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* **268**:377–384. URL <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/268/1465/377.abstract>.
- Reynolds, J., y N. Aebischer. 1991. Comparison and quantification of carnivore diet by faecal analysis: a critique, with recommendations, based on a study of the Fox Fox *Vulpes vulpes*. *Mammal Review* **21**:97–122. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2907.1991.tb00113.x>.
- Riedman, M. 1990. The pinnipeds: Seals, sea lions and walruses. University of California Press page 439.
- Rigler, F., 1975. The concept of energy flow and nutrient flow between trophic levels. Pages 15–26 *in* *Unifying Concepts in Ecology*. Springer.
- Ripa, P., y S. Marinone. 1989. Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea level in the central Gulf of California, as inferred from historical data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **115**:887–914.
- Rodríguez-Valenzuela, T., 2009. Contenido energético y ácidos grasos biomarcadores en dos rutas tróficas que llegan al lobo marino, *Zalophus californianus*. Tesis maestría, CICIMAR-IPN.
- Rolland, V., C. Barbraud, y H. Weimerskirch. 2009. Assessing the impact of fisheries, climate and disease on the dynamics of the Indian yellow-nosed albatross. *Biological Conservation* **142**:1084–1095. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000632070900055X>.
- Rubenstein, D., y K. Hobson. 2004. From birds to butterflies: animal movement patterns and stable isotopes. *Trends in Ecology and Evolution* **19**:256–263. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534704000722>.
- Santamaría-del Ángel, E., S. Álvarez Borrego, y F. Muller-Karger. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on Coastal Zone Color Scanner imagery. *Journal of Geophysical Research* **99**:7411–7421.

- Schell, D., S. Saupe, y N. Haubenstock. 1989. Bowhead whale (*Dosidicus Balaena my()*) growth and feeding as estimated by $\delta^{13}\text{C}$ techniques. *Marine Biology* **103**:433–443.
- Seibel, B. A., y J. C. Drazen. 2007. The rate of metabolism in marine animals: environmental constraints, ecological demands and energetic opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **362**:2061–2078.
- Sigman, D., M. Altabet, R. Michener, D. McCorkle, B. Fry, y R. Holmes. 1997. Natural abundance-level measurement of the nitrogen isotopic composition of oceanic nitrate: an adaptation of the ammonia diffusion method. *Marine Chemistry* **57**:227–242.
- Simpson, J., A. Souza, y L. M.F., 1994. Tidal mixing in the Gulf of California. Pages 169–182 *in* K. Beven, P. Chatwin, y J. Millbank, editors. *Mixing and transport in the environment*. John Wiley and Sons, London.
- Sánchez-Arias, M., 1992. Contribución al conocimiento de los hábitos alimentarios del lobo marino de California *Zalophus californianus* en las Islas Ángel de la Guarda y Granito, Golfo de California, México. Tesis maestría, Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Soto, K., A. Trites, y M. Arias-Schreiber. 2004. The effects of prey availability on pup mortality and the timing of birth of South American sea lions (*Otaria flavescens*) in Peru. *Journal of Zoology* **264**:419–428. URL <http://dx.doi.org/10.1017/S0952836904005965>.
- Sweeney, J., y J. Harvey. 2011. Diet estimation in California sea lions, *Zalophus californianus*. *Marine Mammal Science* **27**:E279–E301.
- Szteren, D., D. Auriolos, y L. R. Gerber. 2006. Population status and trends of the California sea lion (*Zalophus californianus californianus*) in the Gulf of California, Mexico. *Sea Lions of the World*. Alaska Sea Grant College Program, University of Alaska, Fairbanks pages 369–403.
- Szteren, D., y D. Auriolos-Gamboa. 2011. Ecological regionalization of *Zalophus californianus rookeries*, as a tool for conservation in the Gulf of California. *Ciencias Marinas* **37**:349–368. URL <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/480/48020755009>.
- Tieszen, L., K. Boutton, T. K.G., y N. Slade. 1983. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet. *Oecologia* **57**:32–37. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00379558>.

