



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



CONDICIONES FISICOQUÍMICAS Y
BIOLÓGICAS QUE MODULAN LA ABUNDANCIA
DE CETÁCEOS SOBRE CUENCA ALFONSO,
GOLFO DE CALIFORNIA

TESIS

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

PRESENTA

MARIO A. PARDO

LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

JUNIO DE 2009



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

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 9 del mes de Junio del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis de grado titulada:

"CONDICIONES FISCOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS QUE MODULAN LA ABUNDANCIA DE CETÁCEOS SOBRE CUENCA ALFONSO, GOLFO DE CALIFORNIA"

Presentada por el alumno:

| | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------|---|---|---|---|---|---|
| PARDO Apellido paterno | RUEDA materno | MARIO ANDRÉS nombre(s) | Con registro: | | | | | | |
| | | | A | 0 | 7 | 0 | 3 | 3 | 0 |

Aspirante al grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

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

LA COMISION REVISORA

Director de tesis
PRIMER VOCAL

DR. NORMAN SILVERBERG

PRESIDENTE

MC. GUSTAVO DE LA CRUZ AGÜERO

SECRETARIO

DRA. AIDA MARTÍNEZ LÓPEZ

SEGUNDO VOCAL

DRA. DIANE GENDRON LANIER
2º. DIRECTOR

TERCER VOCAL

DR. ARMANDO MARTÍN JARAMILLO LEGORRETA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE



IPN
CICIMAR
DIRECCION



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

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 10 del mes Junio del año 2009, el (la) que suscribe MARIO ANDRÉS PARDO RUEDA alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS con número de registro A070330 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de: DR. NORMAN SILVERBERG y DRA. DIANE GENDRON LANIEL y cede los derechos del trabajo titulado: "CONDICIONES FISICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS QUE MODULAN LA ABUNDANCIA DE CETÁCEOS SOBRE CUENCA ALFONSO, GOLFO DE CALIFORNIA" al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

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


MARIO ANDRÉS PARDO RUEDA
nombre y firma

A mi chegus, te amo.

A luz-ma, mario-f y la chinita, los quiero mucho.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por los proyectos '*Monitoreo Ecológico Continuo de la Bahía de La Paz: Serie de Tiempo*' a cargo del Dr. Norman Silverberg del Departamento de Oceanología; y '*Abundancia, Estructura Poblacional y Reproducción de la Ballena Azul en el Golfo de California*' a cargo de la Dra. Diane Gendron del Departamento de Pesquerías y Biología Marina del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas – Instituto Politécnico Nacional (CICIMAR-IPN). Los fondos fueron otorgados en su mayor parte por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Se contó también con el apoyo del Fondo de Recuperación de Cuotas de Inscripción al Posgrado del CICIMAR-IPN, *Cetacean Society International (CSI)* y *American Cetacean Society (ACS)*. El programa de Maestría fue cursado gracias a la Beca para Estudios de Posgrado otorgada por el CONACyT y el apoyo financiero del Programa Integral de Fortalecimiento Institucional (PIFI) del IPN.

Quiero agradecer principalmente al Dr. Norman Silverberg y la Dra. Diane Gendron por aceptarme como su alumno, por su apoyo, enseñanzas, consejos y correcciones a través de este proceso. A la Dra. Aída Martínez por sus comentarios y por facilitar los datos de nutrientes, clorofila-a y penetración de la luz. Al Dr. Armando Jaramillo del Instituto Nacional de Ecología (INE) por sus invaluable comentarios y el seguimiento a la metodología de muestreo de distancias. A la Dra. Nancy Romero, por facilitar los datos de pelotillas fecales de zooplancton y por sus comentarios. A Pablo Nicolás Trucco Pignata por facilitar los datos de exopolímeros transparentes (EPT), que hacen parte de su tesis de licenciatura. Al Dr. Gustavo de la Cruz por sus enseñanzas y comentarios. Al Dr. Ricardo Palomares por su interés en este trabajo y por ayudarme a entender varios conceptos ecológicos. Al Dr. Oleg Viktorovich por su ayuda en la obtención de los datos de CTD y en la interpretación de la información física de la columna de agua. Agradezco de manera muy especial al Dr. Daniel M. Palacios por su guía y enseñanzas constantes en la obtención, procesamiento, mapeo y graficación de la información satelital en MATLAB®, así como sus valiosos

aportes al documento. Muchas gracias al Dr. Emilio Beier, quien hizo aportes importantes a la versión final de este documento. Quiero agradecer también a Raúl Díaz, por el tiempo que dedicó a explicarme algunos detalles de la organización y análisis de datos en Distance®.

El arduo pero satisfactorio trabajo de campo fue apoyado por la Dra. Diane Gendron, Azucena Ugalde, Fabiola Guerrero, Aurora Paniagua, Natalia Espino, Ernesto Moreno, Geraldine Busquets, Marisol Rueda, Raúl Díaz, Christian Ortega, Sarahí Sandoval, Nereyda Pablo, Agnes Rocha, Cristina Jiménez y Jocelyn Traconis; los capitanes Ciro Arista y Javier Álvarez y el técnico Manuel Zamarrón (CICIMAR-IPN). También prestaron su colaboración los estudiantes Olin Gonzáles, Ricardo Sarmiento y Mauricio Nájera de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS). Gracias a todos ellos por su colaboración y por compartir conmigo inolvidables jornadas en el Mar. Gracias también al personal del departamento de Oceanología del CICIMAR-IPN, quienes participaron a bordo del *B/O* Francisco de Ulloa en las labores de recuperación y liberación de la trampa de sedimentos, así como en la medición de algunos parámetros fisicoquímicos y biológicos cuyos datos fueron usados en esta tesis.

A Geraldine Busquets (mi amor), por tu compañía y apoyo, por tus comentarios sobre la tesis, por estar ahí. A Christian Salvadeo por las tertulias científicas y sus valiosas opiniones sobre el medio ambiente y los cetáceos. A Rodolfo Vögler por ser una voz de ánimo durante la etapa final de construcción de este manuscrito. A ellos dos, por compartir conmigo su entusiasmo por la Ciencia. Finalmente, muchas gracias a los amigos que tienen un lugar muy importante en mi vida acá en México, entre ellos: Milena Mercuri, Natalia Trabal, Aharon Solomons, Yadira Trejo y, por supuesto, a los cachorros: Tsunami, Benito y Orca (la chipi-chipi).

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| GLOSARIO..... | iii |
| RELACIÓN DE TABLAS..... | x |
| RELACIÓN DE FIGURAS..... | xi |
| RESUMEN..... | xiv |
| ABSTRACT..... | xv |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Vínculo entre los cetáceos y su medio..... | 1 |
| 1.2. Cuenca Alfonso y el Golfo de California..... | 2 |
| 1.3. Alcances del estudio..... | 4 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 6 |
| 3. JUSTIFICACIÓN..... | 15 |
| 4. OBJETIVOS..... | 16 |
| 4.1. Objetivo general..... | 16 |
| 4.2. Objetivos particulares..... | 16 |
| 5. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 17 |
| 5.1. Abundancia de cetáceos..... | 17 |
| 5.1.1. Muestreo de distancias..... | 17 |
| 5.1.2. Diseño de muestreo..... | 18 |
| 5.1.3. Esfuerzo..... | 20 |
| 5.1.4. Cálculo de la abundancia..... | 22 |
| 5.2. Columna de agua sobre Cuenca Alfonso..... | 28 |
| 5.2.1. Estructura física..... | 28 |
| 5.2.2. Nutrientes..... | 28 |
| 5.3. Respuesta biológica..... | 29 |
| 5.3.1. Clorofila-a..... | 29 |
| 5.3.2. Material particulado en hundimiento (MPH)..... | 30 |
| 5.4. Cuenca Alfonso en el suroeste del Golfo de California..... | 34 |
| 5.4.1. Naturaleza y origen de los datos..... | 35 |
| 5.4.2. Procesamiento de datos..... | 35 |

| | |
|---|----|
| 6. RESULTADOS..... | 37 |
| 6.1. Abundancia de cetáceos..... | 37 |
| 6.2. Columna de agua..... | 45 |
| 6.2.1. <i>Estructura física</i> | 45 |
| 6.2.2. <i>Nutrientes</i> | 51 |
| 6.3. Respuesta biológica..... | 53 |
| 6.3.1. <i>Clorofila-a</i> | 53 |
| 6.3.2. <i>Material particulado en hundimiento (MPH)</i> | 53 |
| 6.3.3. <i>Zooplankton</i> | 54 |
| 6.4. Cuenca Alfonso en el suroeste del Golfo de California..... | 57 |
| 6.4.1. <i>Clorofila-a superficial</i> | 57 |
| 6.4.2. <i>Estrés de viento superficial</i> | 60 |
| 7. ANÁLISIS..... | 62 |
| 7.1. Cambios temporales en las condiciones del hábitat..... | 62 |
| 7.1.1. <i>Mezcla</i> | 63 |
| 7.1.2. <i>Ascenso de agua en estratificación</i> | 63 |
| 7.1.3. <i>Estratificación y profundización de la capa de mezcla</i> | 66 |
| 7.2. Cuenca Alfonso como hábitat temporal para varias especies de cetáceos..... | 67 |
| 7.2.1. <i>Misticetos</i> | 68 |
| 7.2.2. <i>Odontocetos</i> | 72 |
| 7.2.3. <i>Posible estacionalidad de las relaciones observadas</i> | 75 |
| 8. CONCLUSIONES..... | 78 |
| 9. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS..... | 80 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 81 |
| ANEXOS..... | 98 |

GLOSARIO

Abundancia relativa: Número de individuos por unidad de esfuerzo de muestreo.

Ancho efectivo de banda: Distancia respecto a la línea de transecto que fue muestreada efectivamente de acuerdo con la modelación de la probabilidad de detección basada en la distribución de distancias perpendiculares para cada especie. Es igual al inverso de $f(0)$, la probabilidad de detectar objetos según la función de densidad de probabilidad evaluada a una distancia de cero.

Biovolumen: Espacio que ocupa un organismo en su medio, en unidades de volumen.

Botella Niskin: Herramienta para tomar muestras de agua a profundidades deseadas.

Capa de mezcla: Zona de la columna de agua cuya densidad es relativamente homogénea debido al efecto de la energía cinética turbulenta.

Cefalópodo (Clase: Cephalopoda): Moluscos de simetría bilateral, cabeza prominente y presencia de brazos y tentáculos. El grupo incluye a los calamares y pulpos.

Cetáceo (Orden: Cetacea): Orden de mamíferos que pasan todo su ciclo de vida en el ambiente acuático, se cuenta actualmente con más de 80 especies divididas en dos subórdenes. El suborden Mysticeti comprende las ballenas con barbas en lugar de dientes y el suborden Odontoceti son las ballenas con dientes, dentro de los que están los delfines, marsopas y ballenas picudas, entre otros.

Clorofila-a: Pigmento presente en las células de organismos capaces de llevar a cabo la fotosíntesis, como las microalgas. Está presente dentro de los cloroplastos y se considera que su concentración en el agua es proporcional (más no una medida precisa) de la biomasa fitoplanctónica.

Comunidad biológica: Conjunto de organismos de diferentes especies que se desarrollan en un ecosistema y que usualmente ocupan nichos similares.

Corriente de California: Corriente del Océano Pacífico que se mueve a lo largo de la costa oeste de Norte América, comenzando fuera de las costas de la Columbia Británica y terminando en Baja California. Hace parte del Giro del Pacífico Norte y trae consigo una surgencia extensa causada por los vientos del norte, la cual enfría aún más las capas superficiales de la corriente.

Corriente geostrófica: Corrientes gravitacionales oceánicas definidas a partir de la presunción de la existencia de un balance exacto entre la fuerza de la presión horizontal y la fuerza de Coriolis.

Criterio de Información de Akaike (CIA): Es una medida de bondad de ajuste para un modelo estadístico estimado. Se fundamenta en el concepto de la entropía, ofreciendo una medida relativa de la pérdida de información. El CIA no es una prueba de hipótesis para un modelo sino una herramienta de selección de un modelo.

CTD: Siglas de las palabras en inglés *Conductivity* (conductividad), *Temperature* (temperatura) y *Depth* (profundidad). Estas designan comúnmente al aparato usado para medir dichos parámetros a lo largo de la columna de agua, con los cuales se calcula posteriormente la salinidad y densidad. A los perfiles resultantes de dichas mediciones se les suele llamar también perfiles CTD.

Densidad poblacional: Número de organismos de una misma especie dentro de una unidad de área o volumen específica.

Diagrama T-S: Gráfica que describe la relación entre la temperatura, salinidad y densidad del agua de mar, y que por ende permite identificar la presencia de masas de agua que tienen límites establecidos en dichas propiedades.

Disco de Sechii: Herramienta usada para determinar la profundidad de penetración de la luz en la columna de agua.

Domo de Costa Rica: Giro oceánico de circulación ciclónica que se presenta en el Océano Pacífico, frente a las costas de Centro América. Su dimensión y estabilidad estacional lo hacen un hábitat importante para algunas especies de cetáceos y aves marinas.

El Niño (Oscilación del Sur El Niño): Evento climático erráticamente cíclico que consiste en un cambio en los patrones de movimiento de las masas de aire provocando un retraso en la cinética de las corrientes marinas, lo cual desencadena un calentamiento y profundización de la capa de mezcla en el Pacífico Este.

Ensamblaje: Conjunto de especies pertenecientes a un grupo taxonómico común en un área determinada.

Espectro trófico: Variedad de presas que consume un depredador.

Espectrofotometría: Método de análisis óptico que compara la radiación absorbida y transmitida por una solución con una cantidad desconocida de soluto con respecto a otra con una cantidad conocida.

Estratificación: Condición heterogénea de la densidad en la columna de agua, en la que se pueden distinguir gradientes de densidad marcados.

Estrés de viento superficial: Fuerza tangencial ejercida sobre la superficie del mar por la capa de aire adyacente en movimiento. La producción de olas sobre la superficie del mar es una manifestación del estrés del viento. La NOAA produce el estrés de viento a partir de la velocidad del viento siguiendo los algoritmos desarrollados por Smith (1988), por lo cual sus unidades son de velocidad.

