



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México



$\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ EN CRÍAS DE ELEFANTE MARINO (*Mirounga angustirostris*),
COMO INDICADORES DE POTENCIALES ÁREAS DE ALIMENTACIÓN DE
HEMBRAS RESIDENTES DE ISLAS SAN BENITO.

T E S I S

que para obtener el grado académico de

M a e s t r a E n C i e n c i a s

(Biología Marina)

p r e s e n t a:

LIGIA RIVERA DE LA PARRA

Director de Tesis: Dr. DAVID AURIOLES GAMBOA

Comité Tutorial: Dra. GISELA HECKEL DZIENDZIELEWSKI
Dr. MARTÍN SOTO JIMÉNEZ
Dra. CLAUDIA JANETL HERNÁNDEZ CAMACHO
Dr. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER

México, 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“El que todo lo juzga fácil, encontrará la vida difícil”

Lao-Tsé (604 A.C. – 531 A.C.)

ÍNDICE

Listado de Figuras.....	i
Listado de Tablas.....	iv
Glosario.....	v
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	7
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS.....	10
OBJETIVOS.....	12
ZONA DE ESTUDIO	13
MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
Recolecta de muestras	15
Pelo	15
Vibrisas	16
Procesamiento de las muestras.....	16
Análisis de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$	17
Análisis de datos	18
Pelo	18
Fraccionamiento isotópico madre-cría	19
Vibrisas	19
RESULTADOS	20
Censo y longitud de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i>	20
$\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i>	23
Fraccionamiento isotópico madre-cría	31
Patrones isotópicos en vibrisas	34
DISCUSIÓN	39
Censo y longitud de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i>	39
Análisis de isótopos estables	40

Temporalidad de la información isotópica contendida en el pelo de las crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i>	40
Temporalidad de la información isotópica contendida en las vibrisas de las crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i>	41
Interpretación de las señales de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de <i>Mirounga angustirostris</i>	42
Fraccionamiento isotópico madre-cría	42
Identificación de grupos migratorios	44
Patrones isotópicos en vibrisas	51
Perfil isotópico de Carbono	51
Perfil isotópico de Nitrógeno	53
CONCLUSIONES	56
LITERATURA CITADA	58

LISTADO DE FIGURAS

- Figura 1.** A) Distribución del elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris* (Tomado de Campagna, 2008). B) Distribución del elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, en México y localización de las colonias reproductoras actuales en aguas mexicanas y de Estados Unidos (modificado de Antonelis *et al.*, 1981).....**13**
- Figura 2.** Ubicación geográfica de las Islas San Benito, B. C. México. Dentro del archipiélago, la isla de la izquierda es la Isla Oeste, la de en medio es la Isla Centro y la de la derecha la Isla Este. Se muestra con triángulos rojos los sitios donde se realizó la recolecta de las muestras de pelo y vibrisas de crías de elefante marino del norte.....**25**
- Figura 3.** Censo de crías, hembras y machos adultos de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, en las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.....**31**
- Figura 4.** Longitudes promedio (\pm error estándar) de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, para cada una de las playas que se muestrearon en las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.....**32**
- Figura 5.** Longitudes promedio (\pm error estándar) de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, para las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.....**33**
- Figura 6.** Distribución de frecuencias de la longitud total de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, que se registraron a lo largo de las 3 Islas del Archipiélago San Benito.....**33**
- Figura 7.** Valores isotópicos promedio (\pm error estándar) de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, en todas las playas de muestreo del Archipiélago San Benito.....**34**
- Figura 8.** Valores isotópicos promedio (\pm error estándar) de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, en cada una de las playas muestreadas en las Islas Oeste ($n = 49$), Centro ($n = 71$) y Este ($n = 44$) del Archipiélago San Benito.....**35**

Figura 9. Valores promedio (\pm error estándar) de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i> , de las Islas Oeste ($n = 49$), Centro ($n = 71$) y Este ($n = 44$) del Archipiélago San Benito.....	36
Figura 10. Distribución de frecuencias de $\delta^{13}\text{C}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i> , de las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.....	37
Figura 11. Distribución de frecuencias de $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i> , de las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.....	37
Figura 12. Correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i> , para las Islas Centro, Oeste y Este del Archipiélago San Benito.....	38
Figura 13. Distribución bimodal de frecuencias de $\delta^{13}\text{C}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i> , de las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito, se muestra la tendencia bimodal en línea continua.....	39
Figura 14. Valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (\pm error estándar) en los dos grupos de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i> , presentes en las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.....	40
Figura 15. Correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i> , para cada uno de los grupos migratorios (costero – oceánico) presentes en Isla Oeste (A), Isla Centro (B) e Isla Este (C) del Archipiélago San Benito.....	41
Figura 16. Porcentaje de hembras de elefante marino del norte, <i>Mirounga angustirostris</i> , del Archipiélago San Benito que corresponden a los diferentes grupos migratorios (costero y oceánico).....	45
Figura 17. Perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ registrados a lo largo de cada una de las vibrisas colectadas en crías destetadas de <i>Mirounga angustirostris</i> en el Archipiélago San Benito. Todos los valores isotópicos se encuentran graficados en orden cronológico comenzando con los valores desde la punta (periodo más antiguo) hacia la base (periodo más reciente) de la vibrisa.....	47
Figura 18. Perfiles de $\delta^{15}\text{N}$ registrados a lo largo de cada una de las vibrisas colectadas en crías destetadas de <i>Mirounga angustirostris</i> en el Archipiélago San Benito. Todos los	

valores isotópicos se encuentran graficados en orden cronológico comenzando con los valores desde la punta (periodo más antiguo) hacia la base (periodo más reciente) de la vibrisa.....**48**

Figura 19. Rutas migratorias observadas en el elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, residentes de Isla Año nuevo, California, por medio de telemetría satelital; a) destino migratorio costero; b) destino migratorio costero-oceánico; c) destino migratorio oceánico (tomado de Simmons *et al.*, 2007).....**59**

Figura 20. Perfil de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, registrados a lo largo de una de las vibrisas colectadas en crías destetadas de *Mirounga angustirostris* en el Archipiélago San Benito. Todos los valores isotópicos se encuentran graficados en orden cronológico comenzando con los valores desde la punta (época anterior) hacia la base (época reciente) de la vibrisa. Se muestra con una flecha el valor hipotético asignado al nacimiento, seguido de los valores correspondientes a la lactancia (azul); en rojo se muestra las señales comprendidas durante la gestación.....**64**

LISTADO DE TABLAS

- Tabla 1.** Señales isotópicas (\pm desviación estándar) de vibrisas de hembras adultas y crías de elefante marino del norte del Archipiélago San Benito. El fraccionamiento de $\delta^{15}\text{N}$ entre hembras y crías fue significativo a partir de +1.936 ‰.....**42**
- Tabla 2.** Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (promedio \pm desviación estándar) y representación proporcional de cada uno de los grupos migratorios presentes en (a) Isla Oeste, (b) Isla Centro e (c) Isla Este, a partir del pelo de las crías. Los valores ajustados de $\delta^{15}\text{N}$ representan los valores posibles de las madres; este ajuste se llevó a cabo a partir del valor de fraccionamiento entre vibrisas de hembras y crías. No se generaron valores ajustados de $\delta^{13}\text{C}$ debido a que no se encontró un enriquecimiento significativo entre hembras y crías**43**
- Tabla 3.** Valores isotópicos promedio (\pm desviación estándar) de hembras de elefante marino del norte a lo largo de las tres Islas del Archipiélago San Benito. Se muestra la proporción correspondiente de individuos que realizan los dos tipos de migraciones.....**44**
- Tabla 4.** Valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (\pm desviación estándar) en cada una de las etapas establecidas (gestación y lactancia) en las 5 vibrisas de crías de elefante marino del norte analizadas. Se muestra el nivel de significancia en cada caso.....**49**
- Tabla 5.** Valores de fraccionamiento isotópico madre-cría reportados para diferentes tejidos de pinnípedos.....**50**

GLOSARIO

Acreción. Crecimiento por adición de materia, como en los depósitos minerales o los continentes.

Ayuno. Abstinencia alimentaria, presente en prácticamente todas las especies de la familia Phocidae (focas), mientras permanecen en tierra ya sea por el periodo de muda o de reproducción y lactancia.

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

(δ) **Delta.** Notación adoptada para expresar diferencias relativas en las razones de isótopos entre una muestra y un estándar. Se expresa en unidades de partes por mil (‰).

$\delta^{13}\text{C}$. Diferencia expresada en partes por mil (‰) entre la razón de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de una muestra con respecto al del estándar Pee Dee Belemnite. Se usa principalmente para definir el tipo de ambiente que utilizan los consumidores (ej. costero/oceánico).

$\delta^{15}\text{N}$. Diferencia expresada en partes por mil (‰) entre la razón de $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ de una muestra con respecto a la del estándar nitrógeno atmosférico. Se usa para definir la posición trófica de los organismos.

Enriquecimiento isotópico. Cantidad comparativa de ^{15}N o ^{13}C con respecto a una cantidad previa determinada, como es el caso de aumentos en el nivel trófico. Una sustancia enriquecida en ^{15}N o ^{13}C estará disminuida isotópicamente en ^{14}N y en ^{12}C respectivamente.

Estrategias de alimentación. Conjunto de tácticas con la que un depredador selecciona distintos tipos de presas en el medio ambiente.

Fócido. Individuo perteneciente a la familia Phocidae. Los fócidos se caracterizan por no tener orejas y por presentar extremidades posteriores siempre extendidas a los lados de la cola. Son comúnmente conocidos como focas.

Forrajeo. Comportamiento asociado con la búsqueda, captura y consumo de presas.

Fraccionamiento isotópico. Aumento en la concentración de un isótopo estable que se presenta en un consumidor con respecto a la de su presa, típicamente tal aumento es, debido a una discriminación metabólica hacia el isótopo pesado.

Isótopo. Cada uno de los elementos químicos que poseen el mismo número de protones y electrones pero diferente número de neutrones. Todos los isótopos de un elemento ocupan el mismo lugar en la tabla periódica y poseen las mismas propiedades químicas.

Isótopo estable o pesado. Elemento químico que no reacciona tan fácilmente, ya que sus puentes de unión requieren mucha más energía para romperse.

Materia orgánica particulada (MOP). Materia orgánica de diámetro mayor a 0.2 μm y menor a 1cm, en la que se incluyen principalmente secreciones, exudados celulares, material fecal de organismos vivos, restos de fitoplancton, zooplancton, y material detrítico parcialmente o totalmente degradado.

Migración. Patrón conductual en el que un conjunto de organismos se desplaza periódicamente de un área a otra para alimentarse o reproducirse.

Muda Anual. En los mamíferos este término se refiere a la sustitución del pelo viejo por nuevo, tras sufrir éste, un desgaste importante por el paso del tiempo y por el efecto de las inclemencias ambientales. Se realiza una vez al año.

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 obtiene su materia y energía.

Pinnípedo. Término que deriva del latín *pinna* (aleta) y *pedís* (pie), refiriéndose al grupo de mamíferos carnívoros acuáticos (focas, lobos marinos, lobos de pelo fino y morsas) los cuales presentan extremidades en forma de aleta.

Tasa de recambio isotópico. Periodo en el que las concentraciones isotópicas de un tejido reflejan la señal isotópica de una dieta. Los tejidos con una tasa de recambio isotópica rápida reflejan una dieta reciente mientras que aquellos tejidos con una tasa de recambio lenta reflejarán una dieta promedio de largos periodos.

Viaje de alimentación. Patrón conductual a partir del cual el consumidor realiza viajes de distinta magnitud para la obtención de alimento.

Vibrisa. Bigote. Pelos especializados que presentan algunos mamíferos como elemento sensorial táctil.

RESUMEN

El elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, se caracteriza por presentar dos temporadas de alimentación, una post-reproductiva y otra post-muda en el mismo año. Si bien existe información sobre rutas y destinos migratorios para hembras y machos de colonias de California, poco se sabe sobre la migración de elefantes marinos de poblaciones mexicanas. Las hembras rastreadas por satélite en California muestran tres variantes migratorias: costera, costero-oceánica y estrictamente oceánica, lo que conlleva a diferencias en la dieta y sus valores de isótopos estables ($\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$). Sin embargo, isotópicamente sólo es posible evidenciar dos diferentes señales que corresponden a la oceánica y la costera. En años recientes, el análisis de isótopos estables de carbono y nitrógeno ha sido empleado para estudiar hábitos alimentarios de especies residentes y migratorias bajo el principio de que las firmas isotópicas reflejan valores isotópicos del alimento y hábitat donde fue consumido. El objetivo de este trabajo, consistió en explorar las posibles diferencias en los destinos migratorios de las hembras del archipiélago San Benito con base en la firma isotópica en el pelo de sus crías. Se obtuvo el valor de fraccionamiento isotópico entre madre y cría considerando que las últimas deben mostrar valores enriquecidos pero proporcionales a los de sus madres debido a que sólo se alimentan de leche en esa etapa. El valor de fraccionamiento obtenido para $\delta^{15}\text{N}$ fue de 1.9‰ mientras que para $\delta^{13}\text{C}$ no se generó ningún fraccionamiento debido a la influencia lipídica de la leche enriquecida en ^{12}C durante el periodo de lactancia de las crías. Se analizó pelo de 169 crías recolectado en las tres Islas San Benito (Este, Oeste y Centro) durante Febrero del 2010, sobre las que se aplicó el fraccionamiento madre-cría obtenido. Los valores resultantes se agruparon en dos señales isotópicas distintas, la primera con valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de $-17.9\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$ y $15.4\text{‰} \pm 1.0\text{‰}$ (oceánica) y la segunda con valores de $-16.2\text{‰} \pm 0.4\text{‰}$ y $17.3\text{‰} \pm 0.8\text{‰}$ (costera); sugiriendo que es muy similar a California (grupo oceánico: 71.03% y grupo costero: 28.97%), los valores isotópicos de las hembras de San Benito sólo reflejan claramente dos destinos migratorios, donde la variante oceánica fue la más frecuente para cada isla (59%, 67% y 69% respectivamente). Adicionalmente y con base en el análisis de isótopos estables a lo largo de 5 vibrisas de crías destetadas colectadas en la misma temporada en el Archipiélago San Benito, se definieron a través de los valores de $\delta^{13}\text{C}$, dos secciones de la vibrisa, caracterizadas por haberse sintetizado en dos periodos de tiempo diferentes, el primero correspondiente a la gestación y el segundo a la lactancia.

ABSTRACT

The northern elephant seal (NES) females (*Mirounga angustirostris*) show a post-breeding and a post-molting migration in the same year. Californian NES females traced by satellite indicate three migratory variants: coastal, costal-oceanic and oceanic that would lead to differences in the diet and stable isotopes signatures ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$). However stable isotope values in NES female vibrissae show only two clearly distinct signals corresponding to the ocean and coastal migrations. The aim of this work is to explore the proportions of NES females population from San Benito Islands (Mexico) performing each migratory variant based on the isotopic signature measured in pup's fur, considering that pups should show isotope values enriched but proportional to those of their mothers. Isotope fractionation from mother to pup was validated using whisker samples with no significant difference between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ enrichment of +1.9. We sampled fur from 169 pups from the three San Benito Islands (East, West and Centre) in February 2010 and estimated their $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values. After adjustment for mother-pup fractionation, the NES isotope values clustered into two distinct groups: A likely oceanic group with mean values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of $-17.9\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$ and $15.4\text{‰} \pm 1.0\text{‰}$ respectively, and one coastal group with values of $-16.2\text{‰} \pm 0.4\text{‰}$ and $17.3\text{‰} \pm 0.8\text{‰}$. Similar to California (71.03% oceanic vs 28.97% coastal), the proportion of NES of San Benito showed higher numbers of females in the oceanic variant for each island (59%, 67% and 69% respectively). Furthermore, and using stable isotope analysis along 5 weaned pups vibrissae of collected during the same season at San Benito Islands, we achieved to define trough $\delta^{13}\text{C}$ values, two sections of the vibrisa, characterized by have been synthesized in two different periods of time, the first one, corresponding to the gestational period and the second to the lactation.

INTRODUCCIÓN

El elefante marino del norte (*Mirounga angustirostris*) es una especie que se clasifica dentro de la familia Phocidae (focas verdaderas), la cual se caracteriza por un marcado dimorfismo sexual y por presentar la mayor masa corporal entre las 34 especies de pinnípedos existentes (King, 1991 y Le Boeuf y Laws, 1994). Dentro del género se han descrito dos únicas especies: el elefante marino del sur *Mirounga leonina* (Linnaeus, 1758), habitante del Océano Austral y el elefante marino del norte *Mirounga angustirostris* (Gill, 1866), correspondiente al hemisferio norte (McGinnis y Schusterman, 1981). La única distinción entre ambas especies tiene que ver con que *M. leonina* presenta una masa corporal ligeramente mayor que *M. angustirostris* (Reeves *et al.*, 2002).

El elefante marino del norte se distribuye a lo largo del Pacífico Nororiental desde las Islas Aleutianas en Alaska hasta la Península de Baja California Sur en México. Éste se reproduce en 15 localidades diferentes (Campagna, 2008) conformadas por islas oceánicas y algunas regiones costeras (Reijnders *et al.*, 1994) que van desde Point Reyes, California (38° N) hasta Isla Natividad (27° 51' N) (King, 1991; Stewart *et al.*, 1994), cubriendo una línea de costa de 1334 km aproximadamente. En México se reproduce en Baja California Norte, desde las Islas Coronados hasta Isla Natividad (27° 51' N; Fig. 1).

La población actual total de la especie se estima en alrededor de 161,000 individuos (Condit, com. pers. citada en Auriolles *et al.*, 2010). Para el caso de las Islas San Benito, en la costa occidental de Baja California, la población se encontraba en crecimiento hasta 1975 (Le Boeuf y Laws, 1994) y a partir de entonces se estabilizó en alrededor de 11,100 individuos (García-Aguilar *et al.*, en preparación).

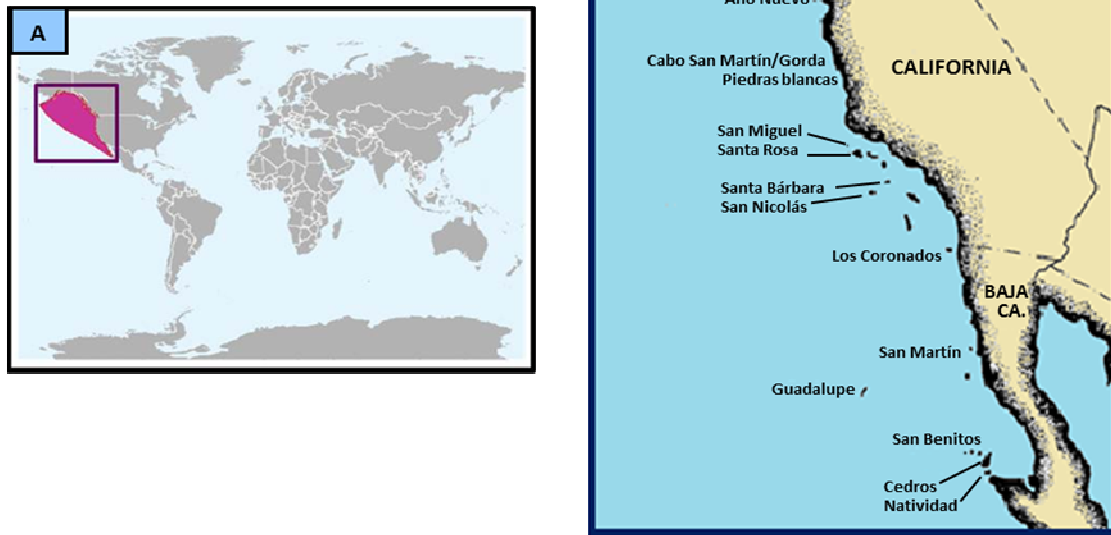


Figura 1. A) Distribución del elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris* (Tomado de Campagna, 2008). B) Distribución del elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris* en México y localización de las colonias reproductoras actuales en aguas mexicanas y de EUA (modificado de Antonelis *et al.*, 1981).

La temporada reproductiva del elefante marino del norte comienza a principios de diciembre y termina a principios de marzo (Le Boeuf, 1972; Le Boeuf y Laws, 1994). Su estrategia reproductiva es de tipo poligínica, en donde se observan harenes formados por decenas o cientos de hembras que son controlados por uno o más machos adultos de mayor jerarquía (dominancia). Al comienzo de la temporada, las hembras dan a luz a los seis días de que llegan a tierra (después de una gestación de 11 meses, con implantación retardada de 3 meses) (Reiter *et al.*, 1980). Los neonatos son amamantados intensamente por ~26 días. Al final de este periodo, las hembras entran en estro y se aparean (Le Boeuf *et al.*, 1972). Una vez que las crías son destetadas abruptamente, éstas ayunan por dos meses y medio, tiempo que se relaciona con el desarrollo de habilidades de nado y buceo (Reiter *et al.*, 1978).

Una característica interesante de la historia de vida del elefante marino del norte, es que éste presenta una doble migración anual. Una vez que regresan a tierra para la reproducción o la muda, los organismos se mantienen en ayuno hasta que nuevamente regresan a alimentarse intensamente en aguas oceánicas del Pacífico Noroccidental. La migración post-reproductiva es realizada desde febrero hasta mediados de abril, después de haber permanecido de 1 a 3 meses en ayuno durante la temporada reproductiva en tierra. Esta migración dura en promedio 2.5 meses para hembras y 4 meses para machos; posteriormente regresan a los sitios reproductivos por periodos cortos de 3 a 4 semanas para realizar la muda; al finalizar este periodo en tierra, migran a aguas profundas al noroeste del Océano Pacífico. Durante esta migración post-muda, las hembras se alimentan por un periodo aproximado de 7 meses, mientras que los machos lo hacen durante 4 meses aproximadamente. Finalmente tanto hembras como machos, regresan nuevamente a tierra para la temporada reproductiva en diciembre (Le Boeuf y Kaza, 1981; Le Boeuf y Laws, 1994; Berta *et al.*, 2006).