- Tinker, M., D. Costa, J. Estes, y N. Wieringa. 2007. Individual dietary specialization and dive behaviour in the California sea otter: using archival time–depth data to detect alternative foraging strategies. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **54**:330–342.
- Trillmich, F., K. A. Ono, D. Costa, R. DeLong, S. Feldkamp, J. Francis, R. L. Gentry, C. Heath, B. LeBoeuf, P. Majluf, *et al.* 1991. The effects of El Niño on pinniped populations in the eastern Pacific. Springer.
- Valdez-Holguín, J., S. Álvarez Borrego, y C. Trees. 1999. Seasonal and spatial characterization of the Gulf of California phytoplankton photosynthesis parameters. *Ciencias Marinas* **25**:445–467.
- Villegas-Amtmann, S., S. E. Simmons, C. E. Kuhn, L. A. Huckstadt, y D. P. Costa. 2011. Latitudinal range influences the seasonal variation in the foraging behavior of marine top predators. *PloS one* **6**:e23166.
- von Bertalanffy, L. 1964. Basic concepts in quantitative biology of metabolism. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen* **9**:5–37.
- Zeitzschel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* **3**:201–207. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00360952>.
- Zirino, A., M. Hernandez-Ayon, R. Fuhrmanr, S. Alvarez-Borrego, G. Gaxiola-Castro, J. Lara-Lara, y R. Bernstein. 1997. Estimate of surface pCO₂ in the gulf of california from underway ph measurements and satellite imagery. *Ciencias Marinas* **23**:1–22.

Índice de figuras

1.	Localización de las seis colonias reproductoras de lobo marino de California en la RA, Golfo de California	6
2.	Correlación entre el perfil isotópico y la Clo- <i>a</i> lo largo del tiempo	7
3.	Golfo de California y las cinco provincias en las que se ha dividido	11
4.	Correlación entre la longitud de la vibrisa y el número de periodos encontrados en el perfil isotópico de $\delta^{15}\text{N}$ de las vibrisas.	18
5.	Periodos encontrados en los valores $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa 3	23
6.	Distribución de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de las vibrisas de las hembras de <i>Z. californianus</i> de la isla San Esteban	26
7.	Perfiles isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de los valores secuenciales de las once vibrisas	28
8.	Continuación de la figura 7. Perfiles isotópicos	29
9.	Agrupación de las vibrisas por perfil isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$	30
10.	Imagen promedio (7 años) de la concentración de Clo- <i>a</i> y TSM de la zona adyacente a la isla SE	31
11.	Series de tiempo de Clo- <i>a</i> (A) y TSM (B) de la zona aledaña a la isla SE.	32
12.	Relación entre la longitud de la vibrisa y la edad por medio del modelo de von Bertalanffy	34
13.	Relación entre la longitud de la vibrisa y la edad mediante el modelo lineal.	35
14.	Correlación de las once vibrisas entre los perfiles isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) y $\delta^{15}\text{N}$ (‰) con respecto a los valores de Clo- <i>a</i> ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) y TSM ($^{\circ}\text{C}$)	37
15.	Representación grafica de la media y error estándar de los valores isotópicos de las vibrisas	39
16.	Parte de la estructura de la cadena trófica marina adyacente a isla SE	40
17.	Esquematación del enriquecimiento isotópico del $\delta^{15}\text{N}$ que se registra con el aumento del nivel trófico en el GC	45
18.	Posibles cambios ontogénicos registrados en una vibrisa de hembra de <i>Z. californianus</i>	47
19.	Enriquecimiento que se registra del $\delta^{13}\text{C}$ con respecto a las zonas de forrajeo	48
20.	Esquematación del tiempo que transcurre entre la modificación de los valores basales de los isótopos de C y N del fitoplancton hasta que son reflejados en las vibrisas de lobo marino de SE.	55
21.	Representación gráfica de una onda periódica	76

Índice de tablas

1.	Relación de las vibrisas de <i>Zalophus californianus</i> de la lobera de SE	22
2.	Series de periodos encontrados en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de la V3	24
3.	Número de fragmentos analizados isotópicamente	25
4.	Estadístico Post-hoc de Tukey aplicado a los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de todas las hembras.	25
5.	Estadístico Post-hoc de Tukey aplicado a los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de todas las hembras.	25
6.	Tasa de crecimiento de cada una de las vibrisas estimada a través del modelo de von Bertalanffy	33
7.	Estimación de la fecha a la cual corresponde el último fragmento de la punta	36
8.	Tiempo de desfase entre los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ y las variables ambientales	36
9.	Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de especies adyacentes a isla San Esteban	41
10.	Caracterización de la ecología trófica de cada hembra mediante los valores isotópicos de C y N. Promedios, valores mínimos y máximos, varianza individual (S^2) y nivel trófico (NT). Los números en rojo no se tomaron en cuenta para obtener el promedio de la varianza.	42
11.	Tasa de crecimiento estimada para las vibrisas de diferentes especies de pinnípedos	51
12.	Series de periodos encontrados en el $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la V1 en función del número de fragmentos (NF); así como el ajuste (R^2) que realiza el modelo.	78
13.	Series de periodos encontrados en el $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la V2 en función del número de fragmentos (NF); así como el ajuste (R^2) que realiza el modelo.	78

A. Análisis armónico

La idea básica de las series de Fourier es que toda función periódica de período T puede ser expresada como una suma trigonométrica de senos y cosenos del mismo período T .