Eufáusidos (Orden: Euphausiacea): También llamados *krill*. Crustáceos marinos pertenecientes al mesozooplankton, muy importantes en la red trófica, particularmente como presas de ballenas, mantarrayas, tiburones ballena, focas cangrejas, etc.

Eutrofia: Estado de alta disponibilidad de nutrientes en un ecosistema. También denota el incremento resultante de la producción primaria de dicho ecosistema y sus subsecuentes efectos.

Exopolímeros transparentes (EPT): Polímeros naturales, exudados como productos de deshecho, principalmente por bacterias y fitoplancton. Estos agregados se unen entre sí y adhieren partículas en hundimiento, constituyendo un componente muy importante que cohesiona la nieve marina.

Frente oceánico: Zona en la superficie del mar donde se produce el encuentro entre dos tipos de agua o corrientes con diferente origen, temperatura o salinidad.

Giro oceánico: Movimiento circular por el efecto de Coriolis cuyas causas son diversas: vientos, topografía, corrientes, etc.

Gradiente ambiental: Cambio unidireccional en una variable física del medio entre dos lugares geográficos (e.g. temperatura, salinidad, profundidad, etc.).

Hábitat: Ambiente que ocupa una población biológica, que reúne las características para que esta desarrolle sus actividades vitales.

Homeotermia: Proceso mediante el cual algunos seres vivos (homeotermos) mantienen su temperatura corporal dentro de unos límites, independientemente de la temperatura ambiental, consumiendo energía química procedente de los alimentos.

Ictiófago: Que come peces.

Isóbata: Línea curva que une los puntos de igual profundidad en el océano.

Masa de agua: Es un cuerpo de agua identificable por sus propiedades físicas distintivas del agua circundante. Estas propiedades incluyen la temperatura, salinidad y razones isotópicas.

Material particulado en hundimiento: Partículas en hundimiento a lo largo de la columna de agua, cuyo diámetro es menor a $0.2\mu\text{m}$.

Material particulado: Material presente en el agua cuyo tamaño de partícula es menor a $0.2\mu\text{m}$. Si este material es de origen orgánico se denomina Material Orgánico Particulado (MOP).

Mesozooplankton: Organismos pertenecientes al zooplankton cuyo tamaño se encuentra entre 0.2 y 2mm.

Mezcla: Condición física de la columna de agua en la cual la densidad es relativamente homogénea a lo largo de esta.

Mictófidis (Familia Myctophidae): También llamados peces linterna, son peces mesopelágicos que constituyen alrededor del 65% de la biomasa de peces en el mar.

Tienen un cuerpo generalmente comprimido. Algunas especies presentan órganos bioluminiscentes.

Misticetos (Suborden Mysticeti): Cetáceos con barbas en lugar de dientes y dos orificios nasales exteriores como principales características diagnósticas.

Monzón: Viento de prevalencia estacional que dura varios meses.

Muestreo de distancias: Tipo de metodología estadística diseñada para calcular la densidad principalmente de animales en diversos ambientes. Se basa en el hecho de que la probabilidad de detectar los animales decrece conforme más lejos se hallen estos del observador. Es así que un conjunto de distancias medidas sirve para modelar dicha probabilidad de detección, lo que a su vez permite estimar el número de animales no detectados y, por ende, un estimado del total de animales en el área muestreada.

Nicho ecológico: Papel que desempeña una especie o población dentro de un ecosistema.

Nivel trófico: Posición relativa de un organismo dentro de la red trófica de un ecosistema, basado en su relación energética con los demás organismos.

Odontocetos (Suborden Odontoceti): Cetáceos con dientes homodontos, un solo orificio nasal exterior y presencia de melon como principales características diagnósticas.

Oligotrofia: Estado de un ecosistema en el cual hay baja disponibilidad de nutrientes y una consecuentemente baja producción primaria.

Ópalo (Sílice biogénico): Químicamente es sílice hidratado ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Las diatomeas extraen sílice del agua y lo usan como componente de sus frústulas, así como algunos radiolarios y esponjas.

Pelágicos menores: Nombre genérico para algunos peces pequeños que se mueven en grandes bancos en la zona pelágica como la sardina, arenques y la anchoveta, entre otros.

Pelotillas fecales: La excreta de invertebrados marinos, principalmente zooplancton. La mayoría están cubiertas de un material mucoso fino que también contiene partículas de calcina. Debido a esto, las pelotillas se hunden rápidamente, incluso $100 \text{ ó } 200\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$. Su descomposición es relativamente lenta y representan en algunas zonas la mayoría del material en hundimiento.

Plancton: Organismos que por su pequeño tamaño y limitadas capacidades natatorias, se encuentran a merced del movimiento del agua. La parte animal de este grupo se denomina zooplancton y la parte de carácter vegetal se denomina fitoplancton.

Población: Conjunto de organismos de la misma especie que coexisten en un espacio y tiempo determinado y que por ende, tienen una gran cohesión reproductiva y ecológica.

Producción primaria: Cantidad de carbono orgánico producido en la fotosíntesis en un área determinada.

Productividad primaria: Tasa de producción de carbono orgánico por la fotosíntesis en un área determinada.

Productividad secundaria: Tasa de producción de carbono por el zooplancton en un área determinada.

Prospección: En el presente trabajo, se refiere a cada salida que involucra la logística destinada a un muestreo en particular. Mejor traducción al español encontrada para el término *survey*, que se usa en inglés para nombrar dicha actividad.

Radiolarios: Protozoos ameboideos que producen esqueletos minerales intrincados de sílice.

Rasgos oceánicos: Fenómenos físicos que se presentan en el océano y que por sus características tienen importancia biológica. Entre estos se encuentran los frentes, giros y surgencias.

Red trófica: Conjunto de relaciones alimentarias entre especies dentro de un ecosistema.

Sigma-t (δ -t): Medida que describe la densidad potencial del agua de mar con base en su temperatura y salinidad.

Sucesión: La evolución natural que se produce en un ecosistema por su propia dinámica interna. El término se refiere en su aspecto esencial a la sustitución de unas especies por otras.

Surgencia: Ascenso de agua profunda hacia las capas superficiales por acción de los vientos.

Talud: Porción de fondo oceánico que se extiende a partir de la plataforma continental.

Termoclina: Gradiente de temperatura a lo largo de la columna de agua.

Teutófago: Que se alimenta de calamar.

Trampa de sedimentos: Aparato usado para recolectar el material particulado en hundimiento. La trampa puede ser fija (anclada al fondo) o móvil.

Transecto lineal: Una de las modalidades empleadas en el muestreo de distancias. Los observadores cubren el área de interés en un arreglo de líneas rectas. A cada lado de estas son buscados los animales. También existen los transectos en banda, que tienen un área de búsqueda delimitada desde el comienzo, y los transectos de punto, alrededor del cual se hace la búsqueda.

UPS (Unidades Prácticas de Salinidad): Medida de la concentración de sales disueltas en el agua en términos de conductividad.

Varamiento: Evento en el que un mamífero marino se encuentra sobre la playa o confinado a aguas muy someras, de manera que no pueda liberarse por sus propios medios.

Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT): Cinturón de baja presión alrededor de la región ecuatorial del planeta. Está formado por la convergencia de aire cálido y húmedo de latitudes por encima y debajo del Ecuador. El aire es empujado a la ZCIT por la acción de la celda de Hadley, un rasgo atmosférico de mesoescala que hace parte del sistema planetario de distribución del calor y la humedad.

RELACIÓN DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Detalles del esfuerzo. El número corresponde a las prospecciones en la Figura 3. (*)denota los cruceros sumados para el análisis por su bajo esfuerzo..... | 22 |
| Tabla 2. Valores de peso usados para la conversión de densidades y medidas de variación estimadas (de individuos a toneladas). Tomados de Reeves <i>et al.</i> (2002)..... | 27 |
| Tabla 3. Fechas de muestreo para los parámetros fisicoquímicos y biológicos en la columna de agua..... | 29 |
| Tabla 4. Especies de cetáceos registradas. Los valores en paréntesis corresponden a la desviación estándar del tamaño grupal..... | 37 |
| Tabla 5. Parámetros hallados a partir del cálculo de $g(x)$. w es la distancia de truncado <i>a priori</i> ; $f(0)$ es el valor de probabilidad de densidad de distancias; AEB es el ancho efectivo de banda y %CV es el porcentaje de coeficiente de variación para las estimaciones. Se nombran las funciones y series de expansión usadas para cada especie..... | 41 |

RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 1.** Área de estudio. Topografía (1km² de resolución) de la base STRM30+V.6.0 de *Scripps Institution of Oceanography* (Becker *et al.*, *en prensa*; Farr *et al.*, 2007; Sandwell y Smith, 2009).....4
- Figura 2.** Plataforma de observación: CICIMAR XV. A la izquierda se muestra la altura visual efectiva calculada. Las posiciones 1 y 2 representan al capitán y apuntador. Las posiciones 3 y 4 corresponden a los observadores.....19
- Figura 3.** Esfuerzo de muestreo. Cada mapa corresponde a un crucero. Las fechas de prospección se muestran en la esquina inferior izquierda.....21
- Figura 4.** Mediciones para el cálculo de la distancia perpendicular entre el transecto y el avistamiento. a) Cálculo del ángulo de avistamiento (λ) suponiendo un rumbo de la embarcación de 20°. li es la longitud del transecto (i), r es la distancia radial y x la perpendicular. b) Campo visual en los binoculares con una caída angular (θ) de 50mils y una posición de 350°.....24
- Figura 5.** Esquema de la trampa de sedimento. Los objetos no están a escala.....32
- Figura 6.** Cuadrantes escogidos para el análisis de la concertación de Cla-S (escala colorimétrica). Se ejemplifica la dirección e intensidad relativa de la corriente geostrofica (flechas negras) y el estrés superficial de viento (flechas grises).....36
- Figura 7.** Distribución geográfica de los avistamientos durante el periodo de estudio.....38
- Figura 8.** Funciones de probabilidad de detección ($g(x)$; línea negra). w es la distancia de truncado.....40
- Figura 9.** Biomasa de los cetáceos más frecuentes sobre Cuenca Alfonso. Las áreas sombreadas en gris representan el intervalo de confianza de la densidad con un 95% de confiabilidad. (●) representa el valor puntual de la estimación. Se indican las condiciones predominantes de la columna de agua (Capítulo 6.2.1): mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC).....43

| | |
|--|----|
| Figura 10. Abundancia relativa de las especies menos frecuentes. Se indican las condiciones predominantes de la columna de agua (Capítulo 6.2.1): mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC)..... | 44 |
| Figura 11. Perfiles de temperatura y salinidad sobre Cuenca Alfonso (Feb/07-Feb/08)..... | 46 |
| Figura 12. Estructura física temporal de la columna de agua. Se indican las condiciones predominantes: mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC). Se indican la profundidad de la capa de mezcla (límite superior de la termoclina; asterisco) y las fechas de muestreo (▼)..... | 49 |
| Figura 13. Diagrama T-S. Masas de agua presentes durante las condiciones dominantes en la estructura de la columna de agua. AStS: Agua Sub-tropical Superficial, AGC: Agua del Golfo de California, AESs: Agua Ecuatorial Sub-superficial, AES: Agua Ecuatorial Superficial, ASA: Agua Sub-Ártica..... | 50 |
| Figura 14. Patrón temporal de la penetración de la luz sobre Cuenca Alfonso. En la parte superior se encuentran las condiciones dominantes de la columna de agua: mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC). Se indican las profundidades de los niveles de penetración (asteriscos grises) y las fechas de muestreo (▼)..... | 51 |
| Figura 15. Concentración de nutrientes en la columna de agua. En la parte superior se encuentran las condiciones físicas dominantes: mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC). Se indican las profundidades de las muestras (puntos grises), fechas de muestreo (▼) y la profundidad de la capa de mezcla (asteriscos negros)..... | 52 |
| Figura 16. Concentración de Clorofila-a en la columna de agua. En la parte superior se encuentran las condiciones físicas dominantes: mezcla (MZ), estratificación (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC). Se indica la profundidad de las muestras (puntos grises), la profundidad de la capa de mezcla (asteriscos negros) y las fechas de los muestreos (▼)..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 17. Material particulado en hundimiento. Se presenta el flujo total de material, su porción litogénica y biogénica. Basado en el flujo de MBP, se muestran las proporciones de ópalo, carbonato de calcio, carbono total, orgánico e inorgánico. En la parte superior se muestran las condiciones e la estructura física de la columna de agua..... | 55 |
| Figura 18. Flujo de pelotillas fecales de diferentes diámetros (\emptyset) sobre Cuenca Alfonso. Los recuadros superiores indican las condiciones físicas dominantes en la estructura física de la columna de agua..... | 56 |
| Figura 19. Biovolumen de eufáusidos sobre Cuenca Alfonso. Se muestran los valores para dos tamaños de poro de red y el total..... | 57 |
| Figura 20. Concentración relativa de clorofila-a superficial en tres zonas del suroeste del Golfo de California. Las categorías en la escala son relativas al rango de valores de la variable en cada periodo. En la parte superior se muestran las condiciones físicas de la columna de agua sobre la Cuenca..... | 58 |
| Figura 21. Condiciones generales de concentración de Cla-S al suroeste del Golfo de California. Se muestra el estrés de viento superficial (flechas grises) y la dirección e intensidad de la corriente geostrófica (flechas negras). Ver explicación de cada condición (a, b, c y d) en el texto..... | 60 |
| Figura 22. Estrés de viento superficial en el sur del Golfo de California. Los datos corresponden a medias semanales móviles. Se muestra en la parte superior las condiciones físicas predominantes en la columna de agua sobre Cuenca Alfonso. Los valores negativos corresponden a vientos del norte y los positivos del sur..... | 61 |
| Figura 23. Biomasa de cetáceos predominantemente zooplanctívoros (<i>B. musculus</i> y <i>B. physalus</i>), ictiófagos (<i>B. edeni</i> y <i>D. spp</i>) y teutófagos (<i>G. macrorhynchus</i> y <i>T. truncatus</i>)..... | 76 |
| Figura 24. Promedio mensual de clorofila-a superficial sobre Cuenca Alfonso de 1997 a 2007. Cada punto corresponde al último día del mes. El área en gris representa el rango de la desviación estándar espacial. Se muestran los puntos de muestreo en el mapa superior..... | 77 |