Durante estos largos desplazamientos asociados a la alimentación se presenta una segregación sexual. Los machos adultos se alimentan en latitudes más altas que las hembras adultas, a lo largo del margen continental entre la costa de Oregon y la parte oeste de las Islas Aleutianas, entre los 42° y los 58° N (Condit y Le Boeuf, 1984; Le Boeuf *et al.*, 2000), mientras que las hembras adultas se alimentan en un área más amplia del Pacífico Nororiental, entre los 38° y 60° N, desde la costa occidental de la península de Baja California (125°O) hasta los 172.5° E (Le Boeuf *et al.*, 2000). Adicionalmente se sabe que las hembras de elefante marino del norte residentes de Isla Año Nuevo, muestran tres variantes espaciales en sus migraciones; costera, costero-oceánica y estrictamente oceánica (Simmons *et al.*, 2007).

Esta segregación entre sexos está estrechamente ligada al marcado dimorfismo sexual (Thompson *et al.*, 1998; Le Boeuf *et al.*, 2000), donde los machos de elefante marino del norte llegan a ser hasta 10 veces más grandes que las hembras. Como consecuencia, los machos adultos requieren de un mayor aporte energético diario, que

los obliga a buscar zonas de alimento más abundantes pero también más lejanas (como los ambientes subpolares), en comparación con las hembras adultas (Riedman, 1990; Boyd *et al.*, 1994).

Esta conducta de los elefantes marinos, la cual está ligada a una larga permanencia en el mar alimentándose (sólo regresando a tierra para reproducirse y mudar en áreas latitudinalmente distintas), tiene que ver con la carencia de información que se tenía acerca de los hábitos alimentarios de la especie, ya que no existían las herramientas necesarias para poder saber a dónde se dirigían los individuos durante sus largos viajes; hasta que en los años ochenta, se empezó a utilizar telemetría satelital para inferir movimientos de animales en vida libre (McGinnis y Schusterman, 1981).

La ecología alimentaria del elefante marino del norte ha sido estudiada ampliamente en términos del uso de hábitat (Hindell *et al.*, 1991a; McConnell *et al.*, 1992; McConnell y Fedak, 1996; Le Boeuf, 1994; y Le Boeuf *et al.*, 2000), de comportamiento de buceo (Biuw *et al.*, 2003; Field *et al.*, 2001; Hindell *et al.*, 1991b y Le Boeuf *et al.*, 1996) y dieta (Daneri *et al.*, 2000; Antonelis 1994 y Bradshaw *et al.*, 2003). Es importante señalar que la mayoría de la información disponible acerca del elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, fue generada a partir de colonias residentes en el norte de California, por lo que poco se sabe acerca de las poblaciones mexicanas.

De acuerdo a McGinnis y Schusterman, (1981) y Condit y Le Boeuf, (1984), la dieta del elefante marino del norte consiste de 30 especies presa, entre las que se encuentran algunas de hábitos nocturnos y pelágicos, como cefalópodos y mictófidios, siendo éstos la fuente principal de alimento. De acuerdo con Antonelis *et al.*, (1987) la dieta del elefante marino del norte se basa en un 75% de cefalópodos y en menor proporción (25%) de peces (Riedman, 1990). Entre las diversas especies de cefalópodos que conforman su dieta, las más frecuentes son *Octopoteuthis deletron*,

Onycoteuthis borealjaponicus, *Histioteuthis heteropsis*, *Gonatopsis borealis*, *Histioteuthis dofleini* y *Gonatus* spp. En términos de su frecuencia, sobresalen algunas especies de peces como la merluza (*Merluccius productus*) y crustáceos como la langostilla (*Pleuroncodes planipes*) (Condit y Le Boeuf, 1984; Antonelis *et al.*, 1987; Antonelis *et al.*, 1994; Sinclair, 1994).

Análisis de isótopos estables de N y C

Las características de la dieta de los organismos y hábitos alimentarios en general pueden estudiarse mediante diversas técnicas que incluyen: el análisis de excretas con base en la recuperación e identificación de estructuras duras como otolitos de peces y picos de cefalópodos (García-Rodríguez y Auriolés, 2004; Porrás-Peters *et al.*, 2008). También se ha desarrollado la técnica de la telemetría satelital (Kuhn *et al.*, 2004; Kuhn, *et al.*, 2006;), los perfiles de ácidos grasos (Cupa-Cedillo, 2007) y el análisis de isótopos estables de carbono y nitrógeno (Auriolés, *et al.*, 2006; Newsome *et al.*, 2006; Porrás-Peters *et al.*, 2008).

El análisis de excretas se basa en la identificación de estructuras duras (otolitos de peces y picos de cefalópodos) recuperadas a través del tamizado de las muestras. Este tipo de estudios tradicionales han generado una gran cantidad de conocimiento en cuanto a la identidad de presas de varias especies de pinnípedos, entre ellas el elefante marino del norte. Sin embargo, estos resultados pueden subestimar la importancia relativa de algunas presas debido a la pérdida o degradación de las estructuras más pequeñas y frágiles, resultado de la digestión (Bowen, 2000; Orr y Harvey, 2001). Otra limitante de esta técnica es que las estructuras presentes en una excreta reflejarán únicamente lo que el individuo consumió durante los últimos periodos de alimentación, por lo que para entender las variaciones de alimentación a mediano y largo plazo, es necesario extender el muestreo en el tiempo, lo que significa un esfuerzo detallado y laborioso (Elorriaga, 2009). En el caso particular del elefante

marino, la situación se complica ya que se alimenta por periodos largos en el mar sin tocar tierra y por tanto no depositan excretas en tierra.

Recientemente han surgido otras herramientas novedosas que estiman la posición trófica y las fuentes de alimentación y que han contribuido notablemente a los estudios de alimentación en vertebrados marinos (Rau *et al.*, 1983 y Hobson y Welch, 1992). Los isótopos estables de N y C ($\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$) a diferencia de los isótopos ligeros, presentan fuertes puentes de unión que difícilmente se destruyen durante los procesos metabólicos y por tanto permiten su enriquecimiento a lo largo de la red trófica (DeNiro y Epstein, 1978; Owens, 1987).

La abundancia natural de señales isotópicas en el ambiente que nos rodea, puede ser utilizada para encontrar patrones y mecanismos de la alimentación de un organismo en particular. Los isótopos estables sirven también como trazadores en las cadenas alimentarias y de los ciclos de nutrientes, tanto en ambientes marinos como en terrestres. Como consecuencia, el análisis de isótopos estables se ha convertido en una herramienta estándar para fisiólogos, ecólogos y todas aquellas científicas involucradas en el estudio de ciclos de elementos y materia en el ambiente (Michener y Lajtha, 2007). Si bien esta técnica no permite la identificación directa de las presas consumidas, en el caso del $\delta^{13}\text{C}$ mide variaciones relacionadas a distintos ambientes o fuentes de energía (France, 1995; Hobson *et al.*, 1997). Estas variaciones en la composición del isótopo estable de carbono en organismos marinos se debe en parte a las diferentes composiciones isotópicas de plantas marinas presentes en ecosistemas costeros y oceánicos; los factores que contribuyen a estas diferencias de carbono orgánico en la base de la cadena alimentaria incluyen: (a) diferencias en la composición isotópica y la concentración de CO_2 disuelto, (b) la composición de especies y tasa de crecimiento del fitoplancton y (c) las entradas de carbono por medio de macrófitas bentónicas enriquecidas en ^{13}C (Burton y Koch, 1999). El resultado que arroja el $\delta^{13}\text{C}$ a partir de una muestra nos puede indicar su origen en términos del ambiente (acuático/terrestre, costero/oceánico y pelágico/bentónico) (Hobson *et al.*,

1995). Por otro lado el $\delta^{15}\text{N}$ experimenta un fraccionamiento entre un depredador y su presa, dando como resultado un enriquecimiento en sus valores conforme el nivel trófico incrementa y por consiguiente puede indicar la posición trófica de un organismo.

Conociendo el comportamiento de los isótopos estables y su uso para la determinación de ambientes alimentarios, así como para la descripción de procesos fisiológicos en tejidos inertes como el pelo y la vibrisa, en este trabajo se ha planteado el objetivo de conocer los destinos migratorios de las hembras adultas de elefante marino utilizando pelo de crías, mientras que con las vibrisas de las crías se pretende explorar las distintas fases de desarrollo (gestación y lactancia) durante los primeros meses de vida.

ANTECEDENTES

El análisis de isótopos estables de N y C se ha utilizado recientemente dentro del estudio de ecología trófica, como técnica complementaria a las convencionales para determinar aspectos relacionados con posición trófica y fuentes de alimentación (Rau *et al.*, 1983; Hobson y Welch, 1992 y Elorriaga, 2009). Una de las ventajas de esta técnica radica en que la información que provee, está asociada al alimento asimilado y no sólo al ingerido; además de que puede variar dependiendo de la tasa metabólica o de renovación del tejido utilizado, por lo que pueden ofrecer distinta información relativa a días (suero sanguíneo), semanas (glóbulos rojos), meses (pelo, piel o músculo) o años (hueso o colágeno dental) (Tieszen *et al.*, 1983; Hobson y Clark, 1992 y Hobson *et al.*, 1996). Con esta técnica también es posible hacer inferencias y comparaciones entre patrones de alimentación (nivel trófico, áreas de alimentación, etc.) de individuos, poblaciones y especies, siempre y cuando se utilice el mismo tejido (Koch *et al.*, 1994; Aurióles *et al.*, 2006).

El análisis isotópico se ha aplicado exitosamente a diferentes especies de pinnípedos y específicamente al elefante marino (*Mirounga* spp.), con la intención de determinar aspectos asociados a variaciones inter e intrasexuales de áreas de alimentación, presas potenciales, y lactancia entre otros (Aurioles *et al.*, 2006; Lewis *et al.*, 2006; Cherel *et al.*, 2008; Habran *et al.*, 2010).

Por otro lado, autores como Hobson *et al.*, (1997), han llevado a cabo estudios en varias especies que sugieren que la latitud en la cual se alimentan los organismos, tiene un efecto importante en las composiciones isotópicas de carbono. En contraste con latitudes bajas, en ambientes marinos de altas latitudes la solubilidad del CO² aumenta debido a que la temperatura superficial del mar es menor, lo que favorece la fijación de este gas empobrecido en ¹³C, influyendo en valores de δ¹³C más bajos del fitoplancton y de ahí en cascada a los siguientes niveles tróficos. Esto concuerda con datos reportados por Burton y Koch (1999) quienes mencionan que en el Pacífico norte, los valores de δ¹³C del fitoplancton en latitudes altas son menores a los presentes en latitudes más bajas (-22‰ a 71 °N y -20.3‰ a 28 °N). Por lo tanto, se ha determinado que la razón entre los isótopos de carbono ¹²C/¹³C (δ¹³C) puede ser un buen indicador de la latitud a la que se alimentan los organismos marinos (Burton y Koch, 1999; Aurioles *et al.*, 2006) y de las diferencias entre ambientes a la misma latitud, por ejemplo en el gradiente costero-pelágico y pelágico-bentónico (Newsome *et al.*, 2007). En el caso del δ¹⁵N (¹⁴N/¹⁵N), es posible inferir el nivel trófico del consumidor y también, cuando la información es relativamente extensa en el tiempo, se puede obtener una idea de la amplitud trófica (DeNiro y Epstein, 1981).

Burton y Koch (1999) investigaron el impacto de los sitios de alimentación (costero-oceánico) y la latitud de alimentación (alta-media) en las señales isotópicas de carbono (δ¹³C) y nitrógeno (δ¹⁵N) del colágeno óseo de pinnípedos del Pacífico Noreste. Entre otros resultados, encontraron para el elefante marino del norte (de alimentación oceánica a latitudes medias) valores de δ¹⁵N de 0.5‰ y δ¹³C de 2.0‰ menores con respecto a la foca de puerto (de alimentación costera). Estos autores

concluyeron que las variaciones de $\delta^{13}\text{C}$ en estos pinnípedos, reflejan las fuentes de carbono inorgánico presente en la base de la cadena alimentaria. Este patrón longitudinal se debe a que en mar abierto, el aporte de nutrientes es limitado, presentándose una tasa de producción microalgal muy pequeña para producir un decremento significativo en las concentraciones de CO_2 disuelto en el agua, dando como resultado valores bajos de $\delta^{13}\text{C}$ fijado en la base de la cadena alimentaria en zonas oceánicas, con respecto a valores altos de $\delta^{13}\text{C}$ asociados al carbono fijado por el fitoplancton en zonas costeras. Burton y Koch (1999) también dieron a conocer mediante su estudio un patrón latitudinal dentro del elefante marino del norte, en donde las hembras fueron asociadas a una alimentación en latitudes medias, mientras que los machos a latitudes más altas, tal y como se ha observado con información satelital (Le Boeuf *et al.*, 2000).

Con respecto a la alimentación de las hembras de elefante marino y con base en diferencias isotópicas más enriquecidas entre las hembras de Año Nuevo (EUA) y las de Islas San Benito (México), Auriolles *et al.*, (2006), proponen que la zona de alimentación de las hembras de San Benito es 8°N al sur de la zona de alimentación de las hembras de Año Nuevo.

Se debe tomar en cuenta que los estudios isotópicos en diferentes tejidos reflejan la composición isotópica de la dieta sobre el periodo durante el cual el tejido fue sintetizado (Acosta, 2007). Por ejemplo, el suero de la sangre y el hígado son integradores de término corto (días), mientras que los huesos acumulan información isotópica sobre una escala mucho más larga (años) (Hobson y Clark, 1992; Bearhop *et al.*, 2004). En este sentido, la aplicación del análisis de isótopos estables en pelo nos brinda una ventana de 2 meses aproximadamente y al realizarlo en crías, permite realizar un monitoreo indirecto de la dieta de sus madres, ya que las crías dependen directa y exclusivamente de éstas durante la lactancia. En el lobo marino de California, se ha demostrado que existe un fraccionamiento isotópico entre cría y madre de alrededor de 2.1‰ para nitrógeno y de 0.9 ‰ con relación al carbono, por lo que es

posible esperar un enriquecimiento cercano al de un nivel trófico entre la cría y su madre (Porrás-Peters *et al.*, 2008). Esta relación isotópica deriva del consumo de leche por parte de la cría, la cual absorbe la señal de esta secreción materna y la adiciona a su propia señal enriqueciendo sus tejidos.

Por otro lado, la vibrisa es un tejido que al ser sintetizado lentamente, presenta composiciones isotópicas que reflejan los cambios en la dieta y la utilización de reservas del organismo producidos durante el periodo de su formación sin alteración ya que la queratina es metabólicamente inerte después de su síntesis (Rubenstein y Hobson 2004). Las vibrisas comienzan a formarse desde que los embriones tiene 2 meses de desarrollo, por lo que ofrecen información isotópica del periodo de gestación hasta el momento de su colecta en animales jóvenes (Ginter *et al.*, 2010), considerando que su tasa de recambio (duración de la vibrisa en el organismo antes de la muda) es de aproximadamente 12 meses para el elefante marino del norte (Acosta, 2007).

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS

A partir de antecedentes relacionados a este tipo de estudios se plantea una investigación basada en el análisis de isótopos estables de N y C en pelo y vibrisas de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, del Archipiélago San Benito. El interés principal de este estudio es medir las potenciales diferencias isotópicas de las crías como producto de la alimentación diferencial de sus madres durante el periodo de alimentación previo a su arribo a la colonia reproductiva. Se espera que el análisis de isótopos estables de carbono y nitrógeno defina diferencias en las áreas de alimentación, como las que se han identificado mediante la técnica de rastreo satelital para la población residente de Isla Año Nuevo (Simmons *et al.*, 2007).

Dada la alta variabilidad isotópica entre las hembras de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, donde; 1) se ha observado que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ como de $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías muestran 2 modas aparentes (Aurioles *et al.*, 2006) y 2)

se ha reportado la existencia de tres modos de alimentación en esta especie (Simmons *et al.*, 2007) que podrían derivar en tres grupos de señales isotópicas; se propone la hipótesis de que las hembras de elefante marino de San Benito también presentarán tres modos de alimentación (distintos destinos migratorios y consumo de diferentes presas con valores isotópicos de distintos ambientes) y generarán diferentes valores isotópicos que se reflejarán en sus crías. Estas firmas isotópicas serán identificables a través del análisis de pelo de crías considerando el ajuste de los valores debidos al fraccionamiento isotópico conocido entre madres y crías (Aurioles *et al.*, 2006). Adicionalmente interesa determinar las proporciones de la población de hembras adultas que se dirigen a cada destino migratorio, lo cual es posible si se realiza un muestreo significativo de crías en cada una de las tres islas del Archipiélago San Benito.

De modo paralelo si consideramos que durante los primeros meses de vida de las crías de elefante marino, los procesos fisiológicos también muestran efectos sobre las composiciones isotópicas de los tejidos debido a la variación en el uso de reservas de nutrientes, se propone una segunda hipótesis, asociada a la identificación positiva de diferencias en las señales isotópicas de C y N a lo largo de vibrisas de crías destetadas conforme transcurre el tiempo a través de la última fase de la gestación y lactancia. Si las vibrisas de las crías presentan un registro de señales isotópicas a lo largo del tiempo desde que éstas se encontraban en el útero de la madre hasta el momento de la colecta, entonces al analizarla por partes, podremos describir como las diferentes etapas de gestación y lactancia afectan la señal isotópica del tejido y definir las posibles implicaciones que esto tendría en la interpretación de los valores isotópicos de éste tipo de tejidos.

OBJETIVO GENERAL

- Analizar las diferencias de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en pelo y vibrisas de crías de *Mirounga angustirostris* de las Islas San Benito, como aproximación para detectar distintas áreas de alimentación de sus madres y el efecto de los procesos fisiológicos a los que están sometidas las crías durante la gestación y lactancia.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Identificar diferencias en las señales de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en pelo de crías, entre las tres islas del archipiélago y entre cada uno de los sitios de muestreo dentro de cada isla.
- Determinar la posible relación entre las señales isotópicas de pelo de crías y las zonas de distribución de éstas dentro de cada una de las islas.
- Identificar los diferentes grupos migratorios (costero, pelágico-costero y pelágico) en hembras, por medio de las señales isotópicas de sus crías.
- Describir el efecto de la gestación y lactancia en las señales isotópicas registradas a lo largo de las vibrisas.

ZONA DE ESTUDIO

El Archipiélago San Benito es un grupo de tres pequeñas islas volcánicas con playas de canto rodado, pisos de basalto y rocas pertenecientes al Jurásico (Junak y Philbrick, 1999). Estas presentan un área combinada de 6.4 km² y se encuentran a una corta distancia una de otra. Se localizan 30 km al noroeste de la Isla Cedros en el estado de Baja California Norte, México (28° 18' N y 115° 32' O). Las islas llevan los nombres de Isla San Benito Este, Isla San Benito Central e Isla San Benito Oeste (Boswall, 1978; Fig. 2).

La isla de mayor tamaño es la Isla Oeste con 3.46 km² (Donlan *et al.*, 1999), mientras que la Isla Central es la más pequeña con un área de 0.53 km²; ésta se encuentra separada de la Isla Oeste por un canal de 2.74-8.23 m de profundidad y es la que presenta la menor complejidad topográfica. Por último, la Isla Este (1.04 km²) se encuentra separada de la Central por el Canal de Peck de 21.94 - 36.57 m de profundidad (Junak y Philbrick, 1999). El Archipiélago San Benito constituye un Área Natural Protegida del país y aloja especies de aves endémicas que anidan ahí durante todo el año. Por otro lado, es el único sitio donde cohabitan las 4 especies de pinnípedos existentes en México: el elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, la foca de puerto, *Phoca vitulina*, el lobo marino de California, *Zalophus californianus*, y el lobo de pelo fino de Guadalupe, *Arctocephalus townsendi*.

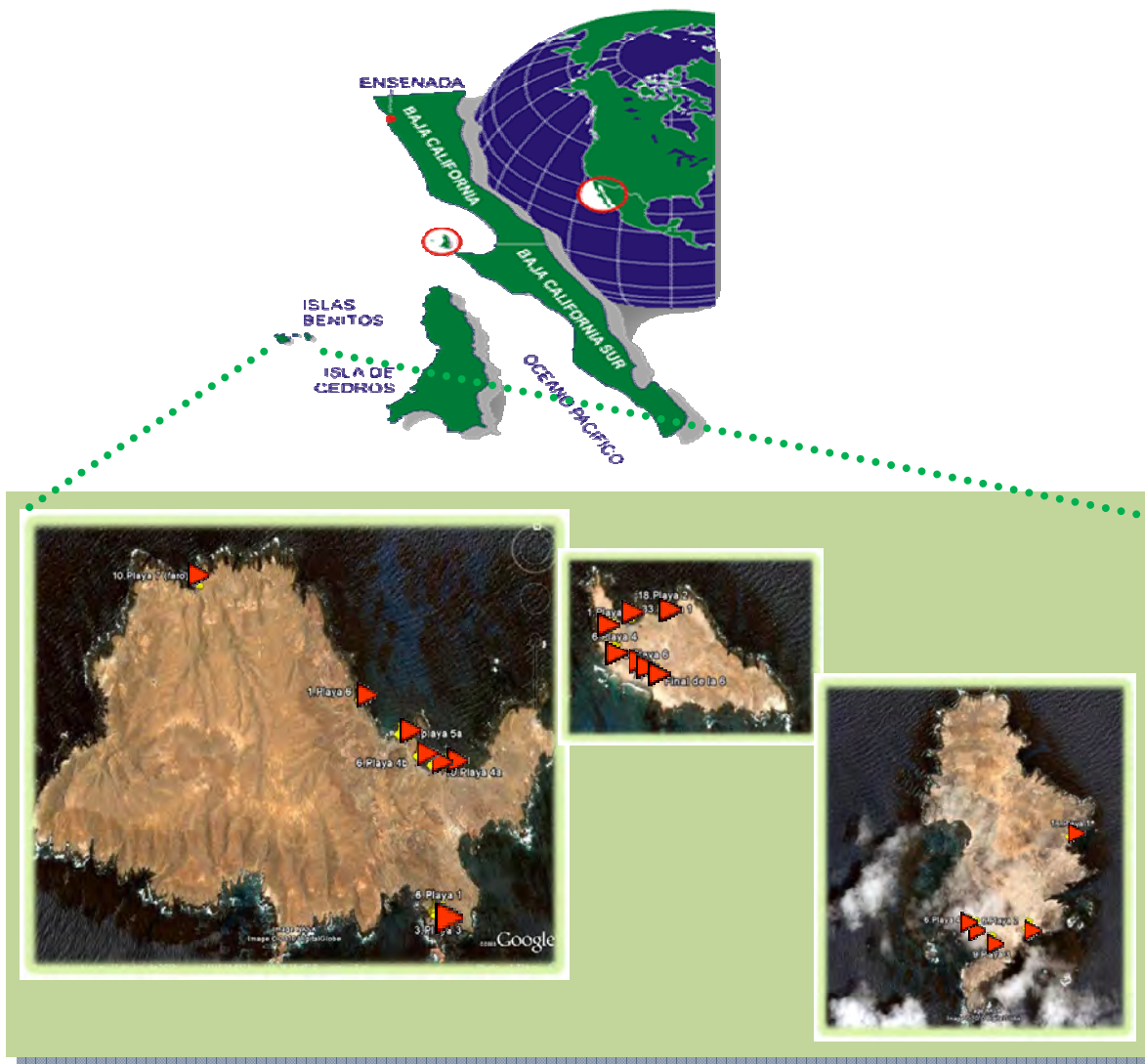


Figura 2. Ubicación geográfica de las Islas San Benito, B.C.N., México. Dentro del archipiélago, la isla de la izquierda es la Isla Oeste, la de en medio es la Isla Centro y la de la derecha la Isla Este. Se muestra con triángulos rojos los sitios donde se realizó la recolecta de las muestras de pelo y vibrisas de crías de elefante marino del norte.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolecta de muestras.