La aplicación más intuitiva de la teoría de Fourier es aquella que se refiere al tratamiento de las señales periódicas, ya que sus resultados tienen una sencilla interpretación física.

En primer lugar es necesario definir el concepto de función periódica como aquella cuyos valores se repiten a intervalos regulares, el tiempo entre las sucesivas repeticiones es lo que se conoce como período. Matemáticamente, podemos decir que una función temporal es periódica cuando se cumple la siguiente relación:

$$f(t) = f(t + T)$$

para todo valor de t . La constante mínima que satisface la anterior relación es denominada período (T). A la parte de la función que abarca un tiempo equivalente a un período T se le denomina ciclo (Fig.).

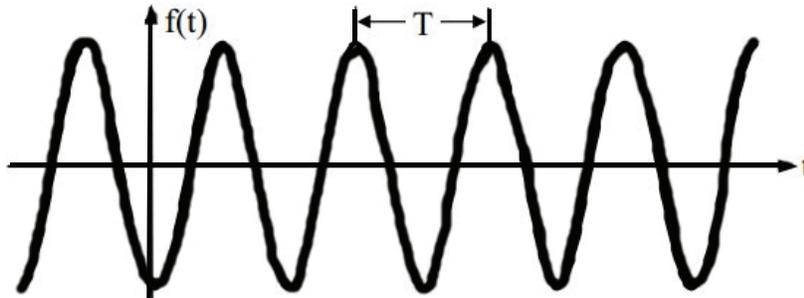


Figura 21: Representación gráfica de una onda periódica

En una función periódica se define la frecuencia como la inversa de período, o sea, como el número de ciclos por tiempo:

$$fr = 1/T$$

Una de las ondas periódicas más representativas es la sinusoidal, cuya expresión es:

$$f(t) = A \text{sen}(\omega_0 t + \theta)$$

Siendo A lo que se conoce como amplitud y θ su fase inicial. En este caso el valor de pico (máximo y mínimo) es $F_p = A$ y el valor de pico a pico $F_{pp} = 2A$. Asimismo, el valor medio para esta forma de onda es igual a cero y su valor eficaz $A/\sqrt{2}$.

La teoría de Fourier afirma que cualquier función periódica $f(t)$, ya sea más o menos compleja, se puede descomponer en suma de funciones simples, sinusoidales, cuya frecuencia es múltiplo de la función periódica. Esto es, dicha función se puede descomponer en una serie armónica infinita (expresada como):

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + b_n \operatorname{sen} n\omega_0 t = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n)$$

donde:

ω_0 ($\text{ofr} = \frac{\omega_0}{2\pi}$) es la frecuencia de la función periódica y recibe el nombre de frecuencia fundamental a_n, b_n, C_n, θ_n son los coeficientes de la Serie de Fourier que definen las senoides cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental

La componente de la Serie de Fourier cuya frecuencia coincide con la fundamental ($n=1$) recibe el nombre de componente fundamental: $a_1 \cos \omega_0 t + b_1 \operatorname{sen} \omega_0 t$ o $C_1 \cos(\omega_0 t - \theta_1)$. Al resto de las componentes se les denomina componentes armónicas, así el armónico de orden n o n -ésimo sería aquel cuya frecuencia es n veces la fundamental: $a_n \cos n\omega_0 t + b_n \operatorname{sen} n\omega_0 t$ o $C_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n)$. Igualmente, la frecuencia de las componentes armónicas recibe a su vez el nombre de frecuencia armónica. En el caso de C_n y θ_n , éstas se suelen llamar además amplitud armónica y ángulo de fase.

B. Periodicidad de los valores isotópicos de C y N de las vibrisas 1 y 2

Vibrisa 1

Tabla 12: Series de periodos encontrados en el $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la V1 en función del número de fragmentos (NF); así como el ajuste (R^2) que realiza el modelo.