RESUMEN

Los cetáceos ocupan diferentes hábitats de acuerdo a sus requerimientos alimentarios y fisiológicos. Comprender los mecanismos ambientales que regulan su abundancia es esencial para evaluar el efecto de los cambios climáticos sobre sus poblaciones. Se analizó la relación temporal entre la abundancia de cetáceos y los cambios del hábitat sobre Cuenca Alfonso a partir de parámetros fisicoquímicos y biológicos durante un ciclo anual. La abundancia de 11 especies fue estimada mensualmente mediante muestreo de distancias en transecto lineal. Se registraron 306 avistamientos en 18 prospecciones. El contexto regional de la Cuenca dentro del suroeste del Golfo de California se analizó mediante el seguimiento satelital a la clorofila-a superficial y estrés de viento superficial. La estructura físico-química de la columna de agua se determinó mediante perfiles de CTD, medición de nutrientes y clorofila-a. Con una trampa de sedimentos fija se analizaron los flujos de material particulado en hundimiento y sus contenidos de carbono, sílice biogénico, carbonato de calcio, exopolímeros transparentes y pelotillas fecales de zooplancton. Los resultados sugieren tres escenarios ambientales bien definidos: dos periodos de mezcla (MZ) con alta clorofila-a a lo largo de la columna de agua y baja temperatura; dos periodos de estratificación con capa de mezcla profunda (ESN), baja clorofila-a y altas temperaturas superficiales; y un periodo de ascenso de agua profunda en condiciones estratificadas (ASC), con picos sub-superficiales de clorofila-a e inyección de agua fría a las capas superficiales. Este patrón es consecuente con la concentración de nutrientes, la proporción entre fitoplancton silíceo y calcáreo, y el flujo de pelotillas fecales de zooplancton. El sector de la Bahía de La Paz fue en general más rico en biomasa fitoplanctónica que el resto de la costa oeste del Golfo, especialmente durante los periodos de mezcla y ascenso. Esta sucesión ambiental parece modular la segregación temporal de las especies de cetáceos más abundantes. Los rorcuales azules dominaron los periodos de mezcla y surgencia, los rorcuales comunes fueron más abundantes en condiciones estratificadas y los rorcuales tropicales se presentaron en todos los periodos con biomasa bajas. En los odontocetos, los delfines comunes alcanzaron esporádicamente la mayor biomasa durante un periodo de mezcla pero se presentaron todo el año, los tursiones fueron más abundantes durante el ascenso de agua profunda e inicio de la estratificación, y los calderones sólo se presentaron en condiciones estratificadas. Esta heterogeneidad ambiental parece promover una disponibilidad estacional de presas que sustentan de forma sucesiva a cetáceos zooplanctófagos, ictiófagos, generalistas y teutófagos durante un ciclo anual.

ABSTRACT

Cetaceans occupy different habitats depending on their feeding and physiological needs. Understanding the environmental mechanisms underlying their abundance is essential to evaluate the potential effect of climate change on populations. We analyzed the relationship between cetacean abundance and habitat changes on Cuenca Alfonso based on physicochemical and biological parameters during an annual cycle. The abundance of eleven species was monthly estimated using line transect distance sampling techniques. 306 sightings were recorded in 18 surveys. The regional context of Cuenca Alfonso within the Southwestern Gulf of California was analyzed throughout satellite measurements of chlorophyll-*a* and surface wind stress. The physicochemical structure of the water column was determined through CTD profiles, nutrient, and chlorophyll-*a* measurements. Time series of sinking particulate matter flux, carbon, biogenic silica, calcium carbonate, transparent exopolymers, and zooplankton fecal pellets were characterized using fixed sediment trap. Our results suggest three well defined environmental scenarios: two mixing periods (MZ) with high chlorophyll-*a* along the water column and low temperatures; two stratified periods with deep mixing layer (ESN), low chlorophyll-*a*, and high surface temperatures; and one period with deep water upwelling (ASC), sub-surface chlorophyll-*a* peaks, and low water temperature near the surface layers. This pattern is consistent with nutrient concentrations, the proportion between siliceous and calcareous phytoplankton, and fecal pellets fluxes. The Bay of La Paz was generally richer in phytoplankton biomass compared with the rest of the southwestern coast of the Gulf, especially during mixing and upwelling conditions. This environmental succession seems to modulate the temporal segregation of the most abundant cetaceans. Blue whales dominated under mixing and upwelling periods, fin whales were more abundant during stratified conditions, and Bryde's whales occurred in all periods with low biomasses. In the odontocetes, common dolphins contributed with the highest biomass during a mixing period, but they were present year-round in lower biomasses; bottlenose dolphins were abundant during upwelling and early stratification, and short-finned pilot whales occurred only under the most strong stratification period. The environmental heterogeneity of Cuenca Alfonso seems to promote seasonal prey availability which supports zooplanktophagous, ichtiophagous, generalists, and teuthophagous cetaceans during an annual cycle.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Vínculo entre los cetáceos y su medio

En el Golfo de California (en adelante 'Golfo'), se han registrado 30 especies de cetáceos (Orden: Cetacea): siete mysticetos (ballenas y rorcuales) y 23 odontocetos (delfines, marsopas, cachalotes y sifios) (Guerrero-Ruiz *et al.*, 2006). Aunque en general se les considera como depredadores, existe una gran variabilidad interespecífica en sus requerimientos ecológicos, que se refleja en diferentes tipos de presa, estrategias de alimentación, comportamientos, tamaños corporales y grupales, rangos de distribución, entre otros (Brodie, 1975; Bowen, 1997; Pauly *et al.*, 1998; Barlow *et al.*, 2008). Estas características ocasionan que cada especie ocupe un nicho ecológico particular. No obstante, otras necesidades biológicas y fisiológicas son comunes a todo el orden debido a su proceso adaptativo al medio y los recursos disponibles. Por ejemplo, siendo animales homeotermos en un medio en el que se pierde calor rápidamente, los cetáceos experimentan un alto gasto metabólico para mantener su temperatura interna (Hind y Gurney, 1997; Williams *et al.*, 1999). Así mismo, la mayoría se alimenta de animales muy móviles y/o que se encuentran en lugares profundos, lo cual supone una considerable inversión de energía en la natación y el buceo (Noren *et al.*, 1999; Williams, 1999; Fish, 2000). Esto hace que los cetáceos requieran una disponibilidad estable de alimento y que tiendan a distribuirse en zonas de alta producción biológica, donde encuentran grandes agregaciones de sus presas. Éstas varían con el espectro trófico de las especies de cetáceos, sin embargo, tienen especial importancia algunos tipos de mesozooplankton (e.g. eufáusidos y copépodos), pelágicos menores (e.g. sardina y anchoveta) y cefalópodos (algunas familias de calamares) (Pauly *et al.*, 1998). Las presas a su vez, son afines a condiciones ambientales de diferente naturaleza. Sin embargo, una alta ingesta de alimento no es la única necesidad importante que puede influir sobre la distribución de los cetáceos. Varias especies escogen hábitats con características particulares para reproducirse. Algunos mysticetos como el rorcual azul (*Balaenoptera musculus*) y el rorcual jorobado (*Megaptera novaeangliae*) realizan estacionalmente largas migraciones latitudinales hacia zonas de aguas más

cálidas para tener sus crías (Baker *et al.*, 1986; Gendron, 2002), aunque algunas continúan alimentándose incluso durante esta etapa (Gendron, 1990; Gendron y Urbán, 1993).

Dada esta variabilidad de requerimientos, se espera que la presencia y dominancia de las especies tengan un vínculo particular con las condiciones predominantes del hábitat. Estas, como se ha descrito, influirían potencialmente sobre la oferta de sus presas, o bien, proporcionarían un ambiente adecuado para el desarrollo de otras actividades vitales. Estudios previos han registrado una relación entre la distribución espacial de algunas especies con respecto a procesos oceánicos como frentes (Mendes *et al.*, 2002; Doniol-Valcroze *et al.*, 2007), surgencias (Croll *et al.*, 2005) y giros (Springer *et al.*, 1999; Fiedler *et al.*, 2002). Esta relación puede modificarse en función al nivel trófico y preferencias de hábitat de sus presas principales (e.g. Tynan *et al.*, 2005). Así mismo, la dinámica estacional propia del hábitat ha probado estar involucrada en la distribución y sucesión de algunas especies de cetáceos (Reilly *et al.*, 1990; Forney y Barlow, 1998), pero es difícil discernir entre los mecanismos fisicoquímicos y biológicos que modulan dichas relaciones (Ballance *et al.*, 2006). Esto se debe principalmente a la dificultad logística que involucra el seguimiento a diferentes tipos de factores ambientales junto con estimaciones de abundancia de cetáceos, por lo cual, cobra especial importancia el trabajo interdisciplinario. Gracias al esfuerzo conjunto de los departamentos de Oceanología, Pesquerías y Biología Marina y Plancton y Ecología Marina del CICIMAR-IPN, este estudio reunió la información necesaria para interpretar los mayores cambios ambientales en relación con el comportamiento de la abundancia de cetáceos durante un ciclo anual.

1.2. Cuenca Alfonso y el Golfo de California

El Golfo de California es una cuenca oceánica semicerrada, de unos 1130km de largo y entre 80 y 209km de ancho. Sus profundidades varían entre los 20m en el área del Alto Golfo y los 3600m al sur, en la boca. En la mayoría del Golfo, especialmente hacia el norte, se mantienen en suspensión grandes cantidades de sedimento gracias a fuertes corrientes resultantes de una variación mareal muy

amplia (Lluch-Cota *et al.*, 2007). La circulación estacional interna está dominada en orden de importancia por la influencia del Océano Pacífico (especialmente al sur), el patrón de vientos sobre la superficie del mar y el intercambio de calor entre el aire y el mar (Beier, 1999; Marinone, 2003). La mayoría del flujo de agua que entra en el Golfo se ubica hacia su costado oriental, mientras que el de salida se localiza al occidente (Collins *et al.*, 1997; Palacios-Hernández *et al.*, 2002; Mascarenhas Jr. *et al.*, 2004). La influencia atmosférica es fuertemente estacional: vientos débiles del sureste soplan en verano y vientos fuertes del noroeste soplan en invierno. Esta circulación en el eje longitudinal del Golfo se debe principalmente a las elevaciones topográficas a ambos costados de esta cuenca (Badan-Dangon *et al.*, 1991). Sin embargo, existen evidencias de que dicho patrón monzónico, modulado por el ascenso y descenso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), no es homogéneo espacialmente y no posee exactamente un armónico anual (Marinone *et al.*, 2003).

La Bahía de La Paz (en adelante la Bahía) es el cuerpo de agua costero más grande y profundo del Golfo de California y se encuentra ubicada al suroeste. Su conexión con el Golfo ocurre a través de dos aberturas, la Boca Norte y el Canal San Lorenzo hacia el sur. Sin embargo, este último es muy somero y estrecho, por lo cual la mayoría del intercambio de agua se da a través de la Boca Norte (Obeso-Nieblas *et al.*, 2008). En invierno se presenta una capa de mezcla profunda cuando soplan fuertes vientos del noroeste, mientras que en verano existe una estratificación térmica de la capa superficial asociada con el aumento en la irradiación solar y vientos débiles del sur con periodos frecuentes de calma (Jiménez-Illescas *et al.*, 1994). La Cuenca Alfonso (en adelante la Cuenca) es una depresión pelágico-costera que conforma la parte más profunda de la Bahía. Su profundidad máxima alcanza los 410m y cubre un área de aproximadamente 1000km² dentro de la isóbata de los 100m (Figura 1). La cantidad de especies de cetáceos que la frecuentan, junto a la facilidad de acceso y una logística ya desarrollada para su monitoreo ambiental, hacen de este un hábitat ideal para indagar la respuesta de los cetáceos a las condiciones ambientales dominantes.

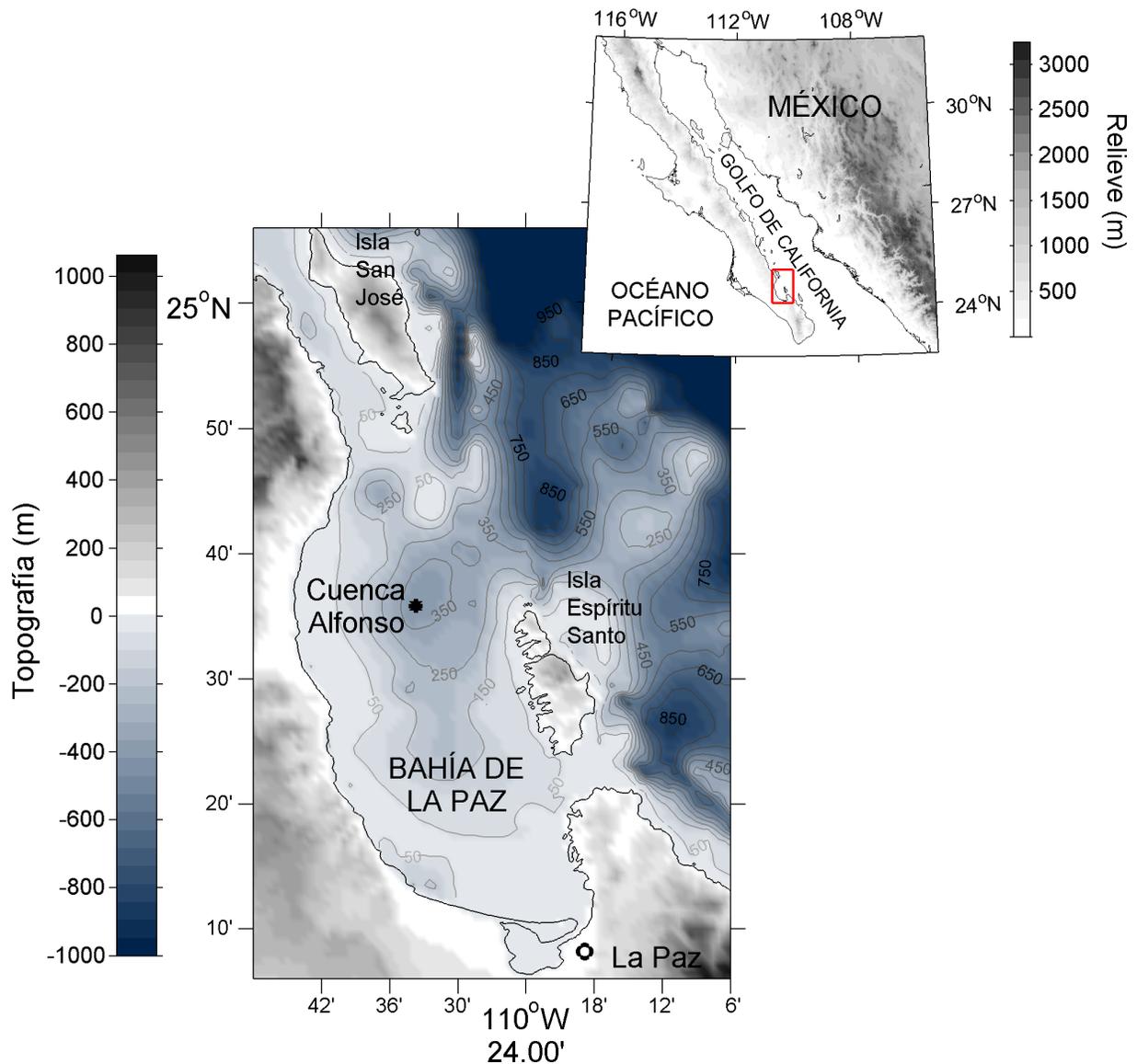


Figura 1. Área de estudio. Topografía en metros (1km² de resolución) de la base STRM30+V.6.0 de *Scripps Institution of Oceanography* (Becker *et al.*, *en prensa*; Farr *et al.*, 2007; Sandwell y Smith, 2009).