Pelo

La recolecta se realizó en las tres islas del Archipiélago San Benito del 4 al 6 de febrero del 2010 obteniendo 49 muestras de pelo de crías de elefante marino en la Isla Oeste, 71 en la Isla Centro y 44 en la Isla Este; recolectándose en total 164 muestras para todo el Archipiélago San Benito.

Se tomaron muestras de pelo de crías de elefante marino del norte de ambos sexos (de aproximadamente un mes de edad), que se encontraban en proceso de muda. Se utilizaron individuos de esta categoría debido a la accesibilidad de manejo y facilidad de captura que se tiene a comparación de las hembras adultas. Esto permitió la obtención de un mayor número de muestras para un análisis estadístico con mayor representatividad de la población de San Benito.

Las muestras de pelo fueron recolectadas por medio de tijeras cortando desde la base del pelo. Las muestras se guardaron en sobres etiquetados con datos de localidad, longitud y sexo del individuo. A cada una de las crías muestreadas se le tomó una fotografía para verificar el grado de avance en su muda de pelo, esperando que el pelo de estas crías represente el promedio de la composición isotópica de los animales durante las semanas anteriores a la recolecta. Es importante recordar que en el caso de las crías de elefante marino, éstas mudan el lanugo negro con el que nacen a las 3 semanas de vida, por lo que este pelo deberá contener información de las primeras semanas de lactancia y de al menos una parte de la nutrición *in utero* (Porras-Peters *et al.*, 2008; Aurióles *et al.*, 2009).

Vibrisas

En la misma temporada, se recolectaron 37 vibrisas de crías de elefante marino mediante el uso de pinzas metálicas. En este caso, se seleccionó a las crías que ya habían mudado por completo el lanugo y se muestreó a los individuos más grandes intentando coleccionar las vibrisas más largas para obtener la mayor cantidad de información isotópica a lo largo del tiempo (Greaves *et al.*, 2004; Hall-Aspland *et al.*, 2005). Las muestras fueron guardadas en sobres etiquetados con datos de localidad, longitud y sexo del individuo.

Procesamiento general de las muestras.

El procesamiento de muestras se realizó en el Laboratorio de Ecología de Pinnípedos “Burney J. Le Boeuf” y el Laboratorio de Química del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN) en La Paz, B. C. S., México.

Todas las muestras de pelo y vibrisas fueron lavadas en dos ocasiones con agua destilada para eliminar sales y residuos de arena. Posteriormente, con el fin de eliminar lípidos del tejido (Zeppelin y Orr, 2010), se limpiaron con una solución de acetona/hexano (1:1) y se mantuvieron sumergidas en la solución dejándose evaporar por 24 horas en una campana de extracción. Este proceso se aplica debido a que los lípidos presentan carbono enriquecido en ^{12}C , por lo que grandes cantidades de lípidos sesgan negativamente la señal isotópica del $\delta^{13}\text{C}$ (Tieszen *et al.*, 1983).

Las muestras de pelo fueron homogenizadas con ayuda de un mortero de Ágata hasta obtener un polvo fino del cual se pesó de 0.8 - 1 mg de cada muestra. Las vibrisas fueron segmentadas en 20 partes ya que de acuerdo con Acosta (2007), el patrón de variación observado a lo largo de las mismas, tanto en carbono como nitrógeno, puede describirse a partir de una secuencia mínima de 20 segmentos. Estos cortes fueron ajustados para obtener el peso mínimo necesario (de 0.8 – 1mg) para su posterior lectura.

Todas las muestras fueron colocadas en micro-cápsulas de estaño de 8 x 5 mm. y se pesaron con ayuda de una micro-balanza analítica con precisión de 0.001 mg. Cada una de estas micro-cápsulas fue sellada e introducida en un contenedor de celdas con tapa, el cual fue enviado a la Universidad de California en Davis EUA para ser procesado en un analizador elemental Carlo-Erba (NC 2500) en interfase con un espectrómetro de masas Finnegan Delta Plus XL y así determinar los valores isotópicos ($\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$) correspondientes.

Análisis de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$

Para medir concentraciones de isótopos estables a partir de un grupo de muestras de tejido, éstas se convierten a forma gaseosa por combustión. Este gas es introducido al espectrómetro de masas donde es ionizado y sus moléculas separadas de acuerdo a su masa. La proporción de masa/carga es medida de acuerdo a la proporción (δ) de isótopos pesados (p. e. ^{15}N) y livianos (p. e. ^{14}N) de la muestra (Santiago *et al.*, 2005). Estas razones isotópicas generadas por las muestras, se comparan con las razones de los gases estándares de trabajo, los cuales son inyectados directamente al espectrómetro de masas. El sulfato de amonio es utilizado como estándar para la calibración de la señal isotópica de nitrógeno y la sacarosa para el carbono. Los estándares de trabajo son calibrados periódicamente contra los estándares internacionales, los cuales son el N_2 atmosférico ($\delta^{15}\text{N} = 0.004\text{‰}$) para el nitrógeno y el carbonato de calcio conocido como Pee Dee Belemnita (PDB) ($\delta^{13}\text{C} = 0.011\text{‰}$) para el carbono. El error analítico dentro de las corridas de mediciones isotópicas fue de $\pm 0.2\text{‰}$ para $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$.

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

$$(^{15}\text{N} \text{ o } ^{13}\text{C}) = [(R_{\text{muestra}} / R_{\text{estándar}}) - 1] \times 1000$$

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} es la proporción de átomos pesados y livianos contenidos en la muestra, mientras que $R_{\text{estándar}}$ se refiere a una proporción estándar de material que es aceptada internacionalmente, la cual es específica y diferente para cada isótopo analizado. Esta estandarización en el método de análisis asegura que todos los datos entre los diferentes estudios y laboratorios sean comparables (Santiago *et al.*, 2005).

Análisis de datos.

Pelo

En primera instancia se realizó un análisis exploratorio de los datos, utilizando medidas de tendencia central (media aritmética) y medidas de variabilidad (error estándar y coeficiente de variación). Posteriormente, se realizó una comparación de longitudes medias de crías en las diferentes playas muestreadas por medio de una ANOVA, usando la prueba de Duncan para definir los sitios que presentaron diferencias significativas en cuanto al tamaño de las crías.

Con los resultados isotópicos se diseñaron gráficas de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ por individuo y por grupos de animales tanto por zona (playas) como por isla del archipiélago. Para determinar si existían diferencias isotópicas ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$) entre los grupos de individuos de cada playa, en los casos donde los datos se ajustaron a los modelos paramétricos, se realizó la prueba de ANOVA, mientras que para datos no paramétricos se realizó la prueba de Kruskal-Wallis. Esto se determinó utilizando la prueba de normalidad Shapiro-Wilks y homogeneidad de varianzas. Posteriormente para la identificación de grupos con señales isotópicas diferentes, se obtuvo la distribución de frecuencias de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ seguida de una correlación de Pearson de los valores isotópicos de los individuos muestreados en cada isla. Para probar la significancia en las diferencias isotópicas entre 2 grupos de individuos de las diferentes zonas e islas, se llevó a cabo una prueba t-Student, siempre y cuando los datos

cumplieran con los requisitos paramétricos, de lo contrario se procedió a realizar la prueba U de Mann-Whitney.

Fraccionamiento isotópico Madre-cría.

Para obtener el valor de fraccionamiento, se recurrió a 8 vibrisas de hembras adultas de elefante marino de Islas San Benito previamente colectadas por el Laboratorio de Ecología de Pinnípedos "Burney J. Le Boeuf" en el año 2005; para cada una de estas vibrisas se obtuvo el valor isotópico promedio de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$. Para el caso de las 5 vibrisas de crías (analizadas en este estudio), también se calculó el promedio isotópico de cada una de ellas. Los valores de fraccionamiento isotópico para $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ fueron definidos como la diferencia entre los valores promedio de las hembras adultas y las crías; siempre y cuando, éstos hayan mostrado diferencias significativas mediante una prueba de t-Student. Finalmente los valores isotópicos de las hembras, fueron calculados restando a los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de las crías, el valor de fraccionamiento calculado para $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ respectivamente.

Vibrisas.

Para este caso, se graficó el perfil de señales isotópicas a lo largo de cada una de las vibrisas muestreadas, posteriormente se identificaron las señales correspondientes a cada fase del desarrollo de la cría y se procedió a realizar comparaciones estadísticas entre los promedios de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de cada una de ellas por medio de la prueba U de Mann-Whitney.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados por medio de los programas Statistica 8.0 y Sigma Plot 11.0. Los resultados fueron considerados significativos a una $P < 0.05$.

RESULTADOS.

Censo y longitud de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*.

A partir de los censos efectuados durante el periodo de muestreo (4 a 6 de febrero de 2010) se obtuvo la abundancia de crías, hembras adultas y machos adultos, para cada una de las Islas del Archipiélago San Benito. La estructura poblacional fue similar en las tres islas observándose un número reducido de machos adultos, mientras que las hembras y las crías fueron las más abundantes; la diferencia radicó en que en la Isla Centro, a comparación de las islas Oeste y Este, hubo una abundancia de hembras adultas superior a la de las crías. El mayor número de elefantes marinos se registró en la Isla Centro ($n = 886$) mientras que la Isla Este fue aquella en la que se censaron menos individuos ($n = 243$) (Fig. 3).

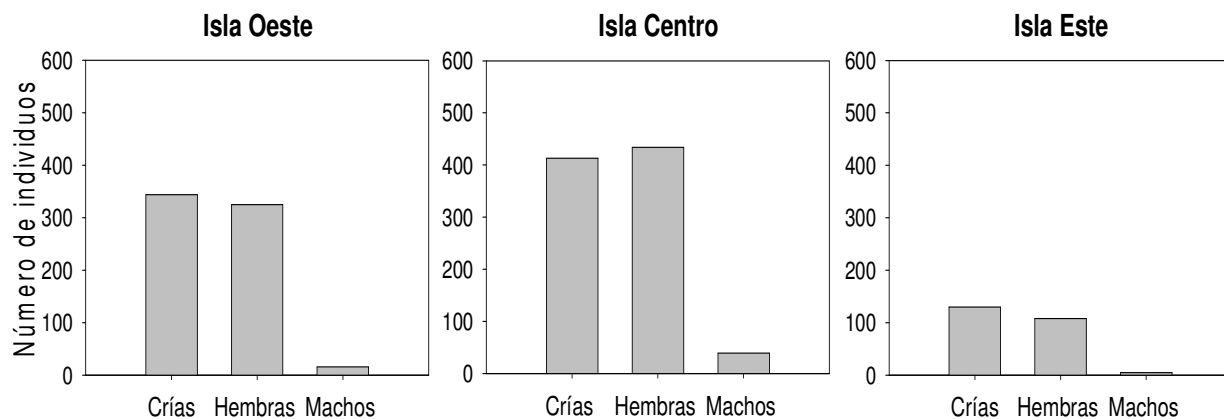


Figura 3. Censo de crías, hembras y machos adultos de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, en las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.

Se comparó la longitud promedio de cada una de las crías en cada una de las playas muestreadas sin encontrar diferencias significativas (Kruskal-Wallis $H = 24.027$; $P = 0.154$, $gl = 18$), lo mismo sucedió al comparar por separado las longitudes medias

de las playas pertenecientes a cada isla del archipiélago (Oeste: $H = 9.549$, $P = 0.216$, $gl = 7$; Centro: $H = 1.352$, $P = 0.852$, $gl = 4$; Este: ANOVA $F = 1.785$, $P = 0.139$, $gl = 5$). Sin embargo, es posible observar que las longitudes de las crías en las playas de la Isla Centro presentaron una menor variación con respecto a las longitudes en las playas de las Islas Este y Oeste, siendo esta última donde se observó la mayor variación de tallas (Fig. 4).

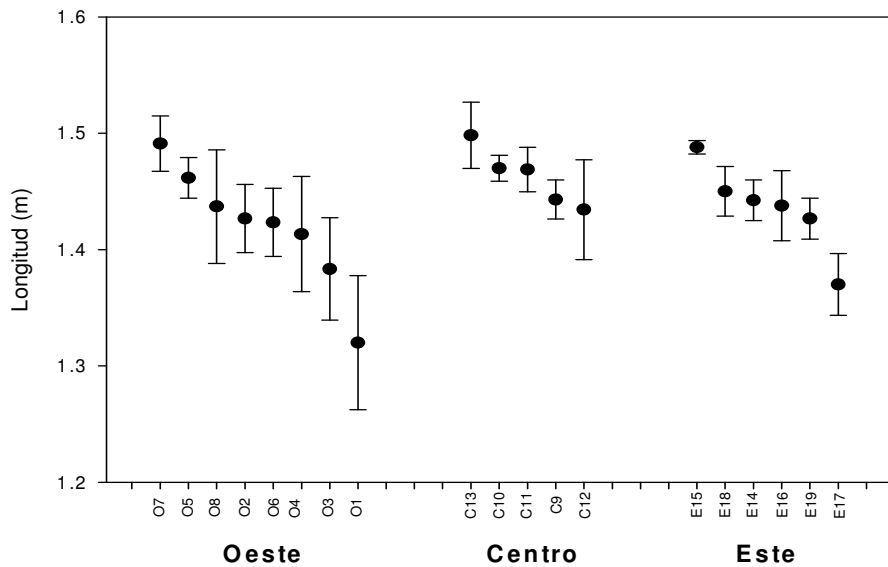


Figura 4. Longitudes promedio (\pm error estándar) de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, para cada una de las playas que se muestrearon en las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.

Cuando se promediaron las longitudes de las crías de las tres islas (Fig. 5), la Isla Centro presentó las crías de mayor tamaño (1.456 ± 0.01 m.), en contraste con la isla Oeste que presentó las crías más pequeñas (1.423 ± 0.02 m.), sin embargo las diferencias no fueron significativas en términos estadísticos (Kruskal-Wallis $H = 2.747$; $P = 0.253$).

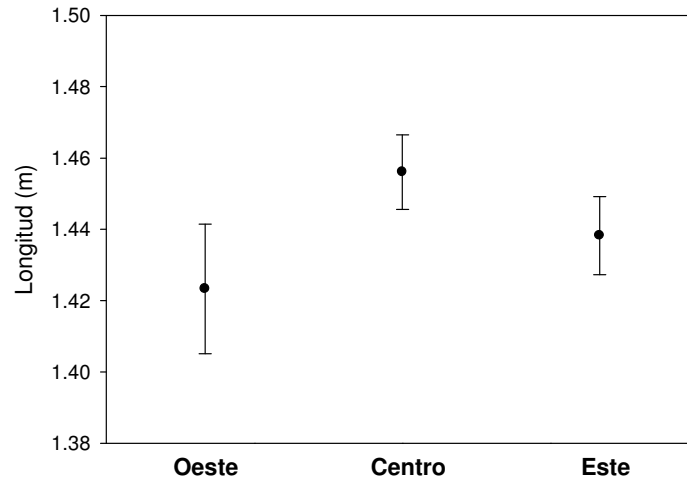


Figura 5. Longitudes promedio (\pm error estándar) de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, para las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.

En general, las longitudes de las crías de elefante marino que se registraron en las 3 islas oscilaron entre los 1.04 y 1.6 m. Al llevar a cabo una distribución de frecuencias de longitudes, se observó que la mayoría (cerca del 80%) de los organismos presentaron longitudes de 1.4 a 1.49 m (Fig. 6).

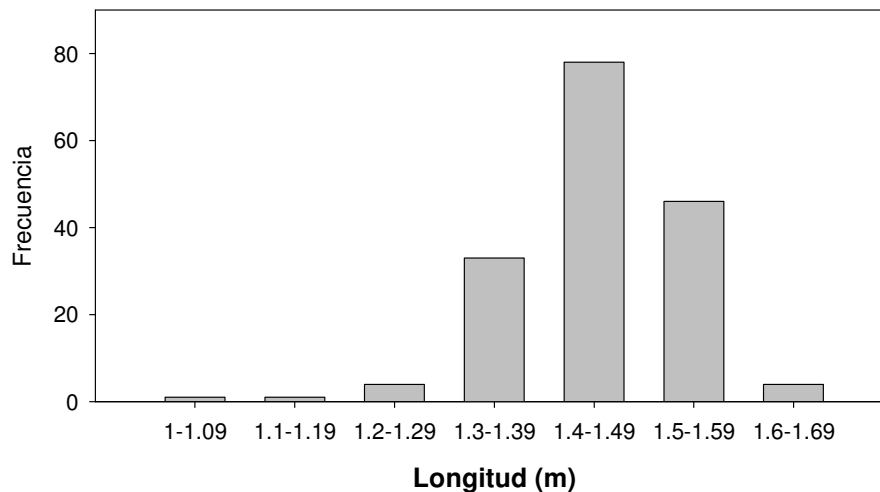


Figura 6. Distribución de frecuencias de la longitud total de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, que se registraron a lo largo de las 3 Islas del Archipiélago San Benito.

$\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*

Con respecto a los valores isotópicos obtenidos en pelo de crías de cada uno de los sitios, se realizó la comparación de señales isotópicas promedio entre todas las playas de muestreo, sin obtener diferencias significativas entre ellas para ninguno de los dos isótopos: ($\delta^{13}\text{C}$: H = 24.345, P = 0.144; $\delta^{15}\text{N}$: F = 1.315, P = 0.187, gl = 18). Sin embargo, cabe mencionar que se observa una dispersión importante de datos, donde destacan playas con valores de $\delta^{13}\text{C}$ que van desde -17.5‰ a ~ -16‰ y valores de $\delta^{15}\text{N}$ de 16‰ hasta cerca de 20‰ (Fig. 7).

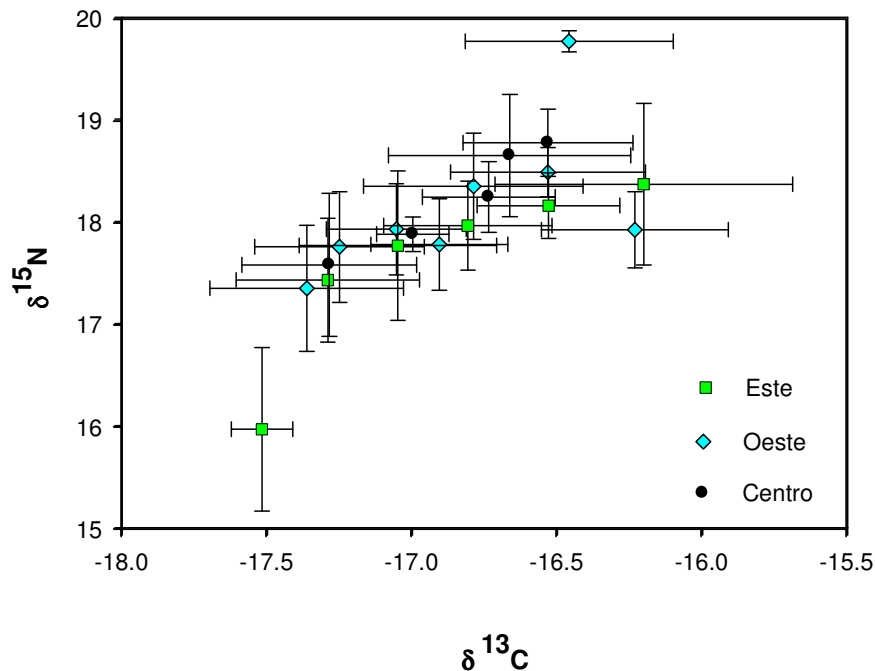


Figura 7. Valores isotópicos promedio (\pm error estándar) de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, en todas las playas de muestreo del Archipiélago San Benito.

Posteriormente se compararon los valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ registrados para cada playa en las diferentes islas (Fig. 8); obteniendo que dentro de cada isla, no existen diferencias significativas en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ (Oeste: H = 11.508, P = 0.118,

gl = 7; Centro H = 4.496, P = 0.343, gl = 4; Este: H = 7.804, P = 0.167, gl = 5) ni en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ (Oeste: F = 1.371, P = 0.243, gl = 7; Centro: H = 5.819, P = 0.213, gl = 4; Este: F = 1.398, P = 0.246, gl = 5). Nuevamente la Isla Centro es la que muestra la menor variabilidad en los datos (ambos isótopos estables), mientras que la isla Oeste es aquella en la que se muestran más dispersos, del mismo modo que sucede en la Isla Este.