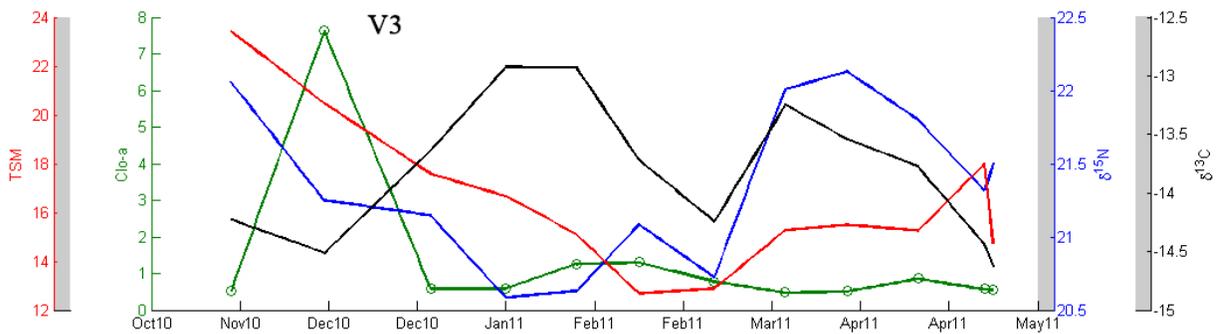
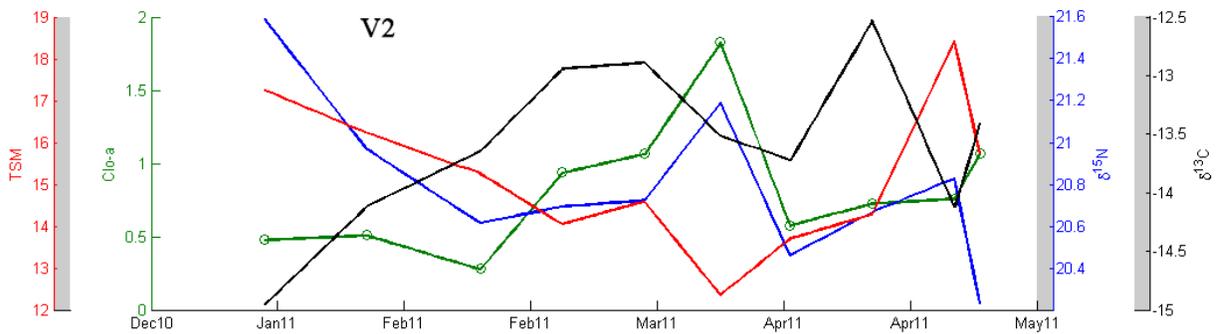
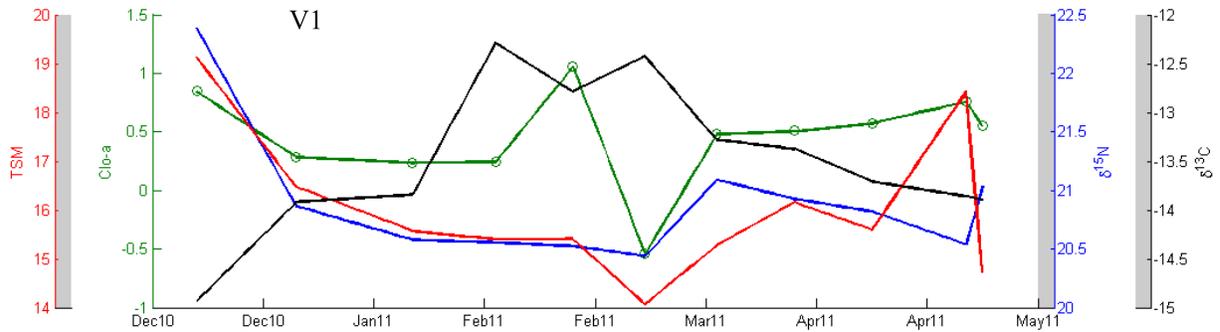
Serie	NF	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$	
		Periodos	R^2	Periodos	R^2
1	85	71, 42, 34, 24, 19, 10, 16	0.800	18, 13, 25, 8, 10	0.800
2	80	42, 80, 27, 16	0.889	34, 18, 14, 8, 23, 52, 11, 6, 7	0.892
3	75	85, 53, 37, 24, 19, 16	0.865	35, 18, 8, 26, 14, 6	0.782
4	70	52, 85, 32, 10	0.875	35, 18, 61, 14, 25, 8, 11	0.896
5	65	50, 31, 85, 10	0.858	33, 50, 18, 8, 11, 14, 25	0.913
6	60	85, 51, 32	0.854	32, 52, 17, 8, 21, 11, 9, 14	0.951
7	55	52, 30, 10	0.866	55, 31, 24, 19, 14, 8, 11, 5	0.962
8	50	51, 27, 10	0.865	37, 15, 8, 10, 20	0.934