1.3. Alcances del estudio

Este estudio se basa en un monitoreo del hábitat de la Cuenca sobre su punto más profundo, a partir del análisis temporal de material particulado en hundimiento (MPH) y la estructura fisicoquímica y biológica de la columna de agua. Esta dinámica temporal se enmarcó dentro del contexto regional de la Bahía con respecto al

suroeste del Golfo, para lo cual se hizo un análisis espacio-temporal de clorofila-a superficial, estrés de viento superficial y corriente geostrofica a partir de información satelital. Este análisis multidisciplinario permitió interpretar el escenario ambiental bajo el cual se presentan algunas especies de cetáceos, cuyas abundancias fueron monitoreadas a través de prospecciones mensuales. Se encontró una estacionalidad marcada en las condiciones del hábitat coherente con el comportamiento de la abundancia y dominancia entre las especies más frecuentes. Las condiciones detectadas pueden estar modulando la disponibilidad de diferentes tipos de presa a lo largo del año de acuerdo con los requerimientos alimentarios conocidos para las especies de cetáceos dominantes.

El trabajo de tesis se enmarcó dentro del proyecto '*Monitoreo ecológico continuo de la Bahía de La Paz: Serie de tiempo*' a cargo del Dr. Norman Silverberg; cuyo objetivo es interpretar el contexto ecológico bajo el cual se comporta la Bahía en el tiempo a partir del seguimiento a algunos indicadores físicos, químicos y biológicos, así como el análisis de material particulado en hundimiento. El trabajo asociado con el seguimiento a la abundancia de cetáceos se hizo en colaboración con el proyecto '*Abundancia, Estructura Poblacional y Reproducción de la Ballena Azul en el Golfo de California*', a cargo de la Dra. Diane Gendron. Mediante esta colaboración se buscó aportar información sobre el papel de los cetáceos dentro de la dinámica ecológica temporal de la Cuenca, así como evaluar si su presencia es indicadora de las condiciones ambientales dominantes.

2. ANTECEDENTES

La relación entre los cetáceos y su ambiente físico, químico y biológico ha llevado incluso a la afirmación de que ciertos cambios en sus rangos de distribución, patrones de migración, áreas de alimentación, entre otros; pueden ser indicadores del cambio climático asociado al calentamiento global. Recientemente, Moore (2008) argumentó que dichos cambios afectan indudablemente a especies en las que se han registrado dichas variaciones. Por ejemplo, el retraso en la migración hacia el sur de las ballenas grises (*Eschrichtius robustus*) y la expansión de sus zonas de alimentación hacia el norte. También se ha sugerido que los cambios interanuales y decadales podrían afectar la distribución histórica de las poblaciones y, por ende, modificar la diversidad de cetáceos en diferentes hábitats. Whitehead *et al.* (2008) modelaron la respuesta de la diversidad de cetáceos a un calentamiento progresivo del agua del mar en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico. Sus resultados sugieren un potencial decremento de la diversidad en latitudes bajas y un incremento en latitudes altas. Sin embargo, resulta muy difícil generalizar sobre la respuesta de los cetáceos ante una variación climática de orden global, debido a la escasez de información sobre los requerimientos de hábitat para muchas especies y lo heterogénea que puede ser esta respuesta entre áreas cuya dinámica oceanográfica es muy diferente.

Recientemente, Ballance *et al.* (2006) revisaron la importancia de algunas condiciones oceanográficas para los cetáceos en el Pacífico Oriental Tropical: Mientras que el Domo de Costa Rica, un giro ciclónico espacialmente estable, es muy importante para la agregación de rorcuales azules y delfines comunes de hocico corto (*Delphinus delphis*), las grandes manadas de delfines manchados (*Stenella attenuata*) y rotadores (*Stenella longirostris*) están distribuidas en áreas limitadas al parecer por la profundidad de la termoclina permanente, por lo cual sus rangos de distribución son más estables. Sin embargo, es claro que los mecanismos que modulan las relaciones entre el hábitat y las especies, particularmente las tropicales, aún no son bien entendidos, en contraste con ciertos hábitats de latitudes altas.

A pesar de la complejidad en los patrones estacionales e interanuales de esta parte del Océano Pacífico, la relación entre las especies de cetáceos con las condiciones del medio parece permanecer estable en el tiempo, de manera que los patrones de distribución varían en función de las fluctuaciones en dichas condiciones, al menos para las especies mejor estudiadas como las mencionadas anteriormente. Sin embargo, estas relaciones están lejos de ser simples; no se limitan a una agregación temporal del alimento, sino que involucran otros procesos como la migración y la reproducción, así como la preferencia por ciertas áreas que pueden modificarse tanto en espacio como en tiempo. En muchos casos, la relación no se da con un rasgo oceánico particular, sino con la combinación de diversas condiciones a lo largo de complejos gradientes ambientales. Sin embargo, la variación estacional en la distribución y agregación de los animales ha probado responder, entre otras cosas, a la presencia de estructuras de mesoescala como frentes, giros y surgencias.

Springer *et al.* (1999), estudiaron la importancia de los giros subárticos (este y oeste) en cuanto a los patrones de distribución de varias especies de mamíferos marinos y aves. La presencia de estos giros parece beneficiar la agregación de presas potenciales como mictófidios, parpadas y jureles. Su disponibilidad también afecta la agregación de calamares y por ende, determina la presencia de teutófagos como las marsopas de Dall (*Phocoenoides dalli*) y cachalotes machos (*Physeter macrocephalus*), que se alimentan en estas latitudes durante la primavera y el verano. La acción física de estos giros crea una acumulación de biomasa, especialmente de zooplancton, por lo cual, también determinan la distribución de las grandes ballenas que se alimentan de eufáusidos y copépodos. Doniol-Valcroze *et al.* (2007) demostraron que la ubicación espacial de tres especies de rorcuales está relacionada con los frentes oceánicos en el Golfo de San Lorenzo, Canadá, en función del nivel trófico del que se alimentan. Así, los rorcuales azules, que son estenófagos y se alimentan exclusivamente de eufáusidos, se ubican más cerca de los frentes, comparado con los rorcuales jorobados y comunes (*Balaenoptera physalus*), quienes pueden alimentarse de eufáusidos y peces. Los rorcuales minke

(*Balaenoptera acutorostrata*) por su parte, que se alimentan preferiblemente de pelágicos menores, se ubican más lejos de los frentes.

Uno de los procesos importantes en la asociación espacial de los cetáceos con rasgos oceánicos involucra a aquellas especies altamente móviles que exhiben grandes migraciones, como el rorcual azul. Éstas tienen una alta probabilidad de encontrarse en su camino con rasgos oceanográficos de alta producción, como los frentes. Etnoyer *et al.* (2006) probaron mediante el uso de marcación satelital, que los rorcuales azules invierten más tiempo moviéndose erráticamente a lo largo de gradientes térmicos muy sutiles fuera de las costas de Baja California, a pesar de que dichos frentes no parecían ser muy productivos biológicamente. Estos resultados sugieren que los cetáceos son altamente sensibles a cambios en la temperatura y que pueden usar esto para buscar zonas donde los gradientes podrían indicarles la agregación de sus presas.

Además de la evidente relación espacial de los cetáceos con estas estructuras, existe una dinámica temporal compleja que involucra diversos procesos físicos y respuestas biológicas que afectan la presencia de cetáceos en diversos ambientes. Los pulsos de surgencia ejemplifican este tipo de dinámica. Uno de los hábitats reconocidos como más importantes a nivel global para los cetáceos es el sistema de la Corriente de California, especialmente durante primavera y verano. En esta zona, las más altas demandas de presas son exhibidas por el rorcual azul, que se alimenta de eufáusidos. Debido a esto, sus zonas de alimentación están influenciadas por sistemas muy productivos, como la surgencia de California. Croll *et al.* (2005) examinaron las condiciones bajo las que se presenta esta especie durante la temporada de alimentación. El aumento de su número está ligado a la intensificación estacional de las condiciones de surgencia, que favorecen una alta concentración de clorofila-*a* y la agregación de eufáusidos. Esto concuerda con lo observado por Gendron (2002), quien realizó un análisis espacio-temporal de la abundancia de rorcuales azules dentro y fuera del Golfo de California, observando que la incursión

de la especie al Golfo parece estar directamente relacionada con la presencia de surgencias, altas concentraciones de clorofila-a y elevadas biomásas de eufáusidos.

Incluso los varamientos de cetáceos pueden ser un indicador de la dinámica ecológica. Mercuri (2007) modeló la temporalidad de los varamientos de mamíferos marinos en Isla Magdalena (Pacífico mexicano), encontrando que estos se presentan en función de los pulsos estacionales de producción en el medio, modulados por el fortalecimiento de la surgencia frente al lugar de los varamientos. Estas relaciones con las condiciones ambientales del hábitat no siempre obedecen a procesos instantáneos, sino a aquellos con una duración y dimensión adecuada para la agregación de las presas. En el Mediterráneo, un área con variabilidad oceanográfica muy alta, Panigada *et al.* (2008) observaron que la distribución tanto del rorcual común como de los delfines listados (*Stenella coeruleoalba*) está ligada a la disponibilidad de su presa (eufáusidos, cefalópodos y peces mesopelágicos, respectivamente) más que a la presencia de condiciones ambientales específicas. En esta misma zona, Littaye *et al.* (2004) encontraron que los movimientos y tamaños grupales de rorcuales comunes están directamente relacionados con la disponibilidad de alimento, especialmente eufáusidos.

Por el contrario, en zonas poco variables, la relación entre las condiciones ambientales y los cetáceos se ha establecido con mayor claridad que en función de la presencia de presas. El trabajo de Ortega-Ortiz (2002) en el Golfo de México, involucró una gran diversidad en la escala de las variables ambientales, así como las afinidades espaciales intrínsecas de cada especie de cetáceo evaluada. El estudio analizó la variabilidad de las condiciones hidrográficas con respecto a la disponibilidad de la presa, encontrando que la distribución de esta última es heterogénea y por tanto, menos predecible. En contraste, variables como la concentración superficial de clorofila-a y la distancia a la costa se relacionaron con la distribución diferencial de las especies, pero su efecto cambia de acuerdo con la resolución espacial usada. También existen condiciones más estables en hábitats típicamente heterogéneos que afectan la presencia de las especies de cetáceos. En

aguas tropicales alrededor de las Islas Galápagos, Palacios (2003) estudió la variabilidad oceanográfica y su influencia en la comunidad de cetáceos. Aunque encontró una segregación marcada en la distribución espacial de las especies, mediada por su distancia y ubicación geográfica con respecto a las islas, los cambios de la comunidad no parecen reflejar la alta variabilidad ambiental encontrada. Esto se atribuyó a la presencia estable de un sistema de surgencia ligado a la Corriente Ecuatorial. Este evento puede mediar la disponibilidad de diferentes tipos de presas a lo largo del año que satisfacen a una comunidad con diferentes requerimientos y estrategias de alimentación.

La profundidad y gradiente batimétrico también son características físicas del hábitat que también condicionan la distribución de los cetáceos de acuerdo con sus adaptaciones y requerimientos particulares. Praca y Gannier (2008) determinaron las áreas de distribución para tres especies de cetáceos teutófagos en el Mediterráneo. Encontraron que su segregación espacial se relaciona con diferentes zonas de la plataforma y talud continental. Los delfines de Risso (*Grampus griseus*) presentan el hábitat más restringido y somero, localizado principalmente en la parte superior del talud, los cachalotes usan la parte más profunda y los calderones ocupan el hábitat más oceánico. De esta forma, se reduce la competencia potencial por un recurso común. En el Golfo de México también se ha observado este tipo de segregación espacial. Davis *et al.* (1998) lograron identificar tres grupos de especies de acuerdo a su distribución. Los delfines manchados del Atlántico (*Stenella frontalis*) se ubican en las aguas más someras, los tursiones (*Tursiops truncatus*), delfines de Risso y calderones se ubican en la parte superior del talud y un tercer grupo de varias especies, dentro de las que se encuentran los cachalotes enanos y pigmeos (*Kogia* spp), delfines de dientes rugosos (*Steno bredanensis*), delfines rotadores, cachalotes, delfines listados, entre otros, se ubican en las zonas más profundas, más allá del talud continental.

A pesar de que todas las relaciones hasta ahora mencionadas tienen que ver con los requerimientos alimentarios de las especies, éstas no siempre están ligadas a la

disponibilidad de alimento. La migración de algunos cetáceos para reproducirse involucra también la selección de condiciones físicas particulares. Rasmussen *et al.* (2007), reportaron una nueva área de reproducción para rorcuales jorobados en el Pacífico centroamericano frente a Costa Rica y analizaron el comportamiento de la temperatura superficial del mar en dichas zonas con respecto a otras áreas tradicionales de reproducción en el Pacífico. La presencia de esta área de reproducción tan al norte para la población austral coincide con el desarrollo de una lengua de agua fría en el Pacífico Suroriental, lo cual lleva a los rorcuales a buscar áreas más cálidas. Por ende, estas condiciones de temperatura afectan la distribución de las poblaciones. Las ventajas que representa el desarrollo de las crías en aguas cálidas, determina la necesidad de realizar migraciones más largas para encontrar hábitats con las condiciones adecuadas de temperatura, a pesar del mayor gasto energético que esto implica.