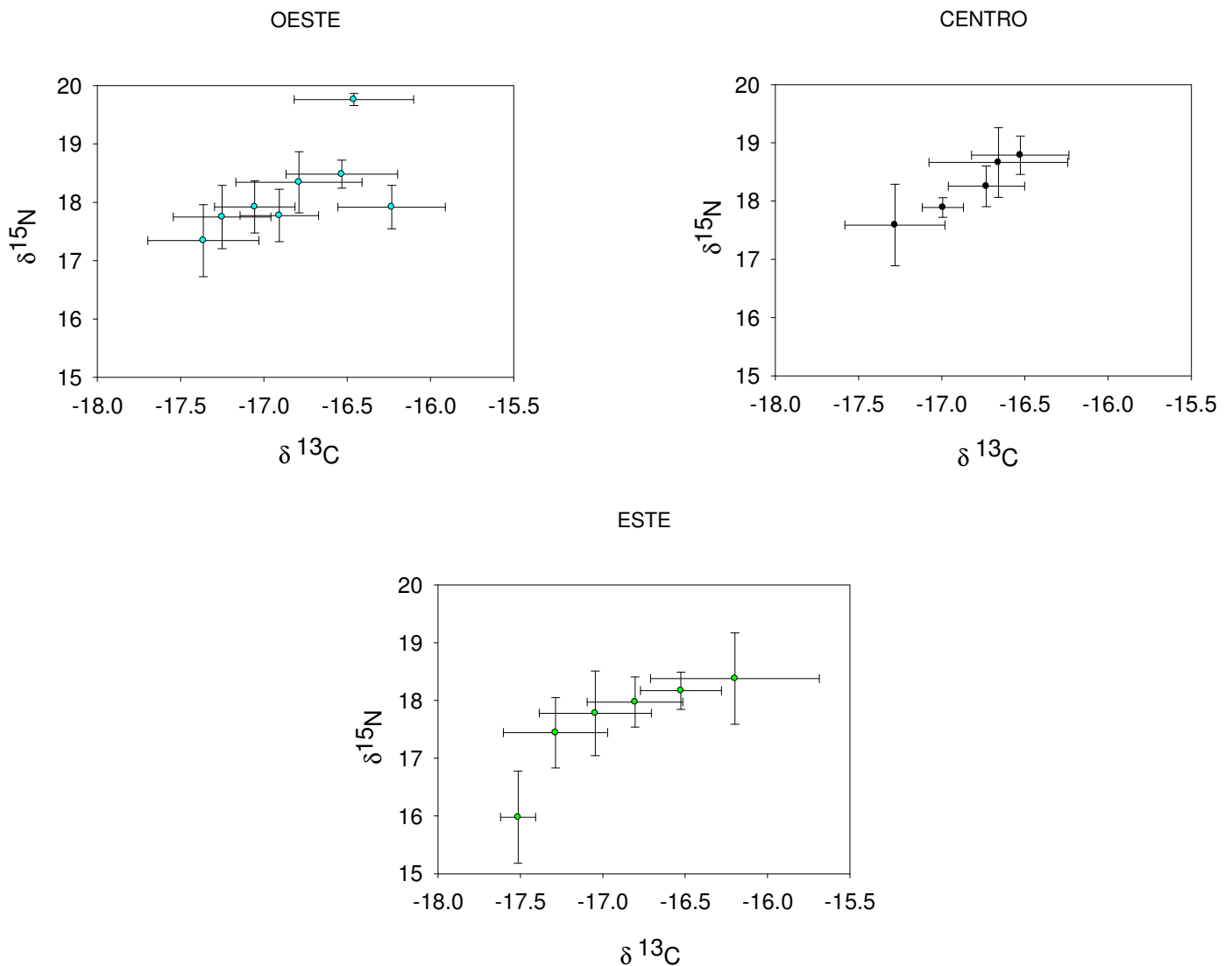


Figura 8. Valores isotópicos promedio (\pm error estándar) de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, en cada una de las playas muestreadas en las Islas Oeste ($n = 49$), Centro ($n = 71$) y Este ($n = 44$) del Archipiélago San Benito.

Por último, se compararon los valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ para cada una de las islas (Fig. 9), observando que la señal más alta se registró en la Isla Este (-16.76 ± 0.141), sin embargo, las diferencias entre los tres sitios no fueron significativas (Kruskal-Wallis $H = 0.143$; $P = 0.931$); lo mismo sucedió para el caso del $\delta^{15}\text{N}$, donde a pesar de que gráficamente se observa un ligero aumento en las señal obtenida en la Isla Centro (18.122 ± 0.149), tampoco se encontró una diferencia estadística entre las tres islas ($H = 0.975$; $P = 0.614$).

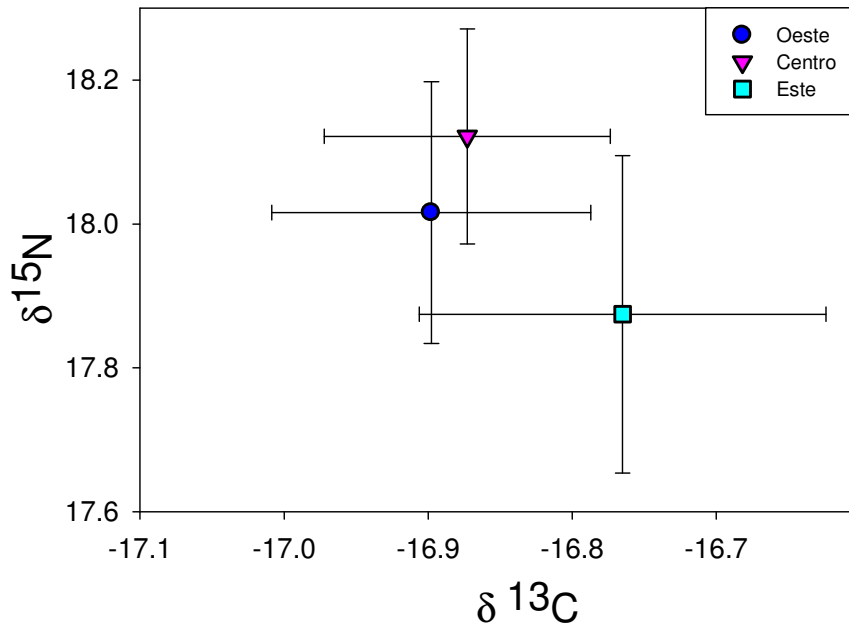


Figura 9. Valores promedio (\pm error estándar) de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, de las Islas Oeste ($n = 49$), Centro ($n = 71$) y Este ($n = 44$) del Archipiélago San Benito.

Al momento de graficar la distribución de frecuencias, tanto del $\delta^{13}\text{C}$ (Fig. 10) como de $\delta^{15}\text{N}$ por cada isla (Fig. 11), se observó que las señales de $\delta^{13}\text{C}$ de entre -17.5% y -17% fueron aquellas que presentaron una mayor frecuencia para las Islas Oeste, Centro y Este. Es posible observar que existe un segundo intervalo de valores de $\delta^{13}\text{C}$ que se observan como una segunda moda en donde la frecuencia más alta para todas las islas, estuvo entre -16% y -15.5% (Fig. 10). Para el caso del $\delta^{15}\text{N}$ se

obtuvieron valores diferentes en cada isla, observándose que, para las islas Oeste y Este, los valores que presentaron una mayor frecuencia fueron aquellos dentro del intervalo entre 17‰ y 17.5‰, mientras que en la Isla Centro la mayor frecuencia se encontró entre los 17.5‰ y 18‰ (Fig. 11).

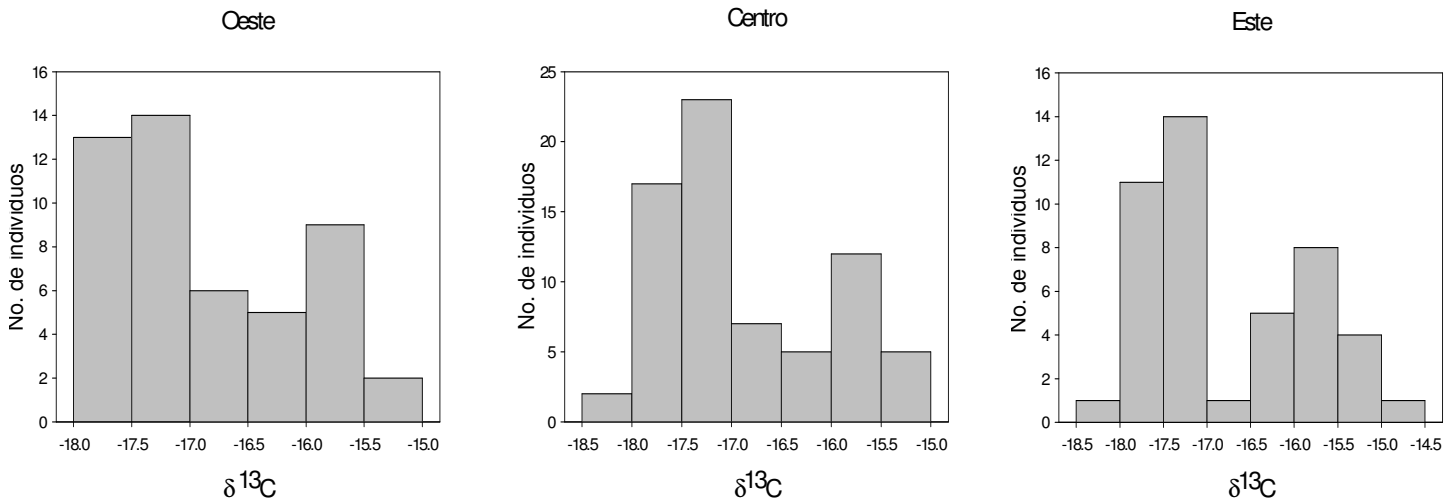


Figura 10. Distribución de frecuencias de $\delta^{13}\text{C}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, de las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.

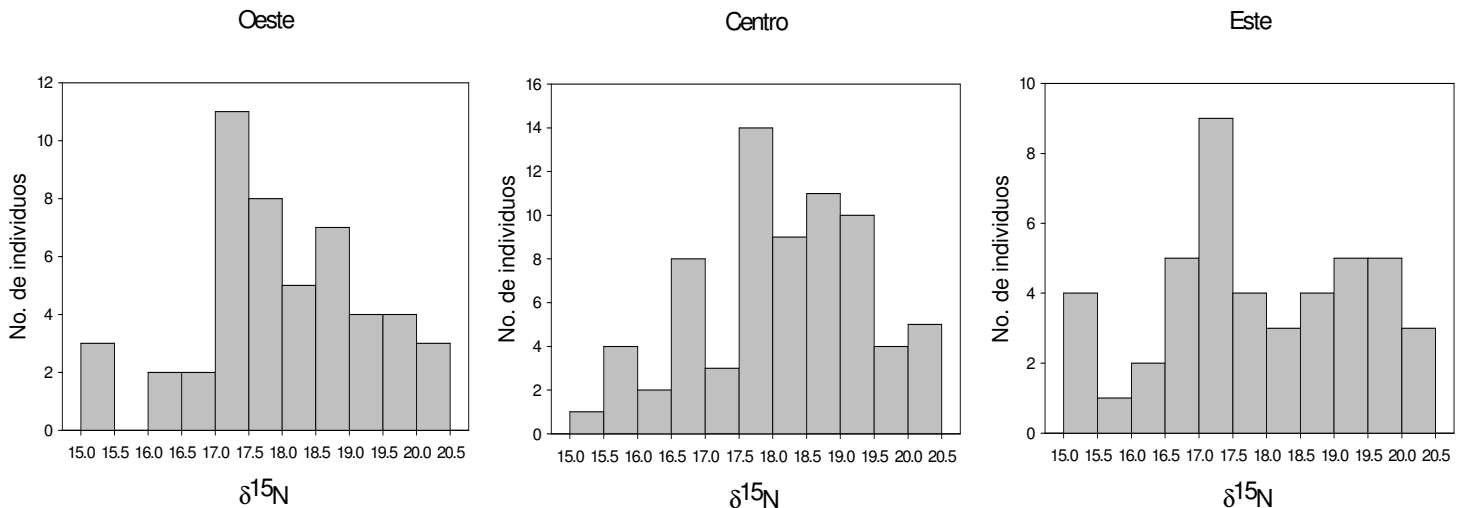


Figura 11. Distribución de frecuencias de $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, de las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.

Posteriormente se correlacionaron los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ registrados en cada isla (Fig. 12). Se puede observar que para la Isla Este se distinguen claramente dos grupos con diferentes valores isotópicos, lo cual confirma el patrón bimodal observado en la distribución de frecuencias de las señales de $\delta^{13}\text{C}$ en esta isla (Fig. 13). A partir de los resultados obtenidos en estas distribuciones de frecuencias para $\delta^{13}\text{C}$, se separaron los grupos con señales isotópicas diferentes para cada una de las islas del archipiélago, considerando el límite de separación entre grupos, como los valores intermedios menos frecuentes. Esta separación se realizó a partir de los antecedentes previos donde se ha mencionado que es el isótopo de carbono aquel que brinda la información de las diferentes fuentes primarias de alimentación o cadenas tróficas de las cuales se alimenta un consumidor (DeNiro y Epstein 1978; Peterson y Fry, 1987).

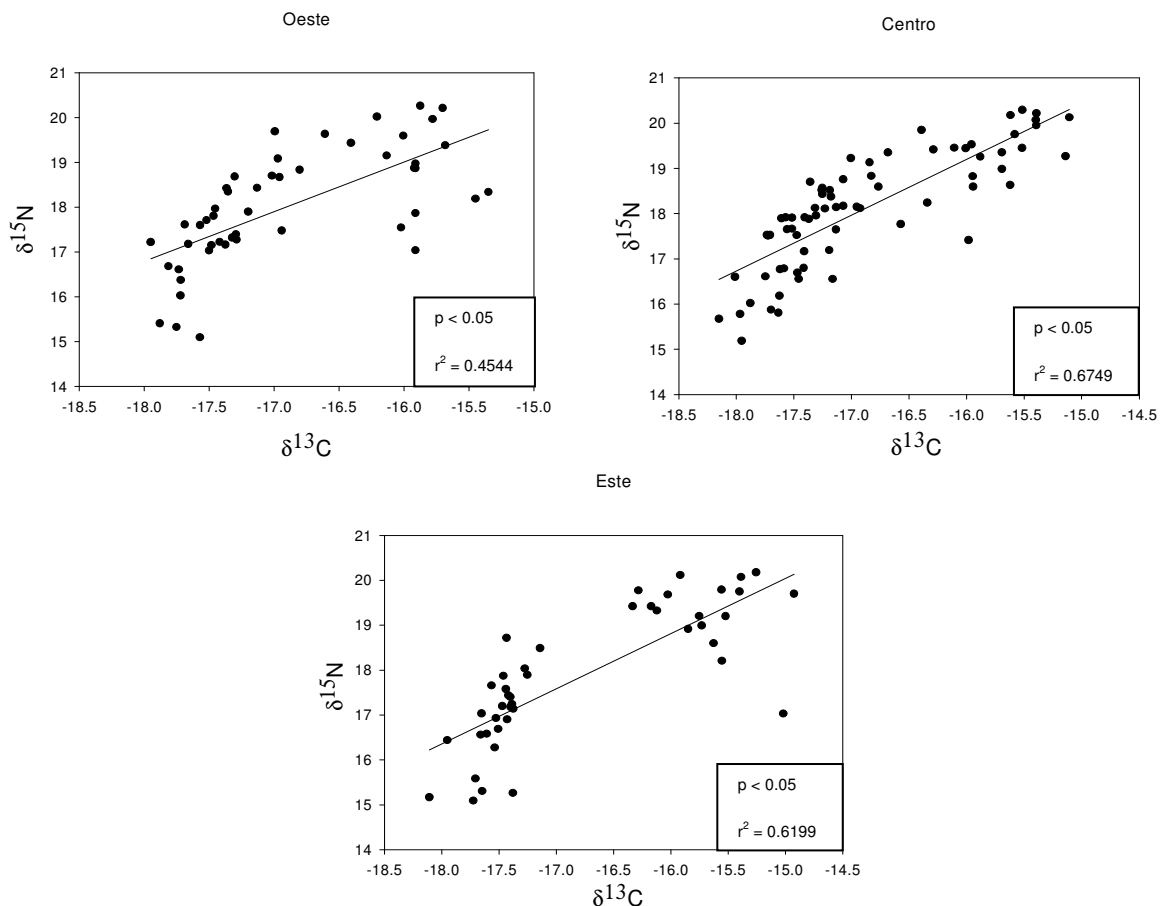


Figura 12. Correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, para las Islas Centro, Oeste y Este del Archipiélago San Benito.

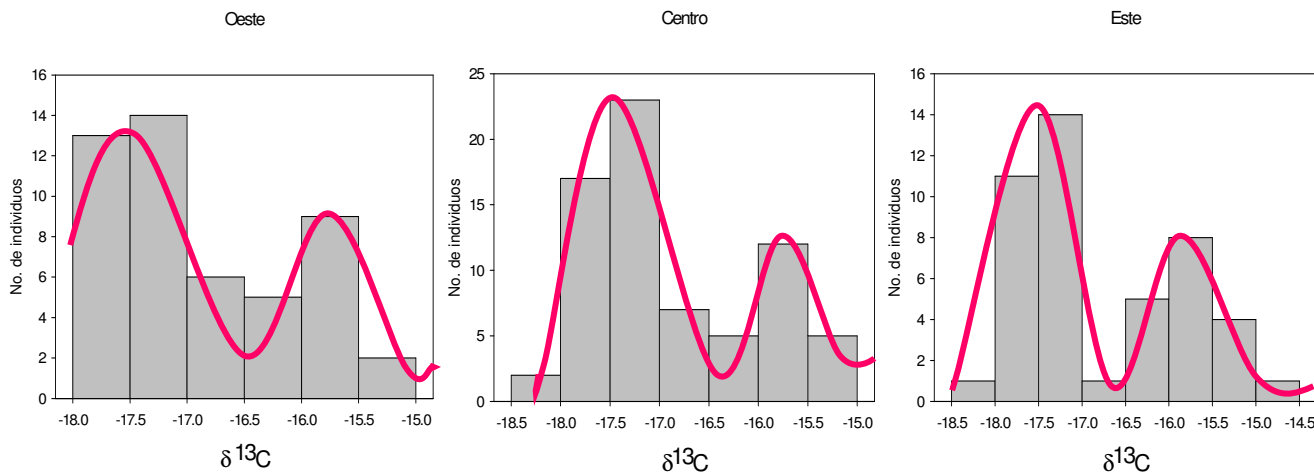


Figura 13. Distribución bimodal de frecuencias de $\delta^{13}\text{C}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, de las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito, se muestra la tendencia bimodal en línea continua.

A partir de lo anterior se procedió a hacer una comparación de los datos isotópicos en las islas Oeste, Centro y Este, definiéndose dos grupos con diferencias estadísticamente significativas para las tres islas: Oeste, ($\delta^{13}\text{C}$: $t = -16.295$; $P = <0.001$ y $\delta^{15}\text{N}$: $t = 4.903$; $P = <0.001$, g.l.= 47), Centro ($\delta^{13}\text{C}$: $t = -17.670$; $P = <0.001$ y $\delta^{15}\text{N}$: $t = 7.54$; $P = <0.001$, g.l.= 69) y Este ($\delta^{13}\text{C}$: $t = -19.507$; $P = <0.001$ y $\delta^{15}\text{N}$: $t = -8.513$, $P = <0.001$, g.l.= 42). En cada una de las islas, los grupos fueron categorizados como costeros u oceánicos dependiendo del valor isotópico obtenido (Fig. 14).

Para garantizar que los grupos quedaron adecuadamente categorizados, se procedió a realizar la correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de los organismos pertenecientes a cada uno de los grupos dentro de las Islas del Archipiélago San Benito. En la isla Oeste (Fig. 15A), se puede observar que el conjunto de datos pertenecientes al grupo oceánico se encuentran mejor ajustados a la recta presentando una relación estadísticamente significativa ($P < 0.05$, $r^2 = 0.6109$), por el contrario, los datos obtenidos para el grupo costero presentan una alta variabilidad, observando una correlación no significativa ($P = 0.5192$, $r^2 = 0.0302$) para ambos isótopos. . Por otro lado, en la Isla Centro (Fig. 15B) se muestra que ambos grupos (oceánico y costero) presentaron una correlación positiva entre los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ ($P < 0.05$, $r^2 = 0.5774$ y $P < 0.05$, $r^2 = 0.2004$ respectivamente), sin embargo es posible distinguir una

distribución de los datos mucho más dispersa para el caso del grupo costero mientras que en el grupo oceánico la variación es menor. Por último, en la Isla Este (Fig. 15C) se vuelve a presentar el patrón observado en la isla Oeste, donde el grupo pelágico presenta una relación positiva y significativa ($P < 0.05$, $r^2 = 0.4538$) con respecto al $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, mientras que el grupo costero no presenta esta significancia ($P = 0.3411$, $r^2 = 0.0567$).

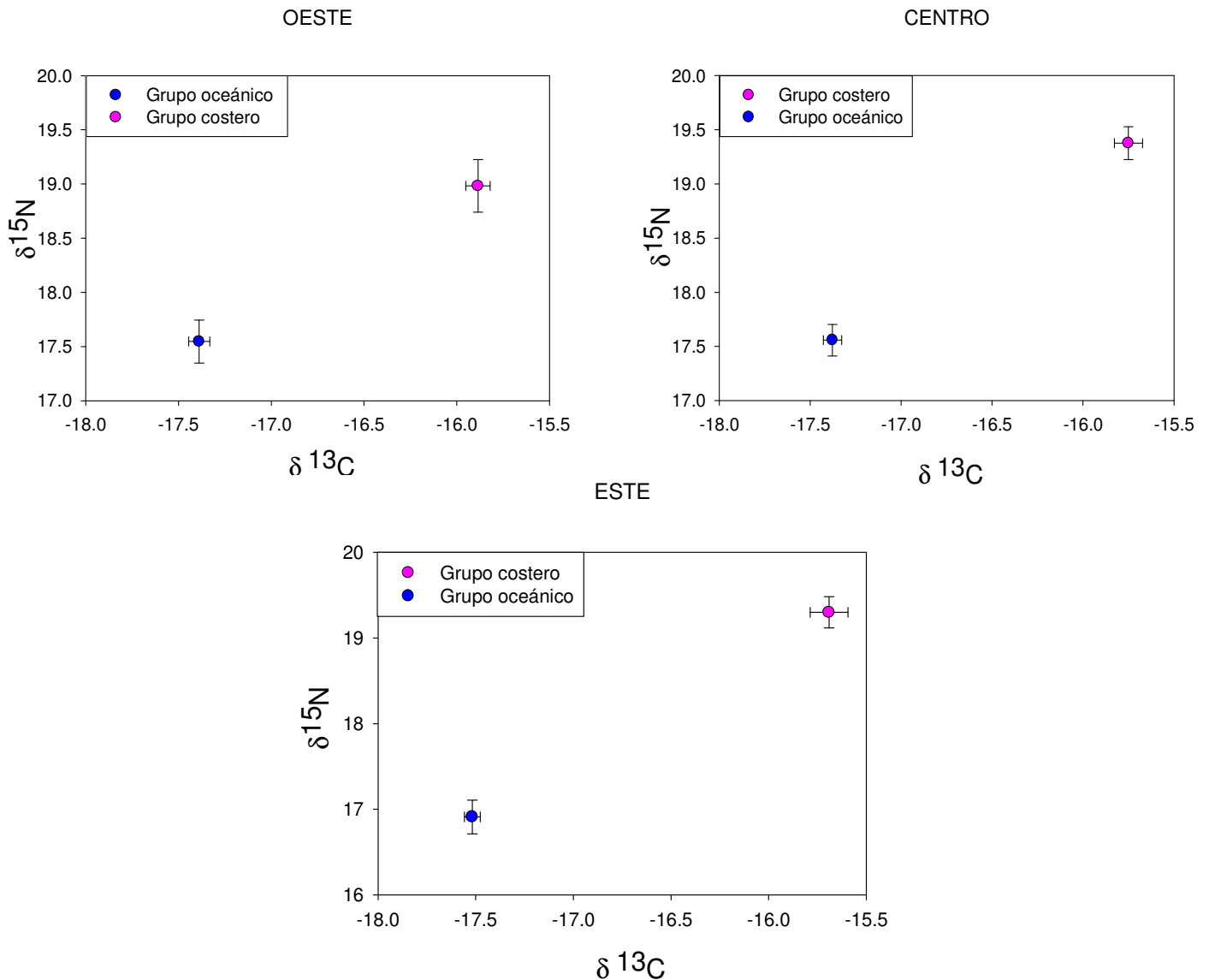


Figura 14. Valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (\pm error estándar) en los dos grupos de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, presentes en las Islas Oeste, Centro y Este del Archipiélago San Benito.