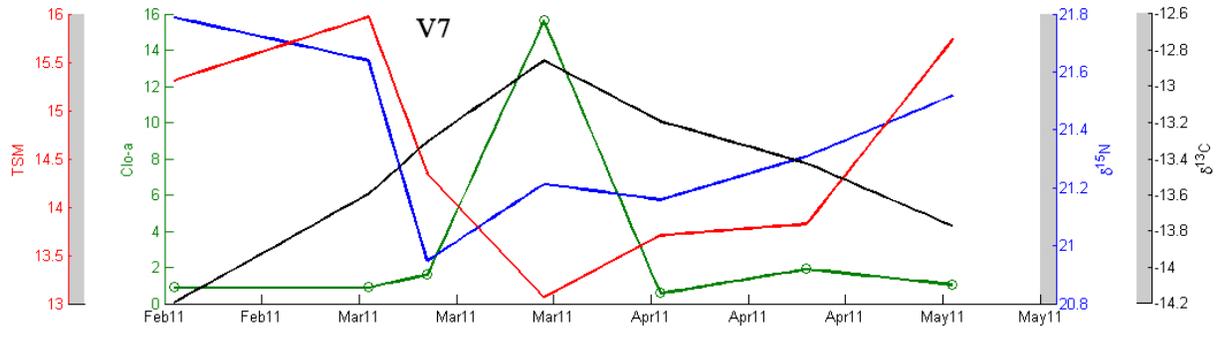
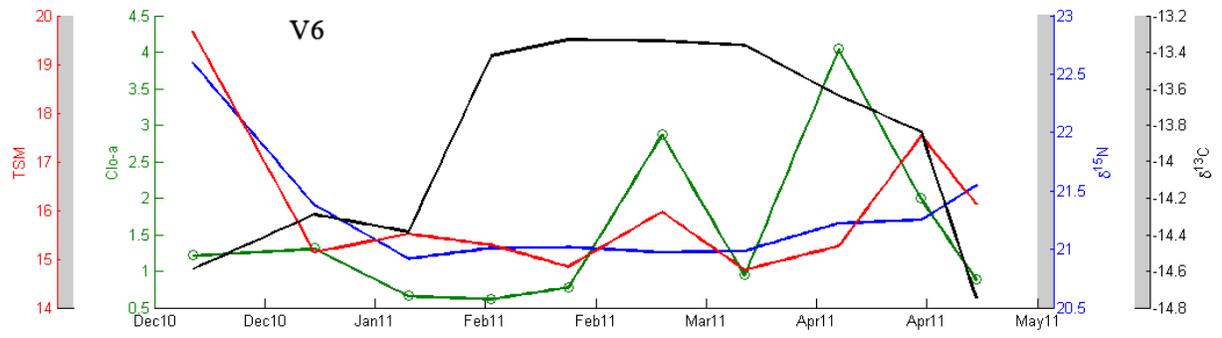
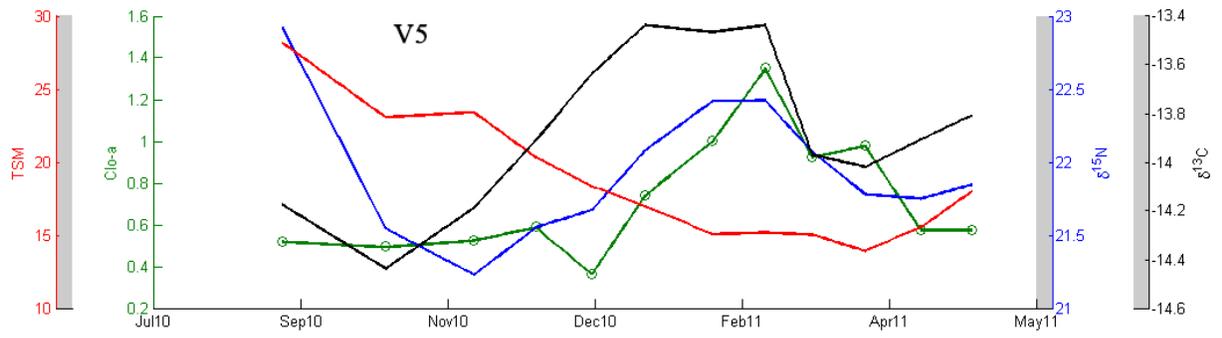
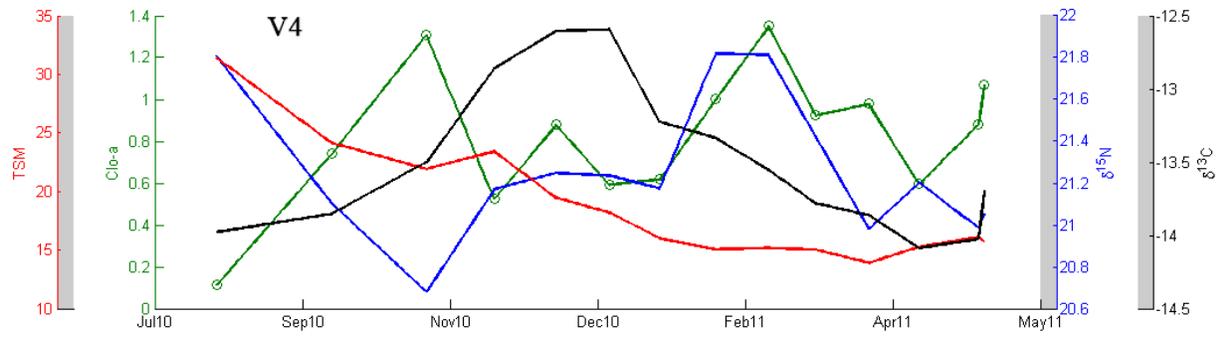
Vibrisa 2