El efecto de cambios de mayor escala sobre los cetáceos, como El Niño, es poco entendido (Ballance *et al.*, 2006). Su efecto en la estructura de la columna de agua conlleva a una disminución en la disponibilidad de presas que puede afectar la distribución de las poblaciones de cetáceos. Un ejemplo de este efecto se ha documentado en el Golfo de California. Gendron (1990) discutió la variación interanual de la presencia del rorcual azul como respuesta a este fenómeno en 1982-83 y 1986-87. Una disminución en el número de avistamientos se evidenció especialmente alrededor de las islas Carmen y Cerralvo, al suroeste del Golfo. Uno de los hábitats para cetáceos más importantes en el Golfo de California es el Canal de Ballenas entre las Grandes Islas al norte del Golfo. Esta zona ha sido descrita como un refugio para mamíferos marinos cuando se presentan condiciones de El Niño. Durante estos periodos, se presenta un descenso en la producción primaria derivada de surgencias en el Pacífico Oriental debido a la profundización de la termoclina permanente. Sin embargo, dentro del Golfo de California, dicha producción primaria no sólo se basa en surgencias, sino que también juega un papel muy importante la mezcla por oscilaciones de marea, la cual no se ve afectada por El Niño y exhibe su mayor influencia en el sector de las Grandes Islas. Tershy *et al.*

(1991) documentaron una abundancia de cetáceos ictiófagos y planctófagos relativamente mayor durante El Niño de 1983 con respecto a un año con condiciones opuestas.

El Golfo presenta una dinámica oceánica compleja con la presencia de fenómenos que podrían ser importantes en la distribución espacio-temporal de los cetáceos. Si bien, se han hecho aportes en algunas zonas y para algunas especies, es poco lo que sabemos sobre la dinámica del uso de este hábitat por parte de los cetáceos. La distribución y agregación de los cachalotes están relacionadas con las condiciones ambientales afines a la distribución del calamar gigante (*Dosidicus gigas*), su principal presa que es objeto de explotación antropogénica. Jaquet y Gendron (2002) encontraron que los patrones de agregación de esta especie se encuentran en función del aumento (más dispersos) o disminución (más agregados) de los *stocks* del calamar gigante. La agregación de cachalotes se ha registrado en zonas donde la productividad secundaria es más importante que la biomasa fitoplanctónica; sin embargo, se desconocen los procesos en el tiempo o espacio que involucran estas condiciones. A partir de una caracterización puntual de la distribución de algunos cetáceos dentro del Golfo durante la temporada fría, Chávez-Andrade (2006) encontró una afinidad de los cachalotes por aguas cálidas y con baja biomasa fitoplanctónica, ubicándose principalmente en la zona central del Golfo cuya profundidad es mayor. Los rorcuales azules se ubicaron en zonas con alta biomasa zooplanctónica, mientras que los rorcuales comunes se distribuyeron en aguas más someras, de baja temperatura, alta biomasa fitoplanctónica y baja biomasa zooplanctónica. Sin embargo, los procesos que involucran estas relaciones no son claros, ya que para esto se requiere hacer un seguimiento previo a los fenómenos que producen las condiciones ambientales detectadas bajo la distribución estimada de las especies.

Dentro de la Bahía de La Paz (suroeste del Golfo) se ha descrito la presencia de procesos oceánicos particulares que se suman a la variabilidad regional. Monreal-Gómez *et al.* (2001) describieron un patrón de circulación geostrofica hacia el norte

de la Bahía cuya influencia a lo largo de la columna de agua podría alcanzar los 100m de profundidad. Luego, Sánchez-Velazco *et al.* (2006) encontraron que dicho flujo geostrófico dentro de la Bahía está relacionado con la distribución y abundancia estacional de larvas de peces. Estos autores sugieren que el intercambio entre el Golfo y la Bahía produce un balance entre larvas costeras y oceánicas dependiendo de la presencia de un patrón de circulación ciclónica. Por ser de carácter divergente, esta circulación produce una agregación de dichas larvas en la periferia. El ensamble larvario también está influenciado por la incidencia de la masa de Agua del Golfo de California en invierno y Agua Tropical de Superficie en verano y otoño, cuando la riqueza de especies es mayor. Esta circulación podría potencialmente modular la agregación de biomasa fitoplanctónica y de presas para algunas especies de cetáceos en la zona, sin embargo, aún se desconoce su importancia relativa.

Flores-Ramírez *et al.* (1996) caracterizaron los cambios en la comunidad de cetáceos en la Bahía de La Paz. Ellos observaron que la heterogeneidad ambiental inducida por condiciones anuales, estacionales y locales, introduce cambios importantes en la riqueza y diversidad de la comunidad de cetáceos. También sugieren que estos cambios están relacionados con la disponibilidad de alimento. Recientemente, Salvadeo (2008) registró un recambio temporal de las especies de odontocetos de acuerdo con los incrementos estacionales en la biomasa fitoplanctónica. Las temporadas oligotróficas parecen ser dominadas por especies de afinidad teutófaga como calderones de aletas cortas (en adelante calderones; *Globicephala macrorhynchus*) que usan áreas de plataforma, mientras que las temporadas eutróficas se caracterizan por la presencia de ictiófagos como los delfines comunes (*Delphinus spp*).

El presente trabajo aporta nueva información sobre la segregación temporal entre las especies de cetáceos que frecuentan la mayor parte de la Bahía. La metodología usada permitió hacer una comparación de la abundancia entre las especies más representativas del sistema. También se logró establecer, de forma paralela, las condiciones físicas dominantes en la columna de agua y sus principales efectos

sobre la base de la red trófica. Esta temporalidad se enmarcó dentro del contexto regional del área de estudio, lo cual permitió inferir los eventos propios de la Bahía o aquellos que se derivan de condiciones regionales (*i.e.* el suroeste del Golfo).

3. JUSTIFICACIÓN

Es claro, que los cetáceos no se distribuyen aleatoriamente por los océanos del mundo. Se relacionan con procesos ambientales de diferente naturaleza y a diferentes escalas que pueden ser caracterizados mediante la medición de variables oceanográficas. Sus requerimientos energéticos, adaptativos y conductuales, hacen de estos animales un buen indicador del estado de los ecosistemas. Sin embargo, dicha relación no puede ser generalizada para todas las especies o regiones. Es necesario entonces indagar los patrones de distribución y abundancia de las especies con respecto al medio, evaluados a partir de diferentes aproximaciones que conlleven a una visión completa de la dinámica del hábitat y su uso por parte de los cetáceos.

En el marco de la dinámica ambiental del Golfo de California, es necesario indagar cuáles son las condiciones dominantes que pueden influir en la distribución de la gran diversidad de cetáceos que se presenta. De esta forma sería posible en el futuro evaluar el efecto de la variabilidad climática a diferentes escalas, así como la presión antropogénica sobre las poblaciones. En el proceso de entender esta relación también se abre espacio a la interpretación del papel de los cetáceos dentro del ecosistema ya que se establecen condiciones típicas que podrían estar relacionadas con la disponibilidad de un espectro amplio de presas explotadas por diferentes especies.

Entender la relación que guardan los cetáceos con su medio también es crítico para definir lugares y momentos de manejo y conservación. Por ser organismos altamente móviles, la delimitación de sus rangos de distribución en políticas de conservación debe tener en cuenta la dinámica de las condiciones climáticas y oceánicas a las cuales están ligadas las poblaciones en espacio y tiempo.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Definir las condiciones fisicoquímicas y biológicas dominantes sobre Cuenca Alfonso y su posible influencia en la presencia de las especies de cetáceos que frecuentan este sistema durante un ciclo anual.

4.2. Objetivos particulares

- a) Establecer la variabilidad temporal de la abundancia de las especies de cetáceos en Cuenca Alfonso a lo largo de un ciclo anual.
- b) Establecer la variabilidad temporal de la estructura física de la columna de agua sobre la Cuenca y su efecto en la disponibilidad de nutrientes.
- c) Definir la respuesta de la base de la red trófica (fitoplancton y zooplancton) a los cambios en la estructura física de la columna de agua.
- d) Dimensionar la variabilidad ambiental de Cuenca Alfonso en el contexto regional del suroeste del Golfo de California.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Abundancia de cetáceos

La pregunta ‘¿Cuántos hay?’, no siempre es fácil de contestar. En el caso particular de los cetáceos, existen numerosos factores que dificultan las estimaciones. Algunos de estos son inherentes a cada especie (e.g. tamaño corporal, comportamientos de buceo y en superficie, tamaños de las agregaciones), mientras que otros son ambientales (e.g. las condiciones del mar, visibilidad) y también los hay logísticos (e.g. altura de la plataforma de observación, experiencia de los observadores) (Forney, 2000; Barlow *et al.*, 2001). Es así que, para llevar a cabo una estimación precisa de la abundancia se debe usar un método que trate con al menos algunas de estas fuentes de variación.

5.1.1. Muestreo de distancias

El método más preciso para estimar abundancia de cetáceos teniendo en cuenta los propósitos del estudio es el *muestreo de distancias en transecto lineal* (MDTL en adelante; Buckland, *et al.* 2001). Ésta técnica permite abarcar periodos de tiempo variable así como incluir una o varias especies de interés. El factor de variación al que se busca acceder se fundamenta en que la probabilidad de registrar un animal o grupo de animales disminuye a medida que estos se alejan del observador; lo cual a su vez varía con ciertas características intrínsecas de cada especie, como sus patrones de buceo y permanencia en superficie (Okamura *et al.*, 2006). El parámetro que se estimó fue la densidad poblacional ($D = \text{número de individuos por unidad de área}$). Ésta y el tamaño poblacional se relacionan como $N = D \cdot A$, donde A es el área de interés. Bajo ciertas consideraciones razonables, un estimador de D puede ser entonces:

$$\hat{D} = n / a$$

Donde n es el número de animales detectados y a es el área muestreada. Sin embargo, según la teoría del MDTL, algunos (quizás muchos) de los animales

presentes en el área no son detectados. Existe una marcada tendencia a que dicha detectabilidad decrezca a medida que se incrementa la distancia desde la línea de transecto hasta los animales. Partiendo de esta premisa, se buscó responder a la pregunta: Dada la detección de n animales (o grupos de animales), ¿cuántos hay en total dentro del área muestreada (a)?. Para esto, se usaron las distancias asociadas a las detecciones, así como algunas presunciones, para modelar la probabilidad de detectar a los individuos o grupos de cada especie ($g(x)$). Usando dicha probabilidad, se corrigió la estimación simple de la densidad poblacional ya mencionada.

5.1.2. Diseño de muestreo

Se diseñó un arreglo sistemático de líneas de transecto posicionadas de forma que se cubriera homogéneamente el área de influencia de Cuenca Alfonso, especialmente dentro de la isóbata de los 100m. Para maximizar los recursos de navegación el arreglo se dispuso en forma de 'zig-zag', lo cual maximiza el tiempo de navegación en esfuerzo activo de muestreo y la homogeneidad de la cobertura espacial sin afectar de manera significativa la precisión de las estimaciones (Hedley *et al.*, 2004; Thomas *et al.*, 2007). Debido a que la forma del área de interés es bastante regular, el ángulo entre los transectos se determinó de manera que la longitud máxima de cada arreglo (127km) pudiera ser cubierta durante una jornada completa de navegación a una velocidad aproximada de $18\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Se asignaron como observadores a un investigador experto en cetáceos, con experiencia en la metodología de muestreo de distancias, estudiantes de maestría y doctorado entrenados para el trabajo en campo con cetáceos (Laboratorio de Ecología de Mamíferos Marinos - Departamento de Plancton, CICIMAR-IPN), así como algunos estudiantes de Biología Marina voluntarios (Universidad Autónoma de Baja California Sur). Se usó la embarcación CICIMAR XV de 28 pies de eslora para cubrir el arreglo de transectos. A bordo de ésta se ubicó el capitán, un apuntador y dos observadores. Las últimas tres posiciones se rotaron a intervalos de 30min. Los dos observadores se ubicaron de pie, sobre una base de 3.43m de altura. La altura

visual efectiva de la plataforma (5.09m) se obtuvo a partir de la suma de la altura de la base de observación (3.43m) con el promedio de estatura a la altura del ojo de los observadores ($1.66 \pm 0.07\text{m}$) (Figura 2). La velocidad de la embarcación se fijó alrededor de los $18.5\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (~ 10 nudos) para evitar perder de vista animales que estuvieran sumergidos. Si bien, esto no asegura que la probabilidad de detectar animales sobre la línea de transecto sea igual a uno, si la maximiza. Los observadores cubrieron visualmente cada lado de la línea de transecto de forma independiente, desde el punto frente a ellos, hasta donde se completó un ángulo recto (*i.e.* 90°). Aquellos avistamientos detrás de un ángulo recto con respecto al transecto fueron obviados. La búsqueda de cetáceos se hizo con ayuda de binoculares Fujinon®FMTRC-SX con retícula y compás integrados.



Figura 2. Plataforma de observación: CICIMAR XV. A la izquierda se muestra la altura visual efectiva calculada. Las posiciones 1 y 2 representan al capitán y apuntador. Las posiciones 3 y 4 corresponden a los observadores.

Para cada avistamiento se registró de manera prioritaria aquella información que permitiera estimar la distancia de los animales a la línea de transecto, así como el tamaño grupal (s), la especie y la posición geográfica. El valor del tamaño grupal correspondió al promedio entre los valores mínimo (s_{\min}) y máximo (s_{\max}) de animales estimados *in situ* por el observador. Las especies de cetáceos fueron identificadas en campo teniendo en cuenta las características descritas por Jefferson *et al.* (1993), Carwardine (1995) y Reeves *et al.* (2002). En algunas ocasiones se hizo un acercamiento a los grupos para confirmar la identificación de la especie y el tamaño

grupales, siempre y cuando no se modificara drásticamente el recorrido, es decir, cuando los animales se encontraban a menos de 1.5km aproximadamente. En estos casos, el esfuerzo se catalogó como fuera de esfuerzo desde el momento que inició el acercamiento hasta que se continuó con la búsqueda (*'closing-mode'*; Dawson *et al.*, 2008). Sólo los avistamientos registrados en esfuerzo se tuvieron en cuenta para el cálculo de las abundancias. Adicionalmente, se hicieron anotaciones sobre el estado del mar (escala *Beaufort*) y la actividad de los animales cuando esta fue evidente en superficie; así como la presencia de bancos de peces, mantas y aves (Anexo I).