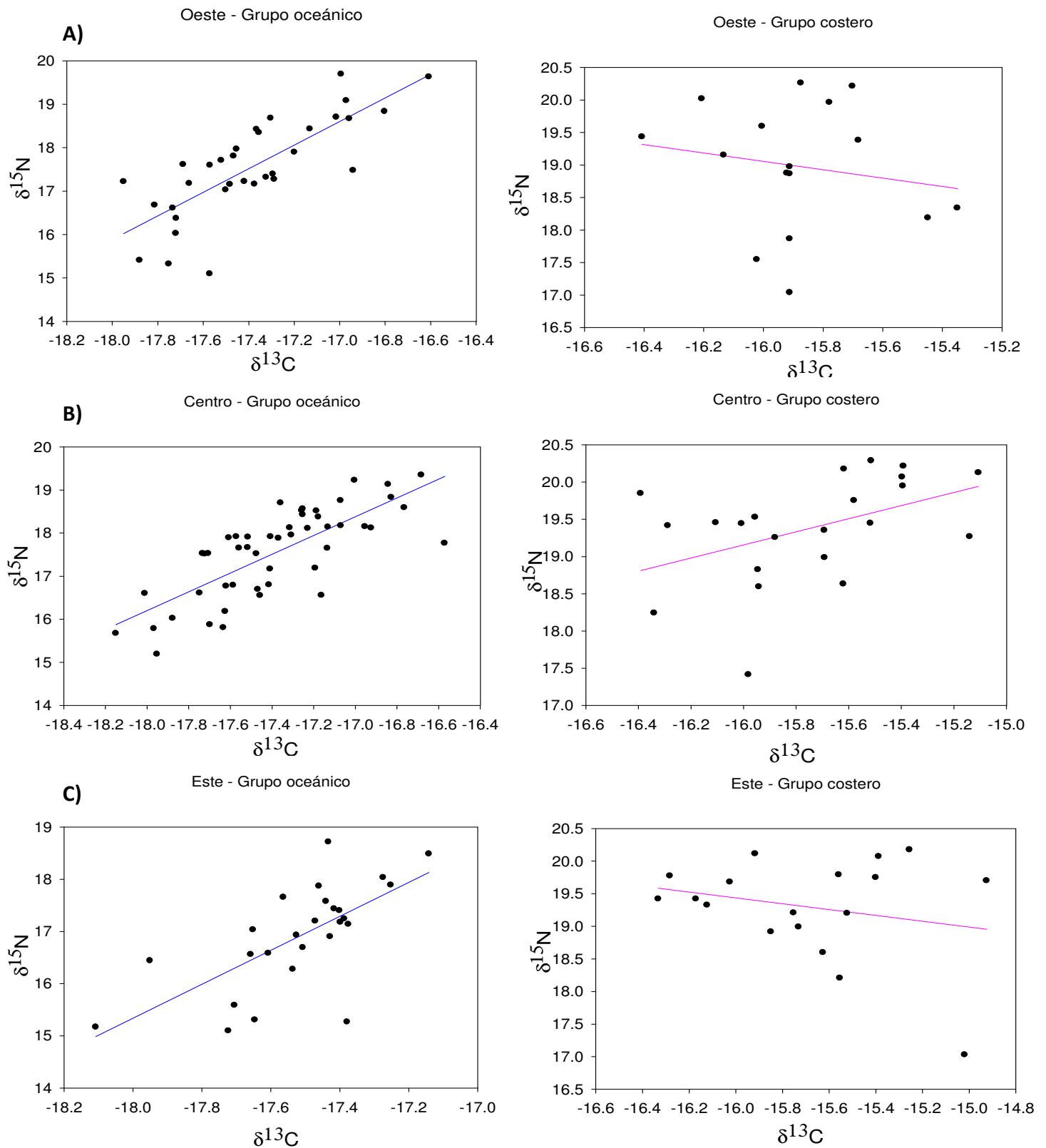


Figura 15. Correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, para cada uno de los grupos migratorios (costero – oceánico) presentes en Isla Oeste (A), Isla Centro (B) e Isla Este (C) del Archipiélago San Benito.

Fraccionamiento isotópico Madre-Cría

El fraccionamiento fue calculado a partir de las vibrisas colectadas de hembras adultas ($n = 8$) y crías ($n = 5$). Las hembras adultas mostraron un valor promedio de $\delta^{13}\text{C}$ de $-15.079 \pm 0.488\text{‰}$, con un intervalo entre -15.58‰ y -14.08‰ ; y un $\delta^{15}\text{N}$ con promedio de $17.474 \pm 0.866\text{‰}$ con un intervalo entre 16.45‰ y 18.88‰). No existió un enriquecimiento significativo de $\delta^{13}\text{C}$ de las crías con respecto a las hembras (Prueba t-Student, $t = 1.715$, $gl = 11$, $P = 0.114$; Tabla 1), por el contrario, se obtuvo un factor de discriminación de $+1.936\text{‰}$ en $\delta^{15}\text{N}$ (Prueba t-Student, $t = 4.091$, $gl = 11$, $P < 0.01$; Tabla 1).

Tabla 1. Señales isotópicas promedio (\pm desviación estándar) de vibrisas de hembras adultas y crías de elefante marino del norte del Archipiélago San Benito. El fraccionamiento de $\delta^{15}\text{N}$ entre hembras y crías fue significativo a partir de $+1.936\text{‰}$.

	Señales isotópicas promedio de vibrisas (‰)	
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Hembras ($n = 8$)	$-15.079 (\pm 0.488)$	$17.474 (\pm 0.866)$
Crías ($n = 5$)	$-15.561 (\pm 0.500)$	$19.410 (\pm 0.763)$
Fraccionamiento	-0.481‰^*	$+1.936\text{‰}^{**}$

* No significativo

** Prueba t-Student, $t > 4$, $P < 0.01$ (significativo)

Con base en los resultados obtenidos anteriormente, se obtuvieron los promedios de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ estimados para cada grupo migratorio mostrando tanto los valores isotópicos obtenidos mediante el pelo de crías, como los valores isotópicos de hembras generados a partir del fraccionamiento calculado (Tabla 2). Los valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ presentaron diferencias significativas entre los diferentes grupos migratorios de cada isla del Archipiélago San Benito. Con base en número de individuos pertenecientes a cada grupo migratorio, se establecieron los porcentajes de la muestra de cada isla para cada uno de los distintos destinos migratorios y se observó que los individuos de las tres islas presentaron el mismo patrón, donde los viajes oceánicos fueron más recurrentes (59-69%) que los viajes costeros (31-41%).

Tabla 2. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (promedio \pm desviación estándar) y representación proporcional de cada uno de los grupos migratorios presentes en (a) Isla Oeste, (b) Isla Centro e (c) Isla Este, a partir del pelo de las crías. Los valores ajustados de $\delta^{15}\text{N}$ representan los valores posibles de las madres; este ajuste se llevó a cabo a partir del valor de fraccionamiento entre vibrisas de hembras y crías. No se generaron valores ajustados de $\delta^{13}\text{C}$ debido a que no se encontró un enriquecimiento significativo entre hembras y crías.

(a)				
Grupo migratorio	Isla Oeste		t-Student	P
	Costero	Oceánico		
<i>n</i>	16	33	-	-
Proporción de la colonia (%)	33	67	-	-
Promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-15.88 (± 0.263)	-17.38 (± 0.327)	-15.996	<0.001
Promedio de $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	18.98 (± 0.970)	17.54 (± 1.137)	-4.337	<0.001
$\delta^{15}\text{N}$ ajustado (‰)	17.046 (± 0.970)	15.61 (± 1.137)	-4.337	<0.001
(b)				
Grupo migratorio	Isla Centro		t-Student	P
	Costero	Oceánico		
<i>n</i>	22	49	-	-
Proporción de la colonia (%)	31	69	-	-
Promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-15.75 (± 0.364)	-17.37 (± 0.357)	-17.670	<0.001
Promedio de $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	19.38 (± 0.715)	17.55 (± 1.022)	-7.541	<0.001
$\delta^{15}\text{N}$ ajustado (‰)	17.44 (± 0.715)	15.62 (± 1.022)	-7.541	<0.001
(c)				
Grupo migratorio	Isla Este		t-Student	P
	Costero	Oceánico		
<i>n</i>	18	26	-	-
Proporción de la colonia (%)	41	59	-	-
Promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-15.69 (± 0.409)	-17.51 (± 0.207)	-19.507	<0.001
Promedio de $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	19.29 (± 0.772)	16.91 (± 1.0)	-8.513	<0.001
$\delta^{15}\text{N}$ ajustado (‰)	17.36 (± 0.772)	14.97 (± 1.0)	-8.513	<0.001

Finalmente se agruparon todos los individuos del Archipiélago San Benito que correspondían al grupo costero y al grupo oceánico. Los valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ presentaron diferencias significativas entre ambos grupos migratorios ($\delta^{13}\text{C}$: Prueba t-Student, $t = 29.98$, $gl = 162$, $P < 0.001$; $\delta^{15}\text{N}$: Prueba t-Student, $t = 11.2$, $gl = 162$, $P < 0.001$; Tabla 3). Se observa que el 66% de las hembras de esta localidad exhiben migraciones oceánicas mientras que el 34% restante, presenta migraciones costeras (Tabla 3; Fig. 16).

Tabla 3. Valores isotópicos promedio (\pm desviación estándar) de hembras de elefante marino del norte a lo largo de las tres Islas del Archipiélago San Benito. Se muestra la proporción correspondiente de individuos que realizan los dos tipos de migraciones.

	Grupo migratorio		Diferencia entre grupo costero y oceánico (‰)
	Costero	Oceánico	
<i>n</i>	56	108	-
Proporción de la colonia (%)	34	66	-
Promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-16.25 (± 0.357)	-17.90 (± 0.320)	1.64 **
Promedio de $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	17.30 (± 0.815)	15.46 (± 1.079)	1.84 **

** Prueba t-Student, $t > 11$, $gl = 162$, $P < 0.001$

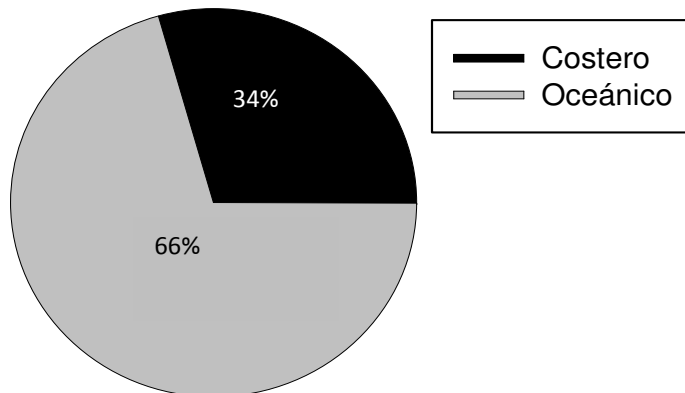


Figura 16. Porcentaje de hembras de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, del Archipiélago San Benito que corresponden a los diferentes grupos migratorios (costero y oceánico).

Patrones isotópicos en vibrisas.

A partir de la colecta de cinco vibrisas de crías de elefante marino del norte recién destetadas, se obtuvieron los valores isotópicos de N y C de cada uno de los 20 fragmentos en que se dividieron ($n = 100$) y se graficó la variación de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de las vibrisas (Fig. 17 y 18). En el caso del isótopo estable de carbono, es posible observar un patrón general en todas las vibrisas, que muestra un incremento de valores durante los primeros fragmentos de la vibrisa, comenzando por el ápice de la misma y un decaimiento de valores conforme los fragmentos se van acercando a la base de la misma (raíz), donde se encuentran los datos más recientes en la escala temporal. Es posible notar, que el valor máximo alcanzado se obtuvo entre los segmentos 4 y 11; mientras que el valor más negativo para todos los casos se obtuvo en el último segmento representado por la base de la vibrisa.

En el caso de los valores de $\delta^{15}\text{N}$ (Fig. 18), el patrón general exhibido por todas las vibrisas fue muy parecido, presentándose los valores más bajos en los primeros fragmentos de la vibrisa (ápice), con un incremento casi constante a lo largo de la misma hasta llegar a los valores máximos observados en los últimos dos fragmentos, correspondientes a la base o raíz de la vibrisa (los más recientes).

Con ayuda de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ a lo largo de las vibrisas, se distinguieron dos etapas, las cuales corresponderían: 1) al segmento formado durante la gestación y 2) al segmento formado durante la lactancia; para esto, se tomó como referencia el valor más alto de $\delta^{13}\text{C}$ el cual se asoció con el comienzo de la lactancia. Posteriormente se procedió a obtener y comparar los valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de cada etapa establecida, obteniéndose diferencias significativas entre los valores de dichas etapas en todos los casos, con excepción de la vibrisa "B", donde a pesar de observarse la tendencia de decremento en el isótopo de carbono después del valor máximo (Fig. 17), las diferencias no fueron estadísticamente significativas (Tabla 4).

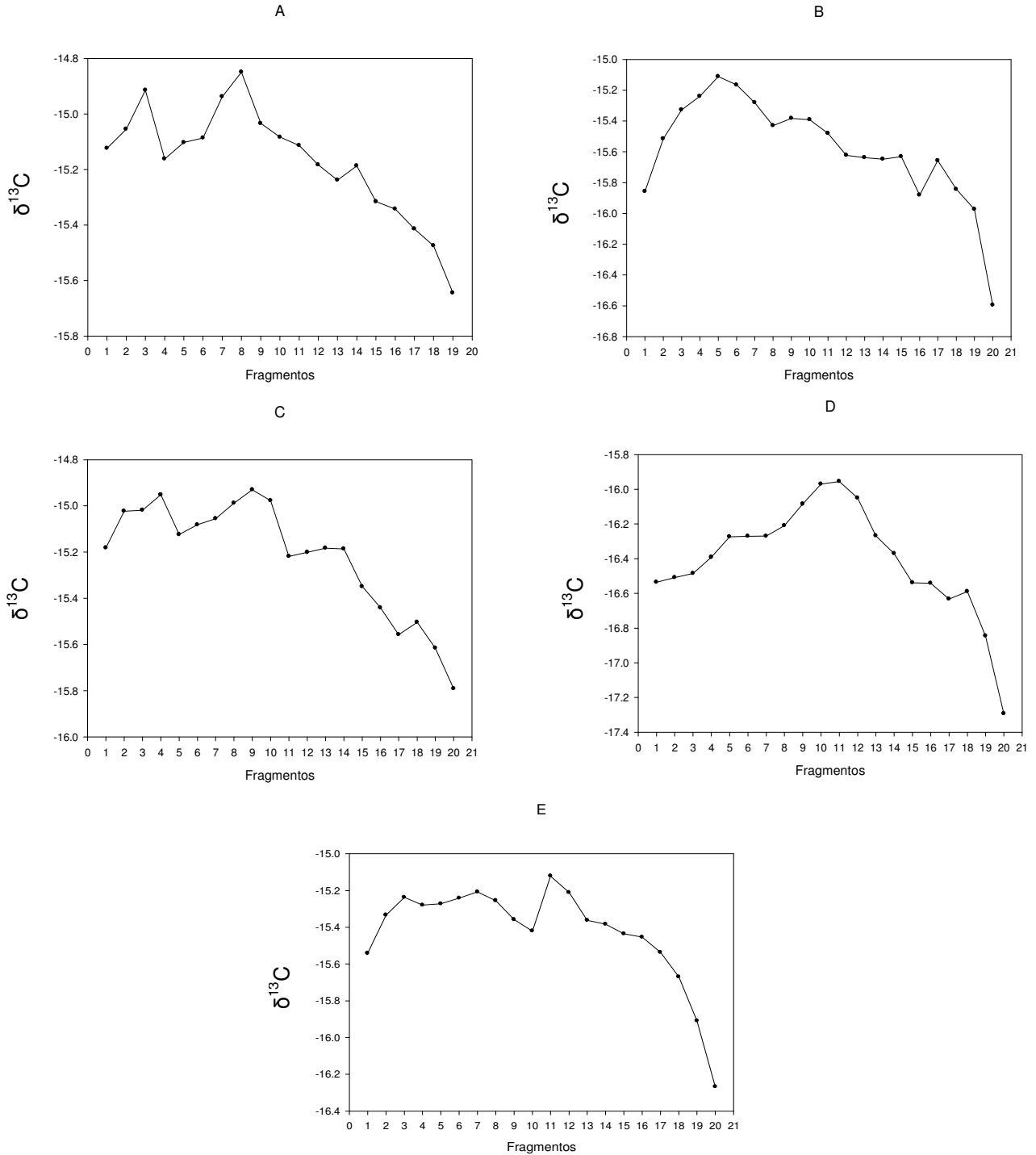


Figura 17. Perfiles de $\delta^{13}C$ registrados a lo largo de cada una de las vibrisas colectadas en crías destetadas de *Mirounga angustirostris* en el Archipiélago San Benito. Todos los valores isotópicos se encuentran graficados en orden cronológico comenzando con los valores desde la punta (periodo más antiguo) hacia la base (periodo más reciente) de la vibrisa.

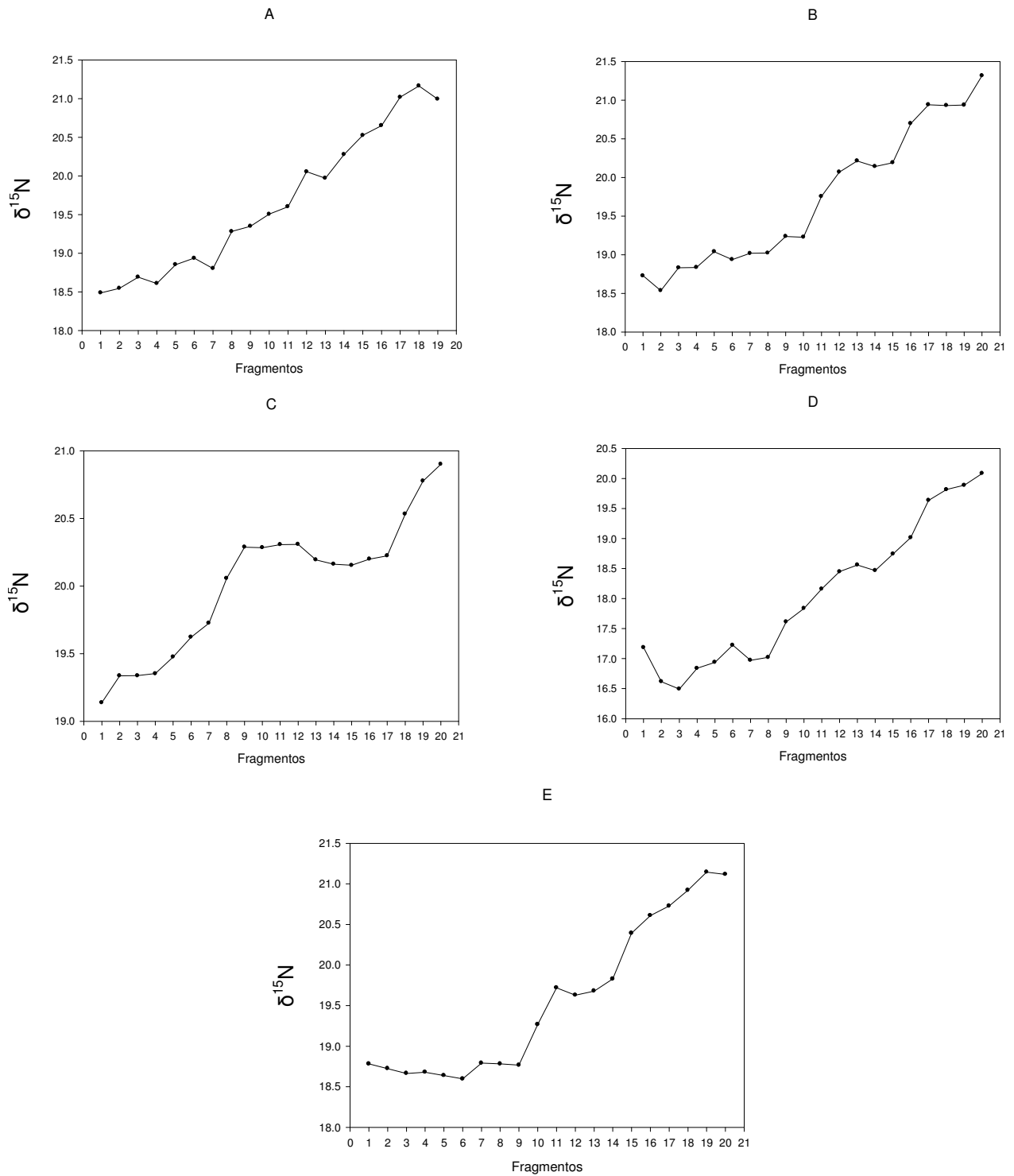


Figura 18. Perfiles de $\delta^{15}N$ registrados a lo largo de cada una de las vibrisas colectadas en crías destetadas de *Mirounga angustirostris* en el Archipiélago San Benito. Todos los valores isotópicos se encuentran graficados en orden cronológico comenzando con los valores desde la punta (periodo más antiguo) hacia la base (periodo más reciente) de la vibrisa.