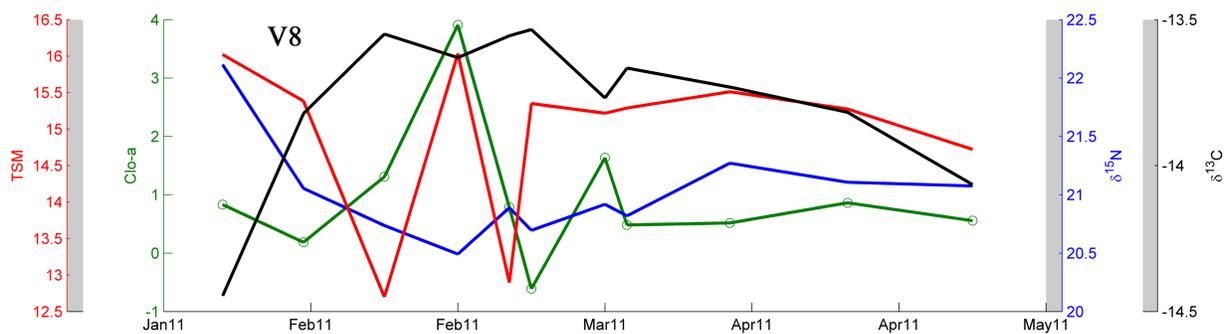
Tabla 13: Series de periodos encontrados en el $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la V2 en función del número de fragmentos (NF); así como el ajuste (R^2) que realiza el modelo.

Serie	NF	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$	
		Periodos	R^2	Periodos	R^2
1	85	35, 22, 57, 14, 11, 4	0.709	17, 26, 20, 49	0.639
2	80	35, 58, 23	0.67	17, 25, 20, 52	0.648
3	75	38, 66, 23	0.678	20, 16, 28, 61	0.703
4	70	38, 69, 23, 4	0.703	21, 16, 28, 51	0.664
5	65	45, 31	0.613	22, 16	0.61
6	60	44, 28, 4	0.697	23, 16	0.652
7	55	42, 26, 4	0.702	23, 16	0.630
8	50	41, 25, 4	0.705	23, 16	0.639

C. Correlación de los perfiles isotópicos con respecto a las variables ambientales







Correlación de las once vibras entre los perfiles isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) (línea negra) y $\delta^{15}\text{N}$ (‰) (línea azul) con respecto a los valores de Clo-*a* ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) (línea verde) y TSM ($^{\circ}\text{C}$) (línea roja).