5.1.3. Esfuerzo

A lo largo del periodo del 6 de Febrero de 2007 al 14 de Febrero de 2008, se llevaron a cabo 18 prospecciones sobre Cuenca Alfonso. Se calculó el tiempo y distancia recorridos durante los cruceros mediante el uso de un sistema de posicionamiento global Garmin®12XL y su respectivo *software* MapSource®. Este registro fue dividido en dos partes: Durante condiciones favorables para la observación el recorrido fue catalogado en esfuerzo, mientras que en condiciones desfavorables se definió como fuera de esfuerzo (*i.e.* Estado del mar ≥ 3 en la escala *Beaufort*) (Holt y Cologne, 1987) y fue descartado para el análisis. Se totalizaron 2601.3km lineales en esfuerzo con una duración de 145h. Estos tramos se dividieron en una cantidad variable de transectos teniendo en cuenta que todos siguieran una línea recta no interrumpida (Figura 3).

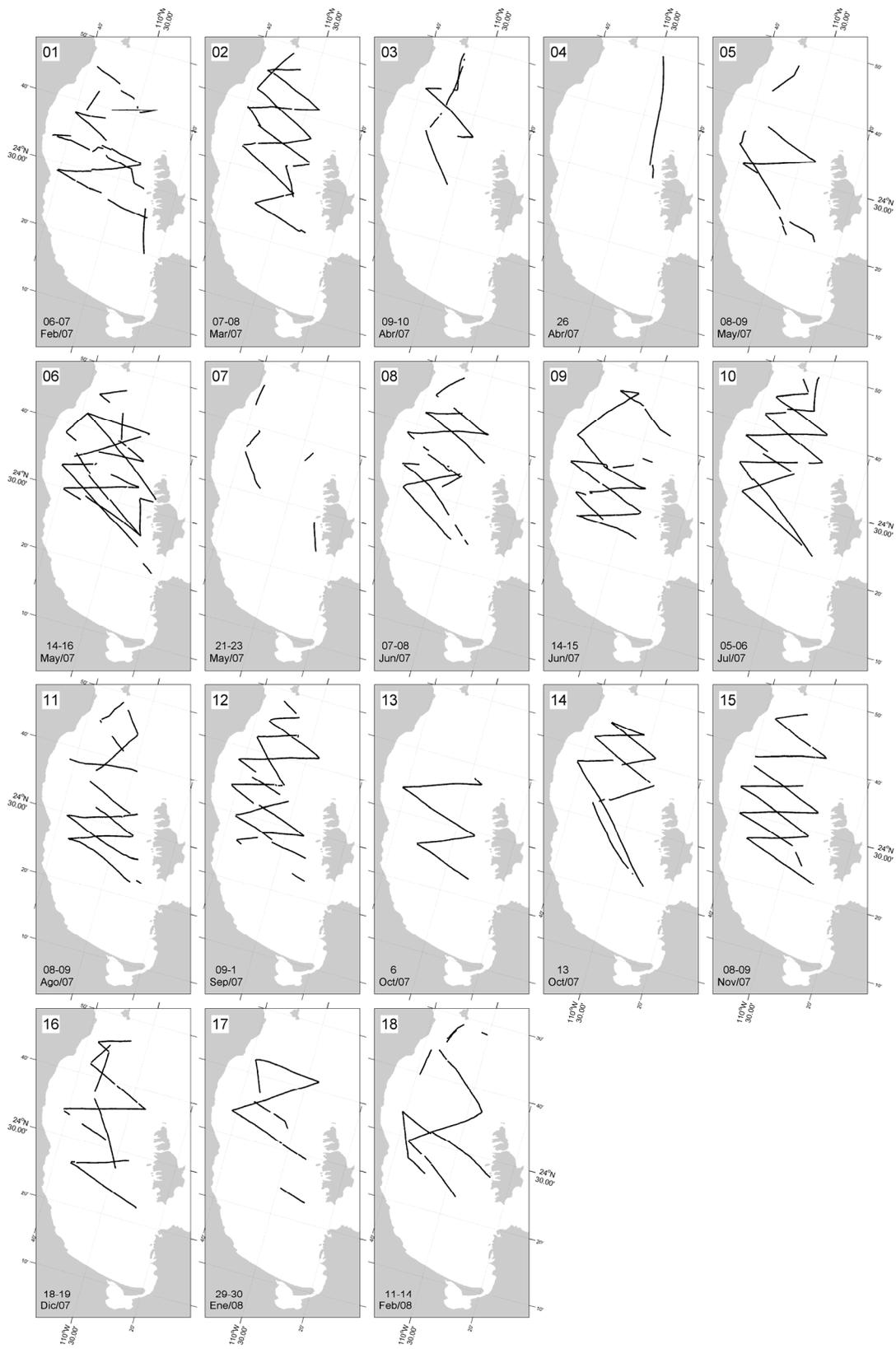


Figura 3. Esfuerzo de muestreo. Cada mapa corresponde a un crucero. Las fechas de prospección se muestran en la esquina inferior izquierda.

De esta forma, se establecieron 287 transectos con una longitud promedio de 15.9 ± 7.6 km, a los cuales se asignaron los correspondientes avistamientos. Debido a que algunos cruceros no tuvieron una cantidad de esfuerzo representativo (>100 km), estos se sumaron a la salida más cercana en tiempo, siempre y cuando pertenecieran al mismo mes con el fin de hacer que el muestreo fuera homogéneo espacialmente. De esta forma, se sumaron para el análisis los cruceros: 03-04, 05-06-07 y 13-14, lo cual produjo un nuevo total de 14 estimaciones de abundancia a lo largo del periodo de estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Detalles del esfuerzo. El número corresponde a las prospecciones en la Figura 3. (*) denota los cruceros sumados para el análisis por su bajo esfuerzo.

| Muestreo | Fecha | Duración (días) | Esfuerzo (km) | Esfuerzo (h) | Vel. prom. (km/h) | No. Transectos |
|------------------|----------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 01 | 06-02-07 | 2 | 167.4 | 8.6 | 19.4 | 29 |
| 02 | 07-03-07 | 2 | 188.1 | 10.3 | 18.3 | 25 |
| 03* | 09-04-07 | 2 | 74.2 | 3.9 | 18.8 | 13 |
| 04* | 26-04-07 | 1 | 35.3 | 1.8 | 19.2 | 2 |
| 05* | 08-05-07 | 2 | 93.4 | 5.2 | 18.1 | 14 |
| 06* | 14-05-07 | 3 | 266.7 | 15.5 | 17.2 | 29 |
| 07* | 21-05-07 | 3 | 35.2 | 2.2 | 15.7 | 8 |
| 08 | 07-06-07 | 2 | 168.5 | 10.4 | 16.1 | 19 |
| 09 | 14-06-07 | 2 | 180.6 | 9.9 | 18.3 | 24 |
| 10 | 11-07-07 | 2 | 209.1 | 11.1 | 18.9 | 17 |
| 11 | 08-08-07 | 2 | 172.5 | 10.2 | 16.9 | 17 |
| 12 | 09-09-07 | 2 | 196.7 | 10.7 | 18.4 | 22 |
| 13* | 06-10-07 | 1 | 84.2 | 4.6 | 18.5 | 5 |
| 14* | 13-10-07 | 1 | 157.6 | 8.1 | 19.6 | 11 |
| 15 | 08-11-07 | 2 | 195.2 | 10.9 | 17.9 | 13 |
| 16 | 18-12-07 | 2 | 144.0 | 8.6 | 16.7 | 14 |
| 17 | 29-01-08 | 2 | 98.4 | 5.6 | 17.7 | 11 |
| 18 | 11-02-08 | 4 | 134.2 | 7.4 | 18.1 | 14 |
| Totales | | 37 | 2601.3 | 145.0 | | 287 |
| Promedios | | 2.0(+/-0.7) | 144.5(+/-62.7) | 8.0(+/-3.5) | 18.0(+/-1.1) | 15.9(+/-7.6) |

5.1.4. Cálculo de la abundancia

Ya que el cálculo *in situ* de la distancia perpendicular entre los animales y la línea de transecto (x) es poco práctico, se optó por medir la distancia entre el observador y el centro del grupo de animales (r) junto con el ángulo que formó esta medición con la

línea de transecto (λ). A partir de estos datos se calculó posteriormente la distancia perpendicular por trigonometría: $x = r \cdot \text{sen}(\lambda)$. El valor de λ se obtuvo mediante la sustracción del rumbo real de la embarcación a la lectura del compás integrado en los binoculares (*i.e.* la ubicación relativa de los animales con respecto al norte magnético; Figura 4a). El cálculo de la distancia entre el observador y el grupo de animales (r) involucró varios procedimientos, que se derivan de la lectura del número de retículas (también llamadas ‘*mils*’) entre el horizonte y el avistamiento (*i.e.* alineado con $\text{mils} = 0$; Figura 4b). Una retícula equivale al ángulo necesario para ver un objeto de un metro de altura a una distancia de 1000m. Los binoculares usados tienen una escala vertical de 70mils a intervalos de cinco unidades. A partir de esta medición se calculó la caída angular desde el horizonte hasta el grupo detectado (θ) según las ecuaciones propuestas por Jaramillo-Legorreta *et al.* (1999), para luego ser convertida en una distancia curvilínea (r) (Anexo II). Es importante precisar que, en caso de que la costa se interpusiera entre el avistamiento y el horizonte, se debería emplear otra serie de ecuaciones diferentes para el cálculo de r (Lerczak y Hobbs, 1998). Debido a esto, previamente se verificó que ningún avistamiento usado para el cálculo de la abundancia, presentara esta situación. Se usó el *software* Mapsource®, para verificar que la línea de costa más cercana a la plataforma (siguiendo la trayectoria de la posición angular del avistamiento) se ubicara más allá de la máxima distancia visual sobre el horizonte, la cual fue de 8.05km (*i.e.* cuando $\text{mils} = 0$ y $\lambda = 90^\circ$). La precisión de las mediciones con retículas varía desde 0.01° en condiciones ideales hasta alrededor de 0.1° en condiciones de vibración y movimiento normales de la embarcación (Kinzey y Gerrodete, 2001).

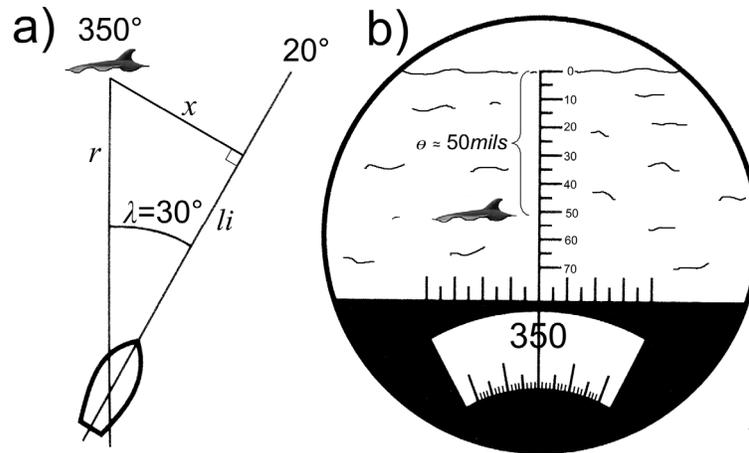


Figura 4. Mediciones para el cálculo de la distancia perpendicular entre el transecto y el avistamiento. a) Cálculo del ángulo de avistamiento (λ) suponiendo un rumbo de la embarcación de 20° . li es la longitud del transecto (i), r es la distancia radial y x la perpendicular. b) Campo visual en los binoculares con una caída angular (θ) de 50mils y una posición de 350° .

Una vez obtenida la distancia perpendicular para cada avistamiento, se procedió a calcular la *función de detección* ($g(x)$), que describe la probabilidad de registrar a cada especie teniendo en cuenta la distribución de las distancias perpendiculares de sus avistamientos. Esta función se usó luego para estimar la densidad poblacional de las especies más frecuentes a lo largo del año. Un cálculo robusto de la función de detección requiere de un número suficiente (~ 60) de avistamientos (*i.e.* distancias perpendiculares; Buckland *et al.*, 2001). Para lograr esto, se usó el método de *pooling* (Forney y Barlow, 1998), que consiste en unir las distancias de especies que potencialmente tengan una probabilidad similar de ser detectadas bajo las mismas condiciones (*e.g.* rorcuales azul y común). Luego, se construyó un histograma de frecuencia de distancias por especie para escoger un valor a partir del cual los datos fueron truncados hacia la derecha por considerarse extremos (w).

La función de detección $g(x)$ describe la probabilidad de detectar un grupo de cetáceos dada una distancia x entre este y la línea de transecto. Generalmente, la función de detección decrece con el incremento de la distancia y siempre $0 \leq g(x) \leq 1$.

Para este estudio se asumió que $g(0)=1$ debido a que el cálculo de la probabilidad real de detectar animales que se encuentren justo sobre la línea de transecto hubiese requerido de un diseño experimental diferente para cada especie (Forney, 2000). Ya que el cómputo de las funciones de detección, varianzas y covarianzas es complejo y susceptible a errores si es efectuado 'a mano'; se usó el *software* Distance®5.1, programado para los propósitos específicos del método (Thomas *et al.*, 2006). Este programa permite probar el uso de varias *funciones clave* y *series de expansión* en el ajuste de la función de detección de manera que ésta represente lo mejor posible la distribución de las distancias observadas. Para todas las especies y *sets* de distancias, se probaron las funciones *uniforme*, *media-normal*, y *tasa de riesgo*. Para éstas a su vez se probaron las series de expansión *coseno*, *polinomio simple* y *polinomio hermitaño*. Se escogió la función que mejor se ajustó a los datos observados de distancias con base en el Criterio de Información de Akaike (CIA; Burnham y Anderson, 2002).