Tabla 4. Valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (\pm desviación estándar) en cada una de las etapas establecidas (gestación y lactancia) en las 5 vibrisas de crías de elefante marino del norte analizadas. Se muestra el nivel de significancia en cada caso.

		Regiones en Vibrisas		Prueba estadística	P
		Gestación	Lactancia		
<i>Vibrisa (A)</i>	<i>n</i>	8	11	-	-
	Promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-15.03 (± 0.113)	-15.27 (± 0.184)	3.34**	<0.01
	Promedio de $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	18.78 (± 0.256)	20.28 (± 0.641)	36*	<0.001
<i>Vibrisa (B)</i>	<i>n</i>	5	15	-	-
	Promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-15.41 (± 0.290)	-15.64 (± 0.346)	1.339**	= 0.197
	Promedio de $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	18.79 (± 0.184)	20.04 (± 0.811)	18*	<0.01
<i>Vibrisa (C)</i>	<i>n</i>	9	11	-	-
	Promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-15.04 (± 0.080)	-15.37 (± 0.239)	137*	<0.001
	Promedio de $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	19.59 (± 0.375)	20.37 (± 0.257)	51*	<0.001
<i>Vibrisa (D)</i>	<i>n</i>	11	9	-	-
	Promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-16.27 (± 0.204)	-16.57 (± 0.355)	2.384**	<0.05
	Promedio de $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	17.17 (± 0.511)	19.18 (± 0.669)	-7.631**	<0.001
<i>Vibrisa (E)</i>	<i>n</i>	11	9	-	-
	Promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-15.3 (± 0.113)	-15.58 (± 0.326)	61*	<0.05
	Promedio de $\delta^{15}\text{N}$ (‰)	18.86 (± 0.337)	20.45 (± 1.603)	142*	<0.001

*Prueba U de Mann-Whitney

**Prueba t-Student

DISCUSIÓN.

Censo y longitud de crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*.

Los resultados de los censos realizados en el Archipiélago San Benito (playas donde se recolectaron muestras), mostraron que la mayoría de las hembras adultas (aprox. 50%) se encuentran en la Isla Centro, lo cual bien podría ser resultado de las características topográficas que presenta esta isla en particular; ésta es plana y está compuesta por varias playas arenosas muy amplias que son las preferidas por las hembras de esta especie para la reproducción durante el invierno (Le Boeuf y Laws, 1994). La Isla Oeste por su parte, presentó una abundancia menor (37.5%), ya que a pesar de tener una zona de playas arenosas ocupadas exclusivamente por el elefante marino del norte, presenta también un sector largo de zonas rocosas ocupadas por el lobo marino de California, *Zalophus californianus* y el lobo fino de Guadalupe, *Arctocephalus townsendi* (García-Aguilar, 2004). Estas áreas rocosas no son propicias para el desplazamiento en tierra por parte del elefante marino, por lo que limitan su acceso a este tipo de playas durante la reproducción (Le Boeuf y Laws, 1994). El menor número de individuos que se registró en la Isla Este (12.5%), se atribuyó a esta misma característica rocosa y de acantilados que domina esta isla y donde las playas arenosas son muy limitadas. El tipo de terreno (p.e. riscos) que se observa en la Isla Este es más bien propio de otros pinnípedos como el lobo fino de Guadalupe (Aurioles *et al.*, 2010).

En cuanto a las crías que se muestrearon a lo largo de los diferentes sitios, se observaron diferencias intra-insulares en el tamaño de las crías ubicadas en las diferentes playas muestreadas, aunque no fueron estadísticamente significativas. De la misma forma, al comparar el tamaño de las crías entre las islas tampoco se observaron diferencias significativas, sin embargo la Isla Centro tuvo la longitud promedio mayor y la variación menor de las tres islas. Dado que la talla de las crías es una función de su

edad y esta depende de la fecha de arribo de las madres, se sugiere que las primeras hembras en llegar al archipiélago ocupan esta isla primero, lo que se explica por sus características propicias ya descritas anteriormente (playas amplias con pendiente moderada y arena fina), las cuales facilitan el desplazamiento tipo “oruga” de estos fócidos y su termorregulación, ya que es factible arrojar arena sobre sus lomos con las aletas (Le Boeuf y Laws, 1994). Las playas amplias y de terreno uniforme más numerosas en la Isla Centro, también favorecen la estructura de harenes de hasta ochenta o más hembras, una característica propia en cuanto a reproducción, de estas agrupaciones de densidad alta dentro de la especie.

Análisis de isótopos estables.

La ventaja del estudio de isótopos estables en tejidos metabólicamente inertes como el pelo y las vibrisas, radica en que éstos, al ser sintetizados, ya no son modificados por el metabolismo y por lo tanto se convierten en archivos que permiten evaluar cambios isotópicos relacionados con distintas condiciones alimentarias en el tiempo (Bearhop *et al.*, 2003).

Temporalidad de la información isotópica contenida en el pelo de las crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*.

Como ya se ha mencionado, tradicionalmente se considera que el pelo es un tejido que brinda una ventana temporal de información aproximada de dos a tres meses anteriores al momento de la recolecta (Darimont y Reimchen 2002; Hobson *et al.*, 1997; Kurle y Worthy, 2001; Auriolles *et al.*, 2006), sin embargo, en este estudio, el pelo muestreado de crías de elefante marino del norte, fue capaz de brindarnos información de un periodo de tiempo más amplio ya que se debe considerar que la formación del pelo en el elefante marino comienza durante el desarrollo embrionario. En principio, el

folículo piloso aparece 2 meses después de la implantación del óvulo fecundado (implantación con retraso de 3 meses), sin embargo, el pelo como tal, comienza a crecer hasta 3.5 meses después de dicha implantación (Ling, 1967). Sabiendo que la gestación de estos organismos tiene una duración activa de 8 meses (Deutsch *et al.*, 1994), se infiere que el pelo empezó a sintetizarse aproximadamente 4.5 meses antes de que la hembra llegara a tierra a dar a luz (mes de diciembre) y por lo tanto se registraron señales isotópicas desde que la hembra se encontraba alimentándose en el océano hasta el momento de la recolecta de pelo a principios del mes de febrero (~5.5 meses). Estos antecedentes permiten inferir que la integración de la señal isotópica presente en las crías, contiene información de la segunda migración alimentaria de las hembras, cuando al parecer muchas hembras (rastreadas satelitalmente) se desplazan más lejos de tierra, extendiendo su ámbito varios grados de longitud y latitud (Le Boeuf *et al.*, 2000; Simmons *et al.*, 2007).

Temporalidad de la información isotópica contenida en las vibrisas de las crías de elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*.

Las vibrisas son un tejido que como ya se ha hecho referencia anteriormente, integra información que va desde unos meses en fócidos hasta 4-5 años en otáridos (Hirons *et al.*, 2001, Greaves *et al.*, 2004, Zhao y Schell, 2004; Hall-Aspland *et al.*, 2005; Mote-Herrera, 2011). En este estudio en particular, las vibrisas fueron recolectadas a partir de crías destetadas que llevaban en tierra ~1 mes (desde el día de nacimiento). Si recordamos que este tejido comenzó a formarse desde los dos meses de gestación activa, el periodo de información reflejado en cada vibrisa sería de ~7 meses anteriores a la recolecta, tiempo durante el cual, se llevó a cabo gran parte de la gestación y la lactancia, por lo que pudimos identificar las señales isotópicas sintetizadas a lo largo de estos dos eventos.

Interpretación de las señales de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en pelo de crías de *Mirounga angustirostris*.

Este estudio presentó el desarrollo de una técnica para definir la variación del comportamiento alimentario de hembras de elefante marino del norte en una escala geográfica, por medio de los valores isotópicos de carbono y nitrógeno en el pelo de sus crías. La técnica como ya se ha mencionado antes, se basa en conocer el valor de fraccionamiento isotópico entre madre y cría para inferir los valores de las hembras. Esta técnica ya ha sido realizada por otros autores y para diversas especies (p.e. Auriolles *et al.*, 2006; Jenkins *et al.*, 2001; Porras-Peters *et al.*, 2008; Franco-Trecu, en prensa).

Fraccionamiento isotópico madre-cría

El pelo de las crías de elefante marino del norte resultó ser un buen indicador de la alimentación de sus madres. En este sentido, las crías se encontraban en el inicio de la fase de ayuno al momento de la recolecta, después de haber pasado por una alimentación basada únicamente en leche materna por ~26 días posteriores al nacimiento. Por tanto, teóricamente la información isotópica proveniente del pelo de estas crías debería estar más enriquecida que el de sus madres. Este enriquecimiento de $\delta^{15}\text{N}$ de la cría con respecto a su madre, durante la lactancia ha sido reportado para diferentes especies (Hobson y Sease 1998; Nelson *et al.*, 1998; Polischuk *et al.*, 2001; Dalerum *et al.*, 2007). Sin embargo, de acuerdo a Jenkins *et al.*, (2001), este fraccionamiento madre-cría, es específico para cada especie y el hecho de considerarlo como equivalente a un nivel trófico con respecto al de la madre, podría ser muy simplista y nos podría llevar a conclusiones erróneas. Por esta razón debimos obtener el valor de fraccionamiento isotópico de hembras y crías de elefante marino del norte de Islas San Benito, usando el mismo tejido (que en esta caso fue la vibrisa) para la misma especie y población (Hobson *et al.*, 1996).

Se han realizado estudios reportando valores de fraccionamiento isotópico entre madre y cría en diferentes especies de pinnípedos (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de fraccionamiento isotópico madre-cría reportados para diferentes tejidos de pinnípedos.

Especie	Tejido	Fraccionamiento isotópico madre/cría.		Cita
		$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	
Lobo marino de California (<i>Zalophus californianus</i>)	Pelo	2.1	0.8	Porras-Peters <i>et al.</i> (2008)
Lobo fino del Norte (<i>Callorhinus ursinus</i>)	Músculo	1.2	0.7	Hobson <i>et al.</i> (1997)
Elefante marino del sur (<i>Mirounga leonina</i>)	Sangre	1.3	0.3	Ducatez <i>et al.</i> (2008)
Elefante marino del norte (<i>Mirounga angustirostris</i>)	Colágeno	1.87	0.44	Riofrío (2009)

Al comparar nuestros resultados con los citados anteriormente, corroboramos que nuestros valores ($\delta^{15}\text{N}$: +1.94‰; $\delta^{13}\text{C}$: -0.48‰) son muy similares a los reportados para esta especie y se encuentran dentro del rango de valores publicados para otros pinnípedos. Para el presente estudio, por tanto, usamos los valores de fraccionamiento entre vibrisas, para el cálculo de los valores isotópicos de las hembras del Archipiélago San Benito.

En el caso del $\delta^{13}\text{C}$, se corroboró que al igual que en otras especies, no existe un fraccionamiento isotópico significativo ($P = 0.114$; Tabla 1) entre madre y cría. Esto quizás se deba a que la magnitud de enriquecimiento en el nivel trófico del $\delta^{13}\text{C}$ es muy pequeña, y al hecho de que la leche de la cual se alimenta la cría, presenta un alto nivel de lípidos enriquecidos en ^{12}C y por ende empobrecidos en ^{13}C (De Niro y

Epstein, 1978). En este sentido, un organismo que produce leche con un contenido alto de lípidos como es el caso del elefante marino del norte (~50% de contenido lipídico;

Puppione *et al.*, 1996), proporciona a su cría alimento con un valor bajo de $\delta^{13}\text{C}$, por lo que es de esperar, que no exista diferencia entre las señal isotópica de la madre con respecto a la de la cría, a pesar del evidente fraccionamiento que debe existir en la cría al consumir una secreción de la madre (Lowther y Goldsworthy, 2010). Existen incluso, estudios que señalan valores de $\delta^{13}\text{C}$ más negativos en crías respecto a sus madres (Newsome *et al.*, 2006). Cabe mencionar que no existen diferencias entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de los lípidos y las proteínas, por lo que el consumo de la leche rica en lípidos, no afecta el enriquecimiento de ^{15}N entre la madre y la cría, razón por la cual se registró un fraccionamiento de $\sim+2\%$ ($P < 0.01$) para este isótopo, similar al registrado para *Zalophus californianus* de 2.1% (Porrás-Peters *et al.*, 2008). El incremento en el valor de $\delta^{15}\text{N}$ en la cría, es atribuido a que las madres producen la leche a partir del catabolismo de sus propios tejidos, y por lo tanto las crías al asimilar ésta, deberían mostrar valores más altos de $\delta^{15}\text{N}$ comparados con los de sus madres (Hobson *et al.*, 1997).

Con los resultados anteriores se procedió a obtener los valores isotópicos de las hembras para hacer la categorización y ubicación de los grupos de alimentación en base a dichas hembras.

Identificación de grupos migratorios

Las señales isotópicas registradas en el pelo de las crías de elefante marino del norte, presentaron una variación a lo largo de las tres islas equivalente a 5.2 ‰ en $\delta^{15}\text{N}$ y de 3.2‰ en $\delta^{13}\text{C}$. Esta variación sugiere de entrada, la existencia de distintos

escenarios ambientales dentro de una población (Ducatez *et al.*, 2008). Con base en esto y a partir de la resolución de los datos isotópicos de carbono y nitrógeno, se generó una importante evidencia acerca de la presencia de dos grupos migratorios (costero y oceánico) de hembras de elefantes marino del norte, *M. angustirostris*, residentes de las Islas San Benito, donde el grupo de alimentación costera estuvo representado por los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ más altos, con respecto al grupo de alimentación oceánica de señales más bajas en ambos isótopos estables (Fig. 14).

Ambos isótopos fueron correlacionados para cada grupo con el fin de obtener evidencia de que éstos estuvieran bien categorizados (Fig. 15). Se observó que para los grupos oceánicos hubo un mejor ajuste de la recta, mientras que los costeros no lograron un buen ajuste. Lo anterior se debe a que en un ambiente costero, la variación de señales isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ es muy alta debido a que las fuentes de carbono pueden ser de diversos tipos (macrófitas, fitoplancton, aportaciones terrígenas o señales provenientes de esteros cercanos), lo cual produce una correlación débil con el isótopo de nitrógeno, cuya variación está dada por una menor cantidad de factores (Hobson, 1999; Vander Zanden *et al.*, 1999; Kurle, 2002). Por otro lado, en el ambiente oceánico la cantidad de factores que aportan variación en el carbono no es tan alta, ya que la principal fuente es dada por el fitoplancton y por lo tanto la variación de ambos isótopos está más ligada al cambio en nivel trófico, lo que produce una correlación más alta entre ellos (Aurioles, com. per.).

Los grupos definidos como costero y oceánico, presentaron una diferencia en sus señales isotópicas de 1.6‰ y 1.8‰ para $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ respectivamente (Tabla 3), dichos valores son muy similares a los reportados por Kurle y Worthy, (2001), donde también se establece una diferencia de 1.5‰ y 1.6‰ de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, entre las señales isotópicas de lobos finos del norte, *Callorhinus ursinus*, con alimentación costera y oceánica. La formación de estos grupos dentro de una misma categoría es evidencia de una segregación como una estrategia para reducir la competencia por el alimento. Hay diferentes estudios sobre especies de mamíferos marinos que señalan la

presencia de individuos especialistas dentro de una población generalista, un fenómeno que consiste en el uso diferencial de recursos o bien de hábitats distintos, con el fin de reducir la competencia (Ford *et al.*, 1998; Estes *et al.*, 2003; Bolnick *et al.*, 2003). Finalmente, el reconocimiento de estas variaciones individuales a nivel ecológico, es necesario para un mejor entendimiento de la ecología evolutiva de las especies, así como para su conservación.

Cabe mencionar, que las diferencias en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre ambos grupos migratorios, podrían ser el reflejo de diferencias isotópicas latitudinales que se determinan desde la base de la cadena trófica, debido a un menor valor de $\delta^{13}\text{C}$ para el fitoplancton en latitudes altas (Rau *et al.*, 1983; Dunton *et al.*, 1989; Goericke y Fry 1994; Schell *et al.*, 1998). Estos valores basales del $\delta^{13}\text{C}$, se reflejan a manera de cascada en los depredadores tope como el elefante marino. Por otro lado el $\delta^{13}\text{C}$ puede definir el tipo de ambiente donde las madres de las crías muestreadas se alimentaron (costero/oceánico y pelágico/bentónico); donde las señales más enriquecidas de $\delta^{13}\text{C}$ reflejan sitios de alimentación más costeros y/o bentónicos, comparados con áreas oceánicas donde los valores de $\delta^{13}\text{C}$ son menores (Hobson *et al.*, 1997; France, 1995).

En este sentido se conoce, a partir de estudios de telemetría, que las hembras de elefante marino del norte tienen una alimentación pelágica (Le Boeuf *et al.*, 2000; Simmons *et al.*, 2007; Crocker *et al.*, 2006), descartándose la posibilidad de que las variaciones en el $\delta^{13}\text{C}$ se definan dentro del gradiente pelágico/bentónico, y basándonos en los 3 destinos migratorios (costero, costero-oceánico y oceánico) reportados para hembras de esta misma especie residentes de Año Nuevo, California (Simmons *et al.*, 2007) (Fig. 19), asumimos que la variación del isótopo estable de carbono está definida por el gradiente costero/oceánico principalmente. Con relación a este tema, existen diversos trabajos que han reportado diferencias en zonas de alimentación por medio de la técnica de isótopos estables (Lewis *et al.*, 2006; Kurle y Worthy, 2001; Lowther y Goldsworthy, 2010; Hassrick *et al.*, en revisión). Nuestros resultados coinciden con uno de los estudios más recientes realizado con hembras de

de *M. angustirostris* de California, donde también se distinguieron por medio de la técnica de isótopos estables, dos grupos de señales isotópicas correspondientes a diferentes sitios de alimentación, uno costero y otro oceánico (Hassrick *et al.*, en revisión).

En este trabajo, las hembras con migración costera estuvieron representadas por el 34% de los individuos muestreados mientras que las hembras con migración oceánica estuvieron representadas por el 66% de los individuos muestreados (Tabla 3; Fig. 16). Se ha mencionado que los organismos con migraciones oceánicas recorren una mayor distancia por lo que el tiempo que pasan alimentándose es menor que el de sus conespecíficos que se alimentan en la costa (Lowther y Goldsworthy, 2010), esto puede deberse a que hay una mayor agregación de presas en zonas oceánicas y por lo tanto, las hembras capturan con mayor eficiencia a sus presas (Hassrick *et al.*, en revisión). Sin embargo, para que exista una alta abundancia de especies presa en el ambiente marino, deben existir hábitats específicos que hagan viable su alimentación, reproducción y migración; en este sentido, la relación entre la disponibilidad de estos hábitats esenciales y las dinámicas poblacionales de las presas (p. e. peces) se ha documentado ampliamente para sitios costeros (Polovina *et al.*, 2001) mientras que para zonas oceánicas, no se tiene tanta información. Dadas las características de los ambientes costeros (surgencias, alta productividad, etc.), se esperaría que parte de la población de las hembras de elefante marino del norte migren hacia estos sitios para alimentarse, sin embargo se observa que la mayoría de las hembras están realizando migraciones a zonas oceánicas, lo cual debe estar relacionado a la existencia de hábitats que generan una alta productividad y por tanto alta abundancia de presas para estos organismos. Uno de estos hábitats es la zona de transición del frente de clorofila que se ubica en el Pacífico Norte, en el límite entre los giros subtropicales de baja clorofila y los giros subárticos de alta clorofila. Esta zona abarca 8000 km de longitud (este-oeste) y migra estacionalmente 1000 km de norte a sur, entre los 30 y 45°N (Polovina *et al.*, 2001). Hay que tomar en cuenta que durante la temporada que abarca la señal isotópica analizada (septiembre – febrero), el frente se encontraba entre las latitudes 35 y 45 °N, latitudes en las cuales se han registrado los sitios de alimentación

para hembras de *M. angustirostris* (~30 - 43°N) (Aurioles *et al.*, 2006). Además se tiene registro de que la alimentación de otras especies como la tortuga marina (*Caretta caretta*) y el atún (*Thunnus alalunga*) también está asociada a este frente (Polovina *et al.*, 2001).

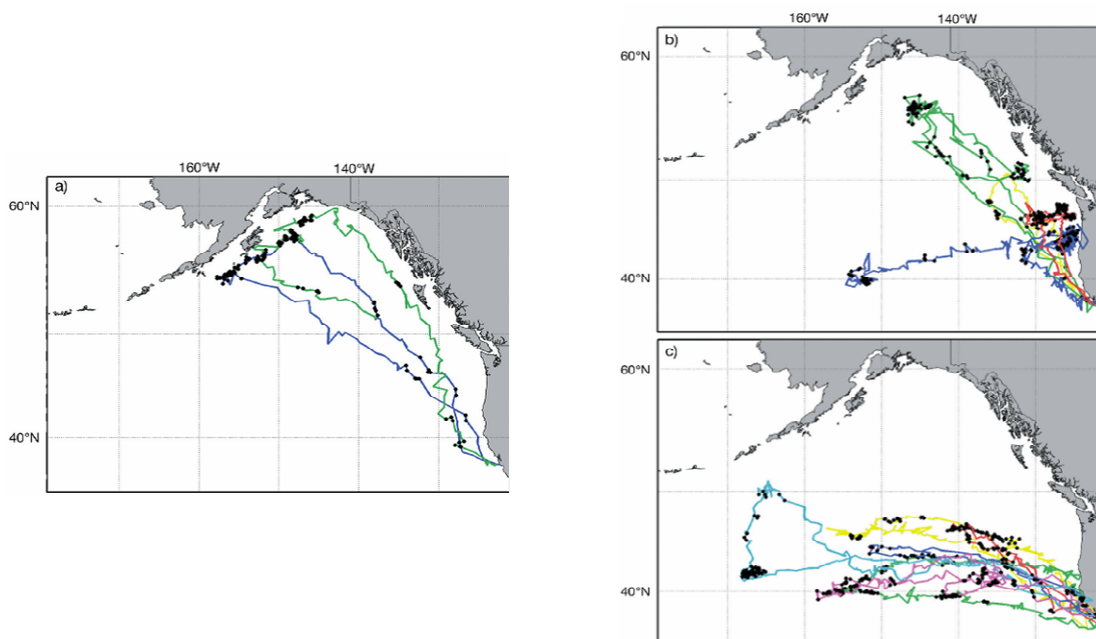


Figura 19. Rutas migratorias observadas en el elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*, residentes de Isla Año nuevo, California, por medio de telemetría satelital; a) destino migratorio costero; b) destino migratorio costero-oceánico; c) destino migratorio oceánico (tomado de Simmons *et al.*, 2007).

Los valores altos de $\delta^{13}\text{C}$ de los grupos costeros, están influenciados por la entrada de C al sistema por parte de algas macrófitas bentónicas de estas zonas, que se encuentran enriquecidas en ^{13}C si se comparan con los valores empobrecidos del fitoplancton de la zona oceánica (Michener y Schell, 1994; France, 1995); otro factor que enriquece los valores de ^{13}C es la alta tasa de crecimiento del fitoplancton (Laws *et al.*, 1995), en donde existe una captación rápida de ^{12}C durante la fijación de carbono orgánico fotosintético y muy poca discriminación contra el ^{13}C mientras las concentraciones de CO_2 van disminuyendo (Fry y Wainright, 1991; Pancost *et al.*, 1997; Burton y Koch, 1999). Por el contrario, en la zona oceánica, donde el aporte de

nutrientes es más limitado, las tasas de producción microalgal son muy bajas como para disminuir drásticamente las concentraciones de CO₂ acuoso (enriquecido en ¹²C); por lo tanto, el valor de δ¹³C del carbono fijado en la base de la cadena trófica de sitios oceánicos, es menor comparado con la señal del carbono fijado por el fitoplancton en zonas costeras. Cabe mencionar que para pinnípedos, se ha reportado que las diferencias entre las señales de ¹³C se encuentran más estrechamente relacionadas con las diferencias de fotosíntesis en el fitoplancton, que con la influencia que tiene el aporte de carbono por parte de las macroalgas (Burton y Koch, 1999).

En el caso del δ¹⁵N, la diferencia entre señales isotópicas se atribuye también a la influencia que genera el gradiente costero/oceánico basándonos en dos características principales: 1) los valores para determinar diferencias en nivel trófico deben ser mayores a las obtenidas en este trabajo (1.8‰), pues generalmente se considera que entre un depredador y su presa existe un fraccionamiento aproximado de 3 - 5‰ (DeNiro y Epstein, 1981; Hobson y Clark, 1992; Newsome *et al.*, 2009) y 2) no podemos considerar las diferencias en δ¹⁵N como una respuesta al gradiente latitudinal, debido a que Aurióles *et al.*, (2006), reportaron que por cada incremento en 4° latitud N, se disminuía 1‰ la señal de δ¹⁵N, de tal forma que en el presente estudio, la diferencia entre los grupos encontrados fue de 1.84‰ de δ¹⁵N, lo cual correspondería a 7.36° latitud de diferencia entre las zonas de alimentación de ambos grupos, esta diferencia latitudinal, es similar a la reportada entre las zonas de alimentación de hembras de elefante marino del norte residentes de Año Nuevo y San Benito (~8° latitud) (Aurióles *et al.*, 2006), por lo que no es posible esperar tanta diferencia entre zonas de forrajeo de grupos de hembras pertenecientes al mismo sitio (Archipiélago San Benito). Por lo anterior, es posible que las diferencias obtenidas en δ¹⁵N en nuestro trabajo, reflejen un fuerte gradiente costa-océano en la base de las redes tróficas (Montoya 2007); ya que comparado con el ambiente oceánico, el ambiente costero está caracterizado por la presencia de surgencias y gran cantidad de nutrientes, que en ocasiones generan florecimientos fitoplanctónicos propicios para la generación de hábitats de diversos organismos, los cuales son aprovechados por las

hembras de elefante marino durante los viajes de alimentación. Estos florecimientos han sido relacionados con el incremento en la señal de $\delta^{15}\text{N}$ en zooplancton, como consecuencia del aprovechamiento preferencial del nitrato enriquecido en ^{14}N que provoca un incremento constante en el $\delta^{15}\text{N}$ de los nitratos residuales (Montoya, 2007). Por esta razón se observa que los valores de $\delta^{15}\text{N}$, se encuentran más enriquecidos en el grupo con alimentación costera, que aquellos con alimentación oceánica.

A partir de estas inferencias, es posible decir que el estudio en las proporciones isotópicas del carbono y nitrógeno, nos permitió definir zonas de forrajeo de una especie que migra para alimentarse y que puede presentar diferentes estrategias para ese propósito. Lo anterior es debido a que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ son afectados por el nivel primario de la producción y tasa de crecimiento de fitoplancton entre otros, actuando como un indicador del hábitat usado por los consumidores (Wada *et al.*, 1987; Kurle y Worthy, 2002).

Esta separación de hábitats en las hembras de elefante marino del norte (basada en las proporciones de isótopos estables de carbono) concuerda con estudios de telemetría realizados previamente en esta misma especie en Año Nuevo, California (Le Boeuf *et al.*, 2000; Simmons *et al.*, 2007). Aunque a diferencia de esos estudios, en el presente trabajo sólo se distinguen dos grupos migratorios en las hembras del Archipiélago San Benito, mientras que para el trabajo referido anteriormente se describieron tres destinos migratorios: Costero, oceánico y oceánico/costero.

Posiblemente esta discrepancia, se deba a que los estudios de telemetría presentan una mayor resolución en la dirección que toman los animales al momento de ir a alimentarse, sin importar cuál sea el alimento ingerido. Por otro lado el análisis de isótopos estables se basa únicamente en el alimento ingerido, lo cual genera algunas limitaciones al intentar ubicar geográficamente a los organismos, debido a que no es capaz de distinguir entre fuentes diferentes que tienen composiciones isotópicas similares (Newsome *et al.*, 2007).

Una de las referencias más importantes en cuanto a este contraste entre información satelital e isotópica analizando un mismo caso, es el de Hassrick *et al.*, (en revisión), quienes compararon los resultados obtenidos por estas dos técnicas. En ese estudio se distinguieron nuevamente tres destinos migratorios por medio de la técnica de telemetría, mientras que el análisis de isótopos estables sólo distinguió dos grupos migratorios categorizados como costeros y oceánicos. Esto nos hace pensar que en nuestro estudio, las hembras del Archipiélago San Benito podrían tener estos tres destinos migratorios (costero, oceánico y costero-oceánico), sin embargo, la resolución de los isótopos estables no permite distinguir y separar las señales del grupo intermedio que sería el costero-oceánico y por tanto tiene una mezcla isotópica de ambas zonas.

Patrones isotópicos en vibrisas

Los perfiles isotópicos a lo largo de las 5 vibrisas, nos permitieron generar información que no se había reportado con anterioridad, relacionada a la identificación de procesos fisiológicos por los que atraviesan las crías de elefante marino durante sus primeros meses de vida. El isótopo estable que hizo posible dicha identificación fue el de Carbono, por medio del cual pudimos distinguir dos etapas a lo largo de cada una de las vibrisas: Gestación y lactancia.

Perfil isotópico de Carbono

Las 5 vibrisas analizadas tuvieron un comportamiento muy similar; en todas se presentaron valores enriquecidos en ^{13}C al inicio y valores más negativos al final. Como podemos observar en la figura 20, la diferenciación de las señales isotópicas correspondientes a cada uno de los periodos identificados (gestación, nacimiento y lactancia), se generó a partir del valor máximo de $\delta^{13}\text{C}$, a partir del cual se observó un

decremento casi constante de los valores de carbono. Por lo tanto, las señales que se registraron antes del valor máximo de $\delta^{13}\text{C}$ (nacimiento), se relacionaron al periodo de gestación de la cría o periodo *in utero*, mientras que los valores posteriores al pico de $\delta^{13}\text{C}$, fueron interpretados como señales correspondientes al periodo de lactancia.

En cuatro de las cinco vibrisas analizadas, los valores promedio del periodo correspondiente a la gestación, presentaron diferencias significativas al compararse con los valores promedio referentes a la lactancia (Tabla 4). Lo anterior podría indicar que nuestros resultados se acercan a la correspondencia real entre cada grupo de segmentos de vibrisa y los dos periodos (gestación y lactancia) mencionados para estas crías.

El criterio utilizado para la identificación de estos periodos, está basado en la premisa de que posterior al nacimiento, da inicio la lactancia durante la cual, la cría es alimentada exclusivamente de leche materna, que como ya se mencionó, los valores de la leche están empobrecidos en ^{13}C debido al alto contenido de lípidos enriquecidos en ^{12}C (Newsome *et al.*, 2006), por consiguiente, en el momento en que detectamos la disminución constante en la señal de $\delta^{13}\text{C}$, resolvimos que esa sección podría corresponder a la fase de la lactancia. Una característica importante de esta fase, es que la composición lipídica de la leche aumenta gradualmente durante el transcurso de la lactancia, presentándose mayor cantidad de lípidos hacia el final de ésta (Mellish *et al.*, 1999), lo cual posiblemente se relacione con la disminución constante de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ a lo largo de este periodo.

Por otro lado, las variaciones observadas en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ durante el periodo de gestación, se atribuyeron a cambios en el hábitat de forrajeo por parte de la hembra, ya que lo más probable es que durante el periodo de alimentación, la hembra no se alimente en un solo sitio, sino que dentro de una zona determinada (p.e. a lo largo de un segmento costero o dentro de una zona oceánica), se mueva a diferentes sitios en busca de alimento (debido a las condiciones oceanográficas cambiantes y a la localización de presas) (Le Boeuf *et al.*, 2000; Crocker *et al.*, 2006). Estos sitios podrían presentar diferencias isotópicas en la base de la cadena trófica y estas diferencias

verse reflejadas en las señales de $\delta^{13}\text{C}$ de los tejidos tanto de la hembra como de su cría (el feto) (Hobson *et al.*, 1997; France, 1995).

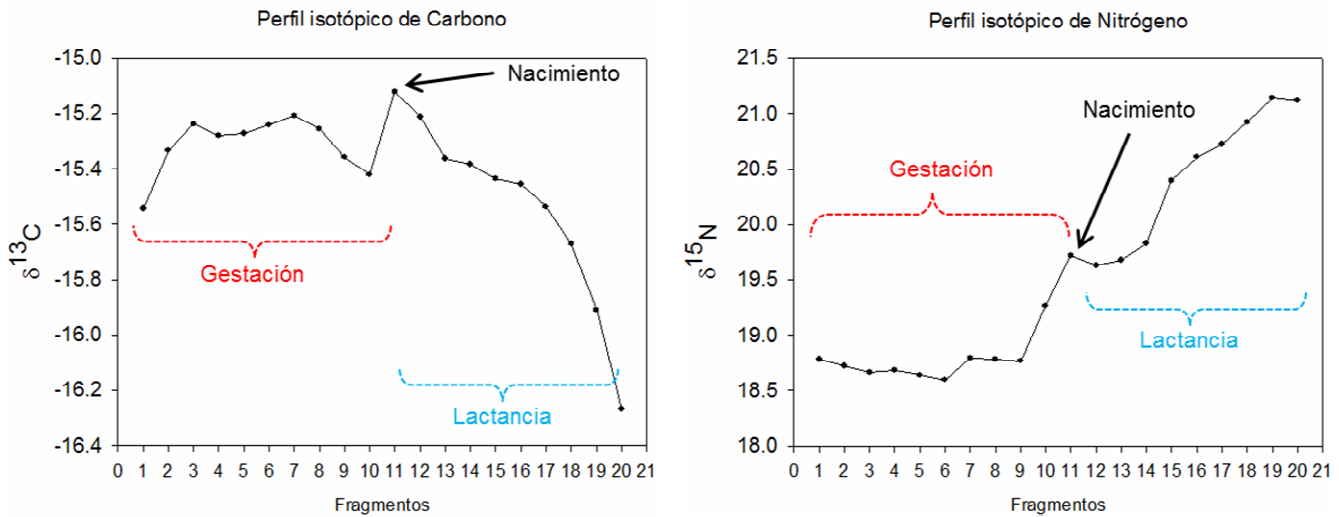


Figura 20. Perfil de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, registrados a lo largo de una de las vibrisas colectadas en crías destetadas de *Mirounga angustirostris* en el Archipiélago San Benito. Todos los valores isotópicos se encuentran graficados en orden cronológico comenzando con los valores desde la punta (época anterior) hacia la base (época reciente) de la vibrisa. Se muestra con una flecha el valor hipotético asignado al nacimiento, seguido de los valores correspondientes a la lactancia (azul); en rojo se muestra las señales comprendidas durante la gestación.

Perfil isotópico de Nitrógeno.

La variación en el isótopo de nitrógeno no es tan clara, sin embargo basándonos en la separación que se hizo por medio del isótopo de C, se distinguieron las etapas de gestación y lactancia correspondientes para cada caso. El patrón observado en todas las vibrisas fue muy similar, resaltando que existe un incremento casi continuo a lo largo del tiempo desde que el organismo se encontraba *in útero*, hasta el final de la lactancia.

Como ya habíamos mencionado antes, el isótopo de nitrógeno se ha caracterizado por brindar información respecto a la posición trófica de los organismos, recordando que la relación de $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, cambia a cada nivel trófico conforme el isótopo ligero va siendo preferencialmente excretado, lo que resulta en un incremento de 3-5‰ en $\delta^{15}\text{N}$ con respecto a su dieta (Deniro y Epstein, 1981; Hobson y Clark, 1992; Newsome *et al.*, 2009). Sin embargo, si el $\delta^{15}\text{N}$ estuviera respondiendo a cambios en nivel trófico, el patrón observado sería diferente y se esperaría un incremento rápido de ~3‰ entre el periodo de gestación y la lactancia, cuando la cría empieza a consumir leche, la cual presenta la firma isotópica materna; en su lugar, el patrón muestra un incremento gradual y constante de la señal de $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de todo el tiempo por lo que se asume que el incremento en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ podría estar asociado con la influencia que tiene la tasa de crecimiento sobre la discriminación trófica. Los tejidos del consumidor muestran un menor factor de discriminación (o fraccionamiento) en relación a su dieta cuando incrementa el proceso de acreción proteica, el cual se presenta durante periodos de rápido crecimiento y se caracteriza por la incorporación directa de una gran cantidad de proteínas derivadas de la dieta para la síntesis de tejidos proteicos relacionados con el crecimiento. De esta forma, teóricamente la composición isotópica del consumidor se acercaría mucho a la de su dieta (debido al bajo enriquecimiento isotópico).

Por lo tanto, el incremento gradual en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de la vibrisa, pueden ser el resultado del decremento en la tasa de crecimiento del feto/cría, considerando como puntos extremos el inicio del desarrollo del embrión y el destete de la cría. El embrión presenta una tasa de crecimiento más rápida al comienzo de la gestación y conforme el feto empieza a desarrollarse y completar formación de órganos y tejidos, esta tasa de crecimiento bien podría ir disminuyendo. Del mismo modo podría suceder una vez que se da el nacimiento, donde la cría crece rápidamente a lo largo de una lactancia intensiva de ~26 días, hasta poco a poco ir presentando una desaceleración del crecimiento cuando se empieza alcanzar el tamaño correspondiente al destete (Newsome *et al.*, 2009). Por lo tanto, el factor dominante en el incremento constante de los valores de $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de la vibrisa, puede no estar asociado a un

incremento en el nivel trófico como resultado de cambios en la dieta, sino a un cambio en la incorporación diferencial del isótopo de N durante la gestación y la lactancia de las crías.

Los resultados presentados sirven como referencia para futuras investigaciones ya que recientemente, se siguen realizando investigaciones donde se ha intentado separar la sección de la vibrisa correspondiente a la fase *in útero* de la sección perteneciente a la *ex útero* (lactancia), sin mucho éxito (Lowther y Goldsworthy, 2010), por lo que los datos aquí proporcionados servirán de base para poder realizar este tipo de análisis o distinciones con mayor seguridad en el futuro.

CONCLUSIONES

- La isla del archipiélago que presentó la mayor cantidad de hembras adultas y la menor variación de información isotópica, fue la Isla del Centro, la cual presenta el mayor número de playas apropiadas para la reproducción de la especie en comparación a las otras dos islas.
- El pelo de crías de elefante marino del norte resultó ser un buen indicador de la alimentación de sus madres. A partir de esta información y el valor de fraccionamiento de $\delta^{15}\text{N}$ determinado (1.936‰), se establecieron valores isotópicos hipotéticos para las hembras adultas de elefante marino del norte, *M. angustirostris* de San Benito.
- Con base en la aproximación del análisis isotópico de N y C, se determinaron dos grupos principales de alimentación en hembras de elefante marino del norte *M. angustirostris* de San Benito. El 34% correspondió al tipo costero y el 66% al tipo oceánico. Sin embargo, es probable la existencia de un tercer grupo (oceánico/costero) que no es detectado por la técnica de isótopos estables pero que se ha reportado para la misma especie en otras áreas. Por lo tanto se recomienda acompañar a esta técnica con telemetría satelital para evitar errores al momento de definir movimientos geográficos
- Nuestro estudio describió diferencias interindividuales de comportamiento alimentario en hembras adultas de elefante marino del norte, que se tradujeron en una variación significativa intra-sexual.
- A través del análisis isotópico exploratorio realizado en vibrisas de crías destetadas de elefante marino del norte *M. angustirostris*, se lograron distinguir los fragmentos de la vibrisa formados durante el periodo de gestación y los fragmentos generados durante el periodo de lactancia. Esta distinción se realizó

por medio de los valores de $\delta^{13}\text{C}$, observando que el periodo correspondiente a la lactancia, se caracteriza por presentar una caída continua en los valores de $\delta^{13}\text{C}$, mientras que en el periodo de gestación, la señal es más positiva.

- El $\delta^{15}\text{N}$ no mostró ser un buen indicador de estas fases de desarrollo en la cría debido a que en este periodo, el crecimiento acelerado que se presenta durante la gestación o bien durante el crecimiento de la cría durante la lactancia, no permite al $\delta^{15}\text{N}$ ser interpretado como tradicionalmente se ha definido (con base en el nivel trófico). En este caso parece presentarse una relación inversa entre la tasa de crecimiento y los valores de $\delta^{15}\text{N}$ en las vibrisas de las crías, como ya se ha reportado en otros casos para otras especies. Cabe mencionar, que el número reducido de muestras utilizados en esta sección, se debe a que este análisis solo se realizó con fines exploratorios, por lo que será interesante seguir trabajando con vibrisas de crías en esta u otras colonias para poder definir mejor la caracterización de procesos fisiológicos por medio del análisis isotópico.
- El uso del análisis de isótopos estables desarrollado en el presente estudio, representa una herramienta poderosa de bajo costo e impacto para incrementar el entendimiento del comportamiento de forrajeo de un depredador marino.

LITERATURA CITADA.

- Acosta, P. T. A. 2007.** Estudio de la variación isotópica de Carbono y nitrógeno en vibrisas de elefante marino (*Mirounga angustirostris*) en Islas San Benito e Isla Guadalupe, Baja California Sur, México e Isla Año Nuevo, California, USA. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología Marina. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 115 pp.
- Antonelis, G. A., Leatherwood, S. y K. D. Odell. 1981.** Population growth and censuses of the northern elephant seal *Mirounga angustirostris* on the California channel islands 1958-78. *Fish. Bull.* 79: 562-567
- Antonelis, G. A., Lowry M. S., DeMaster, D. P. y C. H. Fiscus. 1987.** Assessing northern elephant seal feeding by stomach lavage. *Mar. Mammal Sci.* :308-322.
- Antonelis, G. A., Lowry, M. S., Fiscus, C. H., Stewart, B. S. y R. L. De Long. 1994.** Diet of the northern elephant seal. In: Le Boeuf BJ, Laws RM (eds) *Elephant Seals: Population Ecology, Behavior, and Physiology*. University of California Press, Berkeley, CA. 211-226 pp.
- Aurioles, G. D., Koch, P. y B. J. Le Boeuf. 2006.** Differences in foraging ecology of mexican and California elephant seals: Evidence from stable isotopes in pups. *Mar. Mammal Sci.* 22: 1-13.
- Aurioles, G. D., Newsome, D. S., Salazar-Pico, S. y L. P. Koch. 2009.** Stable isotope differences between sea lions (*Zalophus*) from the Gulf of California and Galápagos Islands. *J. Mammal.* 90(6): 1410-1420.
- Aurioles, G. D., Elorriaga, V. F. y C. C., Hernández. 2010.** The current population status of Guadalupe fur seal (*Arctocephalus townsendi*) on the San Benito Islands, México. *Mar. Mammal Sci.* 26(2): 402-408.
- Bearhop, S., R. W. Furness, G. M. Hilton, S. C. Votier y S. Waldron. 2003.** A forensic approach to understanding diet and habitat use from stable isotope analysis of (avian) claw material. *Funct. Ecol.* 17, 270–275.
- Bearhop, S., Adams, C., Waldron, S., Fuller, R. y H. Macleod. 2004.** Determining trophic niche width: A novel approach using stable isotope analysis. *J. Anim. Ecol.* 73:1007–1012.
- Berta, A., Sumich, J. L. y K. M. Kovacs. 2006.** *Marine Mammals: Evolutionary Biology*. 2nd Edition. Elsevier. USA. 547 pp.