El tamaño grupal promedio ($E(s)$) fue estimado solo para los odontocetos. Para los misticetos el análisis se basó en avistamiento de individuos. Esto se debe a que el tamaño promedio de los grupos de misticetos en el análisis previo fue siempre cercano a 1 (ver Capítulo 6.1), siendo raros los grupos de dos individuos. Para el caso de los rorcuales azules estos fueron solo el 17.6% de los avistamientos, 18.7% para rorcuales comunes y 6.7% en los rorcuales tropicales. En estos casos, se dividieron los avistamientos en dos avistamientos separados con el mismo valor de distancia y en la misma línea de transecto, lo cual permitió reducir la variación así como la indeterminación al momento de hallar los tamaños grupales. Se estimó también la función de probabilidad de densidad de distancias, evaluada desde la línea de transecto $f(0)$. Esta no es más que la función de detección $g(x)$ reescalada a 1. El ajuste de la ecuación para la densidad estimada (\hat{D}) se hizo multiplicando el número de individuos detectados (n) por $\hat{f}(0)$ (igual a la función de probabilidad de detección $g(x)$ reescalada a la unidad) y $\hat{E}(s)$ para odontocetos. Este valor se dividió por dos veces la longitud de la línea de transecto, para finalmente obtener la densidad en individuos.km⁻² (Thomas *et al.*, 2002):

$$\hat{D} = \frac{n \hat{f}(0) \hat{E}(s)}{2L}$$

Una de las bondades del método es la posibilidad de calcular la varianza y un intervalo de la estimación de densidad. Tanto el valor puntual de la estimación de densidad, como la varianza y el intervalo de confianza se calcularon mediante un análisis de 999 iteraciones *bootsptap* sobre las muestras (*i.e.* transectos) de cada estrato (*i.e.* crucero) (Buckland *et al.*, 2001). De esta forma se determinó una estimación más precisa de la varianza. El cálculo analítico de dicha varianza estaría dado por:

$$\text{vâr}(\hat{D}) = \hat{D}^2 \left[\frac{\text{vâr}(n)}{n^2} + \frac{\text{vâr}[\hat{f}(0)]}{[\hat{f}(0)]^2} \right]$$

donde $\text{vâr}(n)$ corresponde a la varianza de las tasas de encuentro en la estimación $\text{var}(n/L_j)$, cuyo valor se obtiene a partir de las tasas de encuentro en las líneas de transecto (n_i/l_i). Debido a que la distribución de \hat{D} se asumió como *lognormal* (Buckland *et al.*, 1993), los límites para el intervalo de confianza analítico de la densidad con un 95% de confianza (\hat{D}/C , $\hat{D} \cdot C$) se representan como:

$$C = \exp \{1.96 [\text{vâr}(\ln \hat{D})]^{0.5}\}$$

$$\text{vâr}(\ln \hat{D}) = \ln \left[1 + \frac{\text{vâr}(\hat{D})}{\hat{D}^2} \right]$$

Con el fin de hacer comparables los valores de abundancia entre las especies, la estimación de densidad y sus respectivas medidas de dispersión fueron multiplicadas por un valor de peso para cada especie, teniendo en cuenta que estas varían bastante en su tamaño corporal y tamaño de las agregaciones. Dichos valores fueron tomados de Reeves *et al.* (2002). Cuando hubo información al respecto, se promediaron los valores reportados para machos y hembras (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de peso usados para la conversión de densidades y medidas de variación estimadas (de individuos a toneladas). Tomados de Reeves *et al.* (2002).

| Especie | Peso (ton) | | | Valor usado |
|------------------------------------|------------|--------|----------|-------------|
| | Hembras | Machos | Promedio | |
| <i>Megaptera novaeangliae</i> | - | - | 40.0 | 40.0 |
| <i>Balaenoptera edeni</i> | - | - | 40.0 | 40.0 |
| <i>Balaenoptera physalus</i> | - | - | 120.0 | 120.0 |
| <i>Balaenoptera musculus</i> | - | - | 180.0 | 180.0 |
| <i>Physeter macrocephalus</i> | 24.0 | 57.0 | 40.5 | 57 |
| <i>Kogia sima</i> | - | - | 0.2 | 0.2 |
| <i>Tursiops truncatus</i> | 0.3 | 0.5 | 0.4 | 0.4 |
| <i>Delphinus spp</i> | - | - | 0.2 | 0.2 |
| <i>Orcinus orca</i> | 3.8 | 5.6 | 4.7 | 5.2 |
| <i>Globicephala macrorhynchus*</i> | 1.3 | 2.3 | 1.8 | 2.1 |

* Debido a la falta de datos para *G. macrorhynchus* se usaron los valores máximos de *Globicephala melas*, que es una especie ligeramente más pequeña.

En resumen, se obtuvieron las siguientes constantes y parámetros que fueron usados en el análisis de la abundancia de cetáceos en Cuenca Alfonso:

Constantes:

$g(0) = 1$ establecida *a priori* para la probabilidad de detección sobre la línea de muestreo

k = número de líneas de transecto (i) en cada muestreo (j)

l_i = longitud de la línea de transecto i

L_j = longitud total del muestreo j en km. $L_j = \sum l_i$;

AEB = ancho efectivo de banda (un valor por especie)

Parámetros:

$\hat{f}(0)$ = probabilidad de densidad de distancias evaluada a una distancia de 0

$\text{vâr}(\hat{D})$ = varianza estimada de la densidad

\hat{D}_p = densidad en ton.km⁻²

$(\hat{D}/C)_p$ = límite inferior del intervalo de la densidad, en ton.km⁻²

$(\hat{D} \cdot C)_p$ = límite superior del intervalo de la densidad, en $\text{ton} \cdot \text{km}^{-2}$

$\hat{E}(s)$ = tamaño grupal promedio en la población

Finalmente, para aquellas especies poco frecuentes, se calculó un índice de abundancia relativa a la unidad de esfuerzo ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$) ya que no fue posible calcular una función de detección basada en tan pocas distancias perpendiculares.

5.2. Columna de agua sobre Cuenca Alfonso

5.2.1. Estructura física

La temperatura y la salinidad son propiedades conservativas del agua de mar, por lo cual, cambios en su distribución a lo largo de la columna indican la configuración de su estructura física (Manasrah *et al.*, 2006). Entre el 2 de Febrero de 2007 y el 18 de Febrero de 2008 se llevaron a cabo 14 lances de un perfilador CTD SBE19plus[®] SEACAT[®] a diferentes profundidades de hasta 51 a 340m (Tabla 3). A partir de la conductividad se calculó la salinidad en UPS (Cox *et al.* 1962) y, junto con la temperatura en °C, se calculó la densidad como δ -t (Pickard y Emery, 1982). Los datos de las tres variables fueron estandarizados a promedios por cada metro para facilitar el procesamiento de los datos y se construyeron perfiles de salinidad y temperatura utilizando una escala fija para todos los períodos. Luego de una exploración previa, se decidió analizar los perfiles solo en los primeros 100m de la columna de agua, donde la variabilidad fue mayor. A partir de éstos se determinó la profundidad de la capa de mezcla (cuyo límite inferior se asumió como el inicio de la termoclina) y se construyó un mapa por variable para caracterizar la tendencia temporal de la estructura de la columna.

5.2.2. Nutrientes

La disponibilidad de nutrientes, junto con otros factores, alimenta la base de la red trófica (Eppley *et al.*, 1973, Rhee y Gotham, 1981), por lo cual es importante tenerlos en cuenta al momento de ligar los fenómenos físicos de la columna de agua con la dinámica biológica. Con el fin de determinar los cambios temporales en la concentración de nutrientes a lo largo de la columna de agua sobre Cuenca Alfonso

se llevaron a cabo 13 muestreos de agua en botellas Niskin de cinco litros a siete diferentes profundidades de acuerdo con los niveles de penetración de la luz (0.1, 1, 3, 10, 33, 55 y 100%) (Tabla 3), los cuales marcan la profundidad de la capa eufótica. Parte de estas muestras fueron almacenadas en botellas cubiertas de hielo, para ser luego filtradas en el laboratorio a través de una membrana de fibra de vidrio GF/F de poro nominal de 0.7µm. A las muestras filtradas se les determinó la concentración de los principales nutrientes: silicato (Si(OH)), fosfato (PO₄) y nitrógeno inorgánico disuelto (NID; NO₂ + NO₃ + NH₄), siguiendo los procedimientos descritos por Strickland y Parsons (1972). Todas las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Medio Ambiente del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable, Sinaloa.

Tabla 3. Fechas de muestreo para los parámetros fisicoquímicos y biológicos en la columna de agua.

| Fecha | Temperatura | Salinidad | Densidad | Sílice | Fosfato | NID | Clorofila <i>a</i> |
|-----------|-------------|-----------|----------|--------|---------|-----|--------------------|
| 02-Feb-07 | X | | | X | X | X | X |
| 17-Feb-07 | X | X | X | X | X | X | X |
| 08-Mar-07 | X | | | X | X | X | X |
| 10-Abr-07 | X | | | X | X | X | X |
| 12-May-07 | X | X | X | X | X | X | X |
| 28-May-07 | X | X | X | | | | |
| 08-Jun-07 | X | X | X | X | X | X | X |
| 06-Jul-07 | X | X | X | X | X | X | X |
| 11-Ago-07 | X | X | X | X | X | X | X |
| 10-Sep-07 | X | X | X | X | X | X | X |
| 10-Oct-07 | | | | X | X | X | X |
| 10-Nov-07 | X | X | | | | | |
| 15-Nov-07 | | | | X | X | X | X |
| 19-Dic-07 | | | | X | X | X | X |
| 20-Dic-07 | X | X | X | | | | |
| 30-Ene-08 | | | | X | X | X | |
| 31-Ene-08 | X | X | X | | | | |
| 18-Feb-08 | X | X | X | | | | |

5.3. Respuesta biológica

5.3.1. Clorofila-*a*

La concentración de clorofila-*a* brinda una aproximación indirecta a la biomasa fitoplanctónica (Desortova, 1981), base de la red trófica. La determinación de su

concentración se hizo a partir de las mismas muestras de agua descritas para los nutrientes (Tabla 3). Este análisis fue llevado a cabo en el Laboratorio de Fitoplancton, Departamento de Plancton y Ecología Marina del CICIMAR-IPN. Para esto, se llevó a cabo una extracción a las submuestras de agua con acetona al 90% y se determinó la concentración de clorofila-a en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a partir de los valores de absorbancia espectrofotométrica, usando las ecuaciones referidas por Jeffrey y Humphrey (1975).

5.3.2. Material particulado en hundimiento (MPH)

Los procesos biológicos y no biológicos que ocurren en las capas superiores de la columna de agua, producen una serie de materiales que se hunden y depositan posteriormente sobre el lecho marino. El carbono inorgánico disuelto es incorporado por el fitoplancton, para luego ser transformado a través de la red trófica en agregados de materia particulada (Silverberg *et al.*, 2006). Estos, se presentan en su mayor parte en forma de agregados mucosos (nieve marina) y en menor medida, pelotillas fecales (Honjo, 1997; Turner, 2002). Mediante el análisis de los contenidos del material particulado en hundimiento, es posible entonces, inferir el tipo y magnitud de los procesos biológicos que suceden en las capas superiores del océano (Alldredge y Silver, 1988) y por ende, los cambios tróficos en el ecosistema pelágico.

Con el fin de indagar la afinidad temporal de las especies de cetáceos hacia diferentes procesos de producción en los niveles inferiores de la red trófica (fitoplancton y zooplancton), se midió el flujo vertical (hundimiento) de material particulado. Una vez evaluado el comportamiento temporal del flujo de material total, se restó la porción litogénica de dicho flujo, determinado por procesos no biológicos como el transporte de material terrígeno por vientos o lluvias. De esta forma fue posible analizar el flujo y contenido porcentual de materiales indicadores de los procesos biológicos en el sistema.

Para este análisis se tuvieron en cuenta los flujos de material biogénico orgánico e inorgánico, sílice biogénico (*i.e.* ópalo), carbonato de calcio (CaCO_3), exopolímeros transparentes (EPT) y pelotillas fecales de zooplancton. El ópalo se usó como indicador de florecimientos de microalgas, cuyos exoesqueletos están constituidos por este material, principalmente las diatomeas, aunque también está presente en una clase de silicoflagelados y radiolarios (protozoos). El flujo de ópalo se constituye en un buen indicador de la producción fitoplanctónica en la columna superior, ya que las diatomeas son un importante componente del fitoplancton en la zona (Verdugo-Díaz, 2004) y están relacionadas con grandes florecimientos algales. Por su parte, el CaCO_3 es un constituyente importante de los cocolitofóridos, un tipo de fitoplancton de menor tamaño. La nieve marina se encuentra agregada por un material mucoso que está constituido por exopolímeros transparentes (EPT) provenientes de exudados del fitoplancton y algunos grupos de zooplancton y su concentración es indicadora de la cantidad de nieve marina en el medio. Las pelotillas fecales de zooplancton por su parte, representan el material de deshecho de diferentes grupos de la comunidad. La identidad de algunos de estos grupos puede ser inferida a partir de la forma y tamaño de sus pelotillas (Romero-Ibarra *et al.*, 2008).

La colecta y procesamiento inicial de las muestras se llevó a cabo por el Departamento de Oceanología del CICIMAR-IPN. Se usó una trampa de sedimento de series de tiempo Technicap® PPS 3/3, con 0.125m^2 de abertura (Figura 5). Este dispositivo se localizó de manera fija sobre el punto más profundo de Cuenca Alfonso (~410m; Figura 1), suspendida a una profundidad de 310m. La trampa contiene 12 botellas recolectoras de muestras de 250ml de capacidad cada una. Estas, fueron llenadas con una solución preservadora de formaldehído, amortiguada con tetraborato de sodio, de forma que el pH de las muestras se mantuviera alrededor de ocho. Un carrusel programado permitió tomar muestras de forma automática con una resolución temporal que varió entre los 7 y 15 días. Dependiendo de estos lapsos, la trampa fue recuperada y reinstalada cada 3 a 6 meses en campañas a bordo del *B/O* Francisco de Ulloa, del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Luego de recuperar las muestras, estas se pasaron a través de

un tamiz de tamaño de poro de 1000µm, para separar cuerpos de zoopláncton que no se consideran parte del flujo de material particulado. Mediante un fraccionador rotativo, la muestra se subdividió en diez partes destinadas a diferentes tipos de análisis.