- Biuw, M. B., McConnell, C. J., Bradshaw, A., Burton H. y M. Fedak. 2003.** Blubber and buoyancy: Monitoring the body condition of free-ranging seals using simple dive characteristics. *J. Exp. Biol.* 206: 3405-3423
- Bolnik, D. I. Svanbäck, R., Fordyce, J. A. Yang, L. H. Davis, J. M. Hulse, C. D. y M. L. Forister. 2003.** The ecology of individuals: incidence and implications of individual specialization. *Am. Nat.* 161:1-28.
- Boswall, J. 1978.** The birds of the San Benito Islands, lower California, Mexico. *Bristol Ornithology.* 11:23-30.
- Bowen, W. D. 2000.** Reconstruction of pinnipeds diets: Accounting for complete digestion of otoliths and cephalopod beaks. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57:898–905.
- Boyd, I. L., Arnborn, T. A. y M. A. Fedak. 1994.** Biomass and energy consumption of the South Georgia stock of southern elephant seals. In: Le Boeuf BJ, Laws RM (eds) *Elephant Seals: Population Ecology, Behavior, and Physiology.* University of California Press, Berkeley, CA. 98-120 pp.
- Bradshaw, C. J. A., Hindell, M. A., Best, N. J., Phillips, K. L., Wilson, G. y P. D. Nichols. 2003.** You are what you eat: Describing the foraging ecology of southern elephant seals (*Mirounga leonina*) using blubber fatty acids. *Proc. Roy. Soc. Lond. B* 270:1283-1292.
- Burton, R. K. y P. L. Koch. 1999.** Isotopic tracking of foraging and long-distance migration in northeastern Pacific pinnipeds. *Oecologia.* 119:578-585.
- Campagna, C. 2008.** *Mirounga angustirostris*. In: IUCN 2009. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2009.2. <www.iucnredlist.org>. Descargado el 03 Noviembre del 2009.
- Cherel, Y., Ducatez, S., Fontaine, C., Richard, P. y C. Guinet. 2008.** Stable isotopes reveal the trophic position and mesopelagic fish diet of females southern elephant seals breeding on the Kerguelen Islands. *Mar. Ecol-Prog. Ser.* 370: 239-247.
- Condit, R. y B. J. Le Boeuf. 1984.** Feeding habits and feeding grounds of the northern elephant seal. *J. Mammal* 65:281-290.
- Condit, R. 2009.** Comunicación personal. Smithsonian Topical Research Institute. P. O. Box 0843-03092, Blaboa, Ancon, República de Panama.
- Crocker, E. D., Costa, P. D., Le Boeuf, J. B., Webb, M. P. y S. D. Houser. 2006.** Impact of El Niño on the foraging behavior of female northern elephant seals. *Mar. Ecol-Prog. Ser.* 309: 1-10.

- Cupa, C. L. 2007.** Evaluación de los perfiles de ácidos grasos del lobo marino de California *Zalophus californianus* en estudios de alimentación. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, Baja California Sur. 109 p.p.
- Dalerum, F., Bennett, N. C. y T. H. Clutton-Brock. 2007.** Longitudinal differences in ^{15}N between mothers and offspring during and after weaning in a small cooperative mammal, the meerkat (*Suricata suricatta*). *Rapid Commun Mass Sp.* 21:1889–1892.
- Daneri, G. A., A. R. Carlini y P. G. K. Rodhouse. 2000.** Cephalopod diet of the southern elephant seal, *Mirounga leonina* at King George Island, South Shetland Islands. *Antarct. Sci.* 12:16-19.
- Darimont, C. y T. Reimchen. 2002.** Intra-hair stable isotope analysis implies seasonal shift to salmon in Gray wolf diet. *Can J Zool.* 80:1638–1642.
- DeNiro, M. J. y S. Epstein. 1978.** Influence of the diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Ac.* 42: 495-506.
- DeNiro, M. y S. Epstein. 1981.** Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Ac.* 3:341-351.
- Deutsch C. J., Crocker D. E., Costa D. P. y B. J. Le Boeuf. 1994.** Sex- and age-related variation in reproductive effort of northern elephant seals. In: Elephant Seals: Population Ecology, Behavior, and Physiology (Le Boeuf BJ, Laws RM, eds). Berkeley: University of California Press; 169-210.
- Donlan, C. S., Tershy, B. R., Keit, B. S., Sánchez, J. A., Wood, B., Weinstein, A. Croll, D. y M. A. Hermosillo. 1999.** *Island conservation actions in Northwest Mexico.* En: Browne, D. R., Mitchell, K. L. y Chaney, H. W. (Eds.). *Proceedings of the fifth California Islands Symposium.* Santa Barbara Museum of Natural History. Santa Barbara, CA.
- Ducatez, S., Dalloyau, S., Richard, P., Guinet, C. y Y. Cherel. 2008.** Stable isotopes document winter trophic ecology and maternal investment of adult female southern elephants (*Mirounga leonina*) breeding at the Kerguelen islands. *Mar. biol.* 155:413-420.
- Dunton, K. H., Saupe, S. M., Golikov, A. N., Schell, D. M. y S. V. Schonberg. 1989.** Trophic relationships and isotopic gradients among Arctic and sub-Arctic marine fauna. *Mar. Ecol-Prog. Ser.* 56:89–9
- Elorriaga, V. F. R. 2009.** Variación de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en colágeno dental de lobos marinos del género *Zalophus*: patrones ontogénicos y geográficos. Tesis Doctoral. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S. 142 pp.

- Estes, J. A., M. L. Riedman, M. M. Staedler, M. T. Tinker y B. E. Lyon. 2003.** Individual variation in prey selection by sea otters: Patterns, causes and implications. *J. Anim. Ecol.* 72: 144-155.
- Field, I., Hindell, M. A., Slip, D. J. y K. J. Michael. 2001.** Foraging strategies of southern elephant seals (*Mirounga leonina*) in relation to frontal zones and water masses. *Antarct. Sci.* 13:371-379.
- Ford, J. K. B., Ellis, G. M., Barrett-Lennard, L. G., Morton, A. B., Palm, R. S. y K. C. Balcomb III. 1998.** Dietary specialization in two sympatric populations of killer whales (*Orcinus orca*) in coastal British Columbia and adjacent waters. *Can. J. Zool.* 76: 1456-1471.
- France, R. L. 1995.** Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: Foodweb implications. *Mar. Ecol-Prog. Ser.* 124:307-312.
- Franco-Trecu V., D. Aurióles-Gamboa, M. Arim y M. Lima.** Aceptado. Pre partum and post-partum trophic overlap between sympatric breeding females of *Arctocephalus australis* and *Otaria flavescens*. *Journal of mammalogy*.
- Fry, B. y S. C. Wainright. 1991.** Diatom sources of ^{13}C -rich carbon in marine food webs. *Mar Ecol-Prog. Ser.* 76:149-157.
- García, A. C., Le Boeuf, B. J. y G. D. Aurióles.** Status of the northern elephant seal colony on Islas San Benito, México. **En preparación.**
- García-Aguilar, M. C. 2004.** Breeding biology of the northern elephant seal (*Mirounga angustirostris*) at the Isla San Benito del Oeste, Eastern Pacific, México. *Aquatic Mammals.* 30(2): 289-295.
- García, R. F. y G. D. Aurióles. 2004.** Spatial and temporal variation in the diet of the California sea lion (*Zalophus californianus*) in the Gulf of California, Mexico. *Fish. Bull.* 102: 47-62.
- Ginter, C.C., F.E. Fish y C.D. Marshall. 2010.** Morphological analysis of the bumpy profile of phocid vibrissae. *Marine Mammal Science*, 26(3): 733–743.
- Goericke, R. y B. Fry. 1994.** Variations of marine $\delta^{13}\text{C}$ with latitude, temperature, and dissolved CO_2 in the world. *Ocean. Global Biogeochemical Cycles.* 8: 85-90.
- Greaves, D., Hammill, M., Eddington, J. y J. Schreer. 2004.** Growth rate and shedding of vibrissae in the gray seal, *Halichoerus grypus*: a cautionary note for stable isotope diet analysis. *Mar. Mammal Sci.* 20(2):296-304.

- Habran, S., Debier, C., Crocker, D. E., Houser, D. S., Lepoint, G., Bouquegneau, J. M. y K. Das. 2010.** Assessment of gestation, lactation and fasting on stable isotope ratios in northern elephant seals. *Mar. Mammal Sci.* 26:880-895.
- Hall-Aspland, A., Rogers, T. y R. Canfield. 2005.** Stable carbon and nitrogen isotope analysis reveals seasonal variation in the diet of leopard seals. En: *Mar. Ecol-Prog. Ser.* 305:249–259.
- Hassrick et al. en revisión.** Isoscapes revealed by satellite tracking of a long distance forager, the northern elephant seal. *Mar. Ecol-Prog. Ser.*
- Hindell, M. A., Burton, H. R. y D. J. Slip. 1991a.** Foraging areas of southern elephant seals, *Mirounga leonina*, as inferred from water temperature data. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.* 42:115-128.
- Hindell, M. A., Slip, D. J. y H. R. Burton. 1991b.** The diving behavior of adult male and female southern elephant seals, *Mirounga leonina* (Pinnipedia: Phocidae). *Aust. J. Zool.* 39:595-619
- Hirons, A., Schell D. y D. Aubin. 2001.** Growth rates of vibrissae of harbor seals (*Phoca vitulina*) and Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*). *Can. J. Zool.* 79:1053–1061.
- Hobson, K. A. y R. G. Clark. 1992.** Assessing avian diets using stable isotope analysis. II. Factors influencing diet–tissue fractionation. *Condor*, 94:189–197.
- Hobson, K. A. y H. E. Welch. 1992.** Determination of trophic relationships within a high arctic marine food web using $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ analysis. *Mar. Ecol- Progress Ser.* 84:9-18.
- Hobson, K. A., Ambrose, W. G. J. y P. E. 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. *Mar. Ecol-Progress Ser.* 128:1–10.
- Hobson, K. A., Schell, M. D., Renouf, D. y E. Noseworthy. 1996.** Stable carbon and nitrogen isotopic fractionation between diet and tissues of captive seals: Implications for dietary reconstructions involving marine mammals. *J. Fish. Aquat. Sci.* 53:528-533.
- Hobson, K. A., Sease, J. L., Merrick, R. L. y J. F. Piatt. 1997.** Investigating trophic relationships of pinnipeds in Alaska and Washington using stable isotope ratios of nitrogen and carbon. *Mar. Mammal Sci.* 13:114-132.
- Hobson, K. A., y J. L. Sease. 1998.** Stable isotope analysis of tooth annuli reveal temporal dietary records: An example using Steller Sea lions. *Mar. Mammal Sci.* 14: 116-129.
- Hobson, K. 1999.** Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review. *Oecologia.* 120, 314–326.

- Jenkins, G. S., Patridge, T. S., Stephenson, R. T., Farley, D. S. y T. C. Robbins. 2001.** Nitrogen and carbon isotope fractionation between mothers, neonates, and nursing offspring. *Oecologia*. 129: 336-341.
- Junak, S. A. y R. Philbrick. 1999.** Flowering plants of the San Benito Islands, Baja California, Mexico. Proceedings of the fifth California Islands Symposium. Santa Barbara Museum of Natural History. Santa Barbara, CA.
- King, E. J. 1991.** Seals of the world. Segunda edición. Comstock publishing y Cornell University Press. Ithaca N.Y. 240 pp.
- Koch, P. L., Fogel, M. L. y N. Tuross. 1994.** Tracing the diets of fossil animals using stable isotopes. En: Lajtha K. y R.H. Michener (Eds.) Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science. Blackwell Scientific Publications. Boston. 63-92 pp.
- Kuhn, C. E., Aurióles, G. D. y D. P. Costa. 2004.** Habitat utilization, diving and foraging behavior of adult female California sea lions (*Zalophus californianus*). XIX Reunión Internacional para el Estudio de los Mamíferos Marinos. La Paz, México. 78 pp.
- Kuhn, C. E., Aurióles, G. D., Weise M. J. y D. P. Costa. 2006.** Oxygen stores of California sea lion pups: Implications for diving ability. Sea lions of the world. En: Sea Lions of the World. Alaska Sea Grant College Program. AK-SG-06-01.
- Kurle, C. y G. Worthy. 2001.** Stable isotope assessment of temporal and geographic differences in feeding ecology of northern fur seals (*Callorhinus ursinus*) and their prey. *Oecologia*. 126: 254–265.
- Kurle, C. 2002.** Stable-isotope ratios of blood components from captive northern fur seals (*Callorhinus ursinus*) and their diet: applications for studying the foraging ecology of wild otariids. *Can. J. Zool.* 80:902–909.
- Kurle, C. y G. Worthy. 2002.** Stable nitrogen and carbon isotope ratios in multiple for dietary and migratory reconstructions. *Mar. Ecol-Prog. Ser.* 236:289–300.
- Laws, E. A., Popp, B. N., Bigdare, R. R., Kennicutt, M. C. y S. A. Macko. 1995.** Dependence of phytoplankton carbon isotopic composition on growth rate and (CO²) aq: theoretical considerations and experimental results. *Geochim. Cosmochim. Ac.* 59:1131-1138.
- Le Boeuf, B. J. 1972.** Sexual behaviour in the northern elephant seal, *Mirounga angustirostris*. *Behaviour*, 41:1-26
- Le Boeuf, B. J., Whiting, R. J. y R. F. Gantt. 1972.** Perinatal behavior of northern elephant seal females and their young. *Behavior* 43:121-156.

- Le Boeuf, B. J. y S. Kaza. 1981.** The natural history of Año Nuevo. Boxwood Press, Pacific Grove, Ca. 425pp.
- Le Boeuf, B. J. y R. M. Laws. 1994.** Elephant Seals: An introduction to the genus. En: B. J. Le Boeuf y R. M. Laws (Eds.). Elephant Seals: Population Ecology, Behavior, and Physiology. University of California Press, Los Angeles. 1–28 pp.
- Le Boeuf B. J. 1994.** Variation in the diving pattern of northern elephant seals with age, mass, sex and reproductive condition. In: Le Boeuf BJ, Laws RM (eds) Elephant Seals: Population Ecology, Behavior, and Physiology. University of California Press, Berkeley, CA. 211-226 pp.
- Le Boeuf, B. J., Morris, P. A., Blackwell, S. B., Crocker, D. E. y D. P. Costa. 1996.** Diving behavior of juvenile northern elephant seals. *Can. J. Zool.* 74:1632-1644.
- Le Boeuf, B. J , D. E. Crocker, D. P. Costa, S. B. Blackwell, P. M. Webb y D. S. Houser. 2000.** Foraging ecology of northern elephant seals. *Ecol. Monogr.* 70:353-382.
- Lewis, R., Connell, T. C. O., Lewis, M. C., Campagna, C. y A. R. Hoelzel. 2006.** Sex specific foraging strategies and resource partitioning in the southern elephant seal (*Mirounga leonina*). *P. Roy. Soc. B.* 273:2901–2907.
- Ling, J. K. y C. D. B. Thomas 1967.** The skin and hair of the southern elephant seal, (*Mirounga leonina* (L.) II. pre-natal and early post-natal development and moulting. *Aust. J. Zool.* 15:349–365.
- Lowther, D. A. y S. D. Goldsworthy. 2010.** Detecting alternate foraging ecotypes in Australian sea lion (*Neophoca cinerea*) colonies using stable isotope analysis. *Mar. Mammal Sci.* 27(3): 567-586.
- McConnell, B. J., Chambers C. y M. A. Fedak. 1992.** Foraging ecology of southern elephant seals in relation to bathymetry and productivity of the Southern Ocean. *Antarct. Sci.* 4:393-398.
- McConnell, B.J. y M. A. Fedak. 1996.** Movements of southern elephant seal. *Can. J. Zool.* 74:1485-1496.
- McGinnis, M. S. y J. R. Schusterman. 1981.** Northern elephant seal-*Mirounga angustirostris*. In Handbook of marine mammals. Vol. 2. Seals. Editado por S. H. Ridgway and R. J. Harrison. Academic Press. Londres. 329-349 pp.
- Mellish, J. E., Iverson, A. J., Bowen, W. D. y M. O. Hammill. 1999.** Fat transfer and energetics during lactation in the hooded seal: the roles of tissue lipoprotein lipase in milk fat secretion and pup blubber deposition. *J. Comp. Physiol. B.* 169: 377-390.

- Michener, R.H. y D. M. Schell. 1994.** Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs. En: Stable isotopes in ecology and environmental science. Eds. Lajtha, K., Michener, R. H. Blackwell, Boston, pp 138-15.
- Michener, R. y K. Lajtha. 2007.** Stable Isotopes in ecology and environmental science. Segunda edición. Blackwell publishing. USA. 566 pp.
- Montoya, J. P. 2007.** Natural abundance of ^{15}N in marine phytoplankton ecosystems. In: Michener (R) and Lajtha (K) (eds.) Stable isotopes in ecology and environmental science. Blackwell publishing. 176-194 pp.
- Mote, H. 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 de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, Baja California Sur. México. 90 pp.
- Nelson, E. D., Angerbjörn, A., Lidén, K. e I. Turk. 1998.** Stable isotopes and the metabolism of the European cave bear. *Oecologia*. 116: 117-181.
- Newsome, S. D., Koch, P., Etnier, M. A. y G. D. Aurioles, 2006.** Using carbon and nitrogen isotope values to investigate maternal strategies in Northeast Pacific Otariids. *Mar. Mammal Sci.* 22:1-18.
- Newsome, S. D., Martínez-Del Río, C., Bearhop, S. y D. Phillips. 2007.** A niche for isotopic ecology. *Front. Ecol. Environm.* 5:429-436.
- Newsome, S. D., Etnier, M. A. Monson, D. H. y M. L. Fogel. 2009.** Retrospective characterization of ontogenetic shifts in killer whale diets via C^{13} and N^{15} analysis of teeth. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 374:229-242.
- Orr, A. J. y J. T. Harvey. 2001.** Quantifying errors associated with using fecal samples to determine the diet of the California sea lion (*Zalophus californianus*). *Can. J. Zool.* 79:1080–1087.
- Owens, P. J. N. 1987.** Natural variations in ^{15}N in the marine environment. *Adv. Mar. Biol.* 24:389-451.
- Pancost, R. D., Freeman, K. H., Wakeham, S. G. y C. Y. Robertson. 1997.** Controls on carbon isotope fractionation by diatoms in the Peru upwelling region. *Geochim Cosmochim Ac.* 61:4983-4991.
- Peterson, J. B. y B. Fry. 1987.** Stable Isotopes in Ecosystem Studies. *Annual Review of Ecology and Systematics.* 18: 293-320.

- Polischuk, S., Hobson, K., y M. Ramsay. 2001.** Use of stable-carbon and nitrogen isotopes to assess weaning and fasting in female polar bears and their cubs. *Can. J. Zool.* 79: 499–511.
- Polovina, J. J., Howell, E., Kobayashi, D. R. y M. P. Seki. 2001** The transition zone chlorophyll front, a dynamic global feature defining migration and forage habitat for marine resources. *Prog. Oceanogr.* 49:469-483.
- Porras-Peters, H., Aurioles, G. D., Cruz, V. y P. Koch. 2008.** Trophic level and overlap of California sea lions, *Zalophus californianus* in the Gulf of California. *Mar. Mammal Sci.* 24:554-576.
- Puppione, D. L. Kuehlthau, C. M. Jandacek, R. J. D. P. Costa. 1996.** Chylomicron triacylglycerol fatty acids in suckling northern elephant seals (*Mirounga angustirostris*) resemble the composition and the distribution of fatty acids in milk fat. *Comp. Biochem. Physiol. B Biochem. Mol. Biol.* 114:53-7.
- Rau, G. H., Mearns, A. J., Young, D. R., Olson, R. J., Schafer, H. A. e I. R. Kaplan. 1983.** Animal $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ correlates with trophic level in pelagic food webs. *Ecology.* 64:1314-1318.
- Reeves, R. R., Stewart, B. S., Clapham, P. J. y J. A. Powell. 2002.** Guide to marine mammals of the world. Alfred A. Knopf. NY. 627 pp.
- Reijnders, P., Brasseur, S., Van Der Toorn, J., Van Der Wolf, P., Boyd, I., Harwood, J., Langne D. y L. Lowry. 1994.** *Seals, fur seals, sea lions and walrus. Status survey and conservation action plan.* IUNC/SSC Seal Specialist Group, London.
- Reiter, J., Stinson, L. N. y B. J. Le Boeuf. 1978.** Northern elephant seal development: The transition from weaning to nutritional independence. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 3: 337-367.
- Reiter, J., Panken, K. J. y B. J. Le Boeuf. 1980.** Female competition and reproductive success in northern elephant seals. *Anim. Behav.* 29:670-687.
- Riedman, M. 1990.** The pinnipeds, Seals, Sea lions and Walruses. University of California Press. California E.U.A. 439 pp.
- Riofrío, L. M. 2009.** Ontogenia alimentaria del elefante marino del norte, *Mirounga angustirostris*: análisis de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en colágeno dental. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S. 105 pp.
- Rubenstein, D. R. y K. A. Hobson. 2004.** From birds to butterflies: animal movement patterns and stable isotopes. *Trends Ecology Evolution* 19, 256–263.

- Santiago, I., Silvera, K., Andrade, J. y T. Dawson. 2005.** El Uso de Isótopos Estables en Biología Tropical. *Interciencia*. 30:536-542.
- Schell, D. M., Barnett, B. A. y K. A. Vinette. 1998.** Carbon and nitrogen isotope ratios in zooplankton of the Bering, Chukchi and Beaufort Seas. *Mar. Ecol-Prog. Ser.* 162: 11-23.
- Simmons, E. S., Crocker, E. D., Kudela, M. R. y P. D. Costa. 2007.** Linking foraging behaviour of the northern elephant seal with oceanography and bathymetry at mesoscales. *Mar. Ecol-Progress Ser.* 346:265-275.
- Sinclair, E. H. 1994.** Prey of juvenile northern elephant seals (*Mirounga angustirostris*) in the southern California. *Mar. Mammal Sci.* 10:230-239.
- Stewart, B. S., Yochem, P. K., Huber, H. R., DeLong, R. L., Jameson, R. J., Sydeman, W. J., Allen S. G. y B. J. Le Boeuf. 1994.** History and present status of the Northern elephant seal population. In: Le Boeuf BJ, Laws RM (eds) Elephant Seals: Population Ecology, Behavior, and Physiology. University of California Press, Berkeley, CA. 29-48 pp.
- Thompson, P. M., Mackay, A., Tollit, D. J., Enderby, S. y P. S. Hammond. 1998.** The influence of body size and sex of the characteristics of harbor seal foraging trips. *Can. J. Zool.* 76:044-1053.
- Tieszen, L. L., Boutton, T. W., Tesdahl, K. G. y N. A. 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.
- Vander Zanden, M., Shuter, B., Lester, N. y J. Rasmussen. 1999.** Patterns of Food Chain Length in Lakes: A Stable Isotope Study. *The American Naturalist*. 154:406–416.
- Wada, E., Terazaki, M., Kabaya, Y. y T. Nemoto. 1987.** $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ abundance in the Antarctic Ocean with emphasis on the biogeochemical structure of the food web. *Deep-Sea Res.* 34: 829–841.
- Zeppelin, T. K. y A. J. Orr. 2010.** Stable isotope and scat analyses indicate diet and habitat partitioning in northern fur seals *Callorhinus ursinus* across the eastern Pacific. *Mar. Ecol-Progress Ser.* 409:241-253.
- Zhao, I. y D. Schell, 2004.** Stable isotope ratios in harbor seal *Phoca vitulina* vibrissae: effects of growth patterns on ecological records. *Mar. Ecol-Prog. Ser.* 281:267–273.