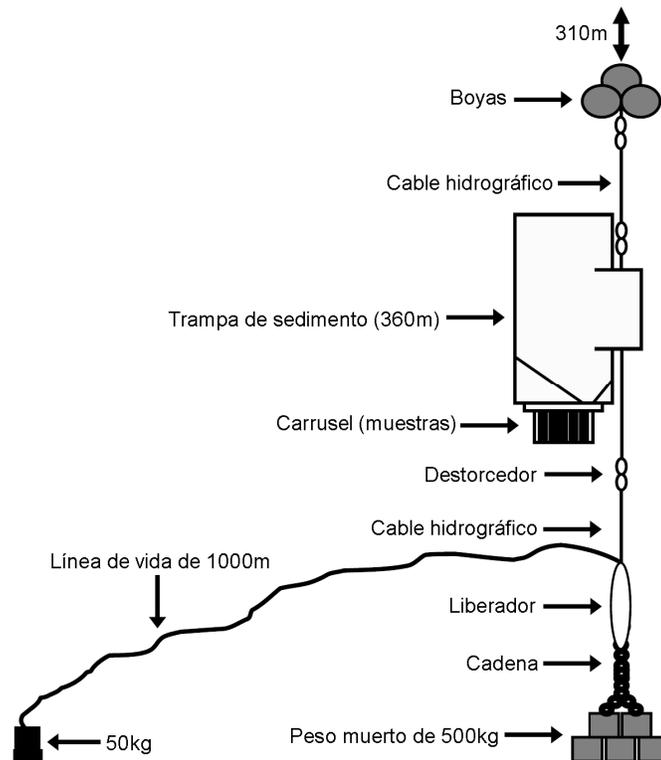


Figura 5. Esquema de la trampa de sedimento. Los objetos no están a escala.

Para determinar el flujo de masa total, cuatro submuestras fueron centrifugadas durante 25 minutos a 3000rpm para eliminar la solución preservadora. Luego, se lavaron con agua destilada para eliminar las sales, se centrifugaron nuevamente y se eliminó el sobrenadante. Este procedimiento se realizó por duplicado. Las muestras fueron pesadas en una balanza analítica, luego de un secado de 72 horas a 50°C y posterior aclimatación. El cálculo del flujo de masa total (FMT) en g.m⁻².día, se hizo mediante la siguiente ecuación (Aguirre-Bahena, 2007):

$$FMT = \frac{M \cdot 10 \cdot 8}{T}$$

Donde M es la masa promedio de las cuatro muestras procesadas y pesadas, cuyo valor se multiplicó por el número de submuestras (10) y la fracción de metros cuadrados de apertura de la trampa (8). T representa el número de días de colecta correspondiente a cada muestra. Una vez calculado el flujo de masa total, las submuestras secas se molieron en un mortero de ágata y se homogenizaron. Parte de este material fue usado para la determinación de sílice biogénico, mediante la técnica de disolución secuencial (DeMaster, 1981) y posterior análisis espectrofotométrico (Strickland y Parsons, 1972). Los análisis fueron hechos por triplicado y se tomó el valor promedio. El procesamiento y análisis de las muestras para la determinación semi-cuantitativa del flujo de exopolímeros transparentes (EPT), fue realizada por el Departamento de Oceanología del CICIMAR-IPN.

El procesamiento y análisis de las muestras para la determinación del flujo de pelotillas fecales fue realizado en el Departamento de Plancton y Ecología Marina del CICIMAR-IPN. Las pelotillas fueron separadas del resto de la muestra por diferencia en la velocidad de hundimiento de las partículas (Romero-Ibarra, 2005), dentro de una solución saturada de cloruro de sodio (NaCl) durante un tiempo máximo de cuatro minutos. Estas partículas son por lo general las de mayor velocidad de hundimiento, por lo que quedan en el fondo del tubo de sedimentación, en una capa cuyo contenido es de estas estructuras en un 90% aproximadamente. En observaciones preliminares bajo el estereoscopio, se ha detectado una alta variabilidad en forma y tamaño de las pelotillas, lo cual podría indicar diferentes grupos zooplanctónicos y por ende, cambios en la comunidad (*com. pers.* N. Romero-Ibarra, 2009). Debido a esto, se determinaron cuatro formas de pelotillas: cilíndricas, ovales, esferoides y curvas. Estas a su vez, se agruparon en tres rangos de diámetro: de 0.04 a 0.12mm, 0.13 a 0.32mm y 0.33 a 0.48mm (Romero-Ibarra *et al.*, 2008). Luego de la separación, cada muestra fue examinada al estereoscopio en su totalidad para contar el número de pelotillas de cada categoría. El valor de flujo de pelotillas fecales (FPF) se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$FPF = \frac{P \cdot 10 \cdot 8}{T}$$

Donde P es el número de pelotillas contadas en la fracción (1/10) de la muestra; la cual corresponde al hundimiento en $1/8\text{m}^2$ de abertura de la trampa de sedimento, durante un tiempo de T días. Se contó con datos que cubrieron el periodo de Enero de 2007 hasta mediados de Febrero de 2008, con una resolución temporal que varió entre 7 y 15 días.

5.4. Cuenca Alfonso en el suroeste del Golfo de California

Los cetáceos son animales con gran capacidad de movimiento, que pueden cubrir distancias considerables en poco tiempo (Fish y Hui, 2008). Este es un concepto importante al momento de analizar los cambios en su abundancia con respecto a las condiciones del hábitat dentro de una zona determinada. El área de influencia de Cuenca Alfonso no contiene el rango completo de distribución de ninguna de las poblaciones de cetáceos reportadas para la zona. Solo existe una población de tursiones costeros restringida hacia el sur de la Bahía de La Paz, especialmente la Ensenada (Marcín-Medina, 1997); pero dicha zona no hace parte del área de estudio ni de influencia de la Cuenca. Debido a esto, se asumió que las abundancias estimadas corresponden a animales que usan el área de manera transitoria. Esto conlleva a la necesidad de explorar las condiciones del hábitat de la Cuenca en relación al área circundante del Golfo, dentro de la cual se mueven las especies.

La información derivada de mediciones satelitales, permite cubrir grandes áreas y periodos de tiempo de manera relativamente sencilla, por lo cual, se constituye en una opción idónea al momento de describir las condiciones bioecológicas del hábitat a mesoescala. Se escogió la concentración superficial de clorofila-*a* (Cla-S) como indicador de los procesos que tienen incidencia en la base de la red trófica. Esta, refleja la agregación de microalgas debida a diferentes eventos oceanográficos y ambientales; misma que se mantiene por periodos de tiempo considerables (Polovina *et al.*, 2001). En algunas ocasiones, la Cla-S se constituye en un mejor trazador de los procesos oceanográficos que la misma temperatura superficial; como es el caso de la época de verano en el Golfo de California, cuando es difícil detectar gradientes

para esta variable (Pegau *et al.*, 2002). Adicionalmente, se llevó a cabo un seguimiento temporal al estrés de de viento superficial en la región, cuyo patrón de circulación monzónico tiene una gran influencia en la dinámica climática en el Golfo. También se siguió el patrón de circulación geostrófica, con el fin de identificar, junto con la Cla-S, eventos con influencia sobre el área de estudio desde o hacia el Golfo circundante.

5.4.1. Naturaleza y origen de los datos

Los datos de Cla-S fueron obtenidos del nodo *CoastWatch* de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* de los Estados Unidos (NOAA), a través del Programa de Acceso de Datos de la División de Investigación Ambiental (ERDDAP). Los valores de Cla-S en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, provienen de un algoritmo calculado a partir de las mediciones espectro-radiométricas del sensor *MODIS*, a bordo del satélite *Aqua* (O'Reilly *et al.*, 2000). La resolución espacial de los datos es de $0.025\times 0.025^\circ$ ($2.7\times 2.7\text{km}$), con una precisión nominal de $\pm 40\%$. Aunque los valores de Cla-S de *MODIS* son controversiales debido a algunas diferencias con respecto al sensor *SeaWiFS*, estos son comúnmente usados para identificar y seguir eventos oceanográficos. La corriente geostrófica proviene de un algoritmo calculado a partir de anomalías en la altimetría del mar y la altura dinámica climatológica de Levitus, medidos por el altímetro Poseidon II, a bordo del satélite de la NASA Jason I (Polovina *et al.*, 1999). El estrés del viento se obtuvo de los datos de dirección y magnitud del mismo, tomados por un dispersómetro de microondas a bordo del satélite QuickSCAT de la NASA (Smith, 1988).

5.4.2. Procesamiento de datos

Se desarrolló una rutina bajo la plataforma MATLAB®R2007a que permitió procesar las bases de datos desde su forma binaria (formato NetCDF) hasta su mapeo y posterior análisis gráfico. Para decodificar los archivos binarios y extraer las variables de interés (*e.g.* Cla-S, tiempo, latitud y longitud), se escribió una primera parte de la rutina con ayuda de la interface MEXNC y los comandos de SNCTOOLS, desarrollados por la Universidad de Rutgers en Estados Unidos. Una vez obtenidas

las variables, se construyó una gráfica colorimétrica por cada semana o día de interés, con el fin de identificar gradientes espaciales de la variable a lo largo del periodo de estudio (Figura 6). De esta forma, se buscó comparar el comportamiento del área de influencia de la Cuenca con el del resto de la costa occidental y el suroeste del Golfo en general. Con el fin de eliminar el ruido introducido por datos extremos cercanos a la costa, se produjo una escala diferente para cada gráfica con base en la distribución de frecuencia de sus datos. Este mismo criterio se usó para determinar la escala de valores en cada instante de muestreo, en lugar de usar una escala para todo el estudio. De esta forma fue posible identificar los gradientes espaciales que adoptó la variable, independientemente de su fluctuación estacional. Al mapeo de Cla-S, se le superpuso la dirección e intensidad de la corriente geostrófica, así como y estrés del viento superficial, con el fin de observar el patrón de movimiento del agua en el área. Sobre estas gráficas, se construyeron los respectivos mapas geográficos a partir de la base de datos de línea de costa de alta resolución jerárquica (GSHHS) de la NOAA. Por último, cada una de las gráficas fue convertida en un archivo de imagen, para luego producir una secuencia de video de cada cuadrante. Estos fueron revisados simultáneamente con el fin de detectar cambios temporales en el área.

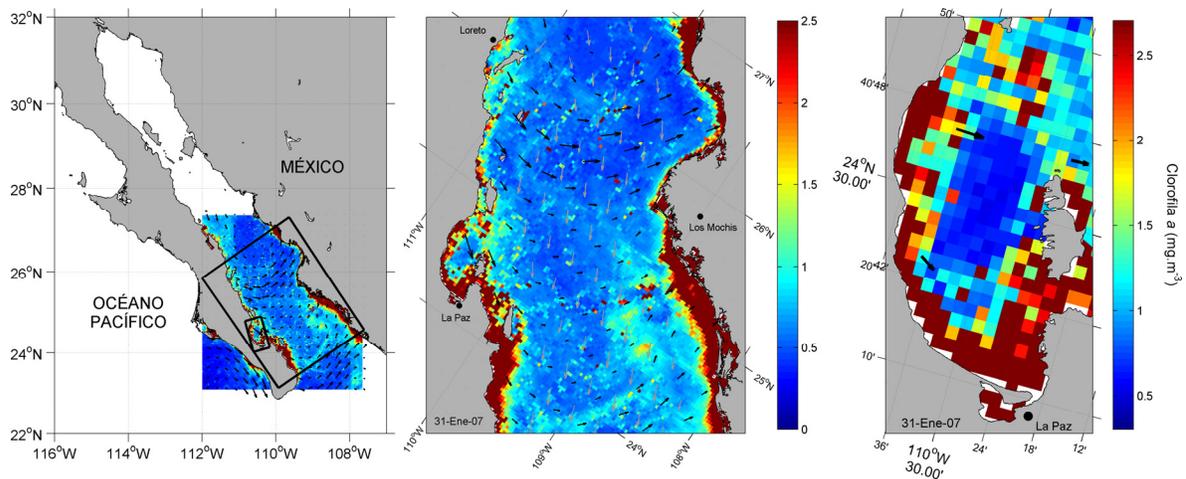


Figura 6. Cuadrantes escogidos para el análisis de la concertación de Cla-S (escala colorimétrica). Se ejemplifica la dirección e intensidad relativa de la corriente geostrófica (flechas negras) y el estrés superficial de viento (flechas grises).

* "RESULTADOS

6.1. Abundancia de cetáceos

En un total de 306 avistamientos se identificaron cuatro especies de mysticetos y seis de odontocetos, siendo los más frecuentes el rorcual azul, el rorcual común y el rorcual tropical (*Balaenoptera edeni*) entre los mysticetos. Entre los odontocetos se destacaron el delfín común, el tursiÓN y el calderÓN de aletas cortas. Aparte de estos, se registraron de manera esporádica el rorcual jorobado, el cachalote enano (*Kogia sima*), la orca (*Orcinus orca*) y el cachalote. Así mismo, se presentaron 18 avistamientos de rorcuales grandes no identificados y 50 avistamientos de delfines no identificados. Entre los odontocetos, los delfines comunes exhibieron los mayores tamaños grupales, seguida del calderÓN y el tursiÓN, mientras que en los mysticetos, el tamaño grupal promedio de todas las especies fue cercano a 1 (Tabla 4; Figura 7).

Tabla 4. Especies de cetáceos registradas. Los valores en paréntesis corresponden a la desviación estándar del tamaño grupal.

| | No. de avistamientos | Tamaño grupal promedio | +/- (D.S.) |
|-----------------------------------|----------------------|------------------------|------------|
| Misticetos | | | |
| <i>Balaenoptera musculus</i> | 34 | 1.2 | (0.4) |
| <i>Balaenoptera physalus</i> | 32 | 1.2 | (0.5) |
| <i>Balaenoptera edeni</i> | 15 | 1.1 | (0.3) |
| <i>Megaptera novaeangliae</i> | 3 | 1.3 | (0.6) |
| Rorcual no identificado | 18 | 1.1 | (0.2) |
| Odontocetos | | | |
| <i>Tursiops truncatus</i> | 80 | 18.9 | (23.1) |
| <i>Delphinus</i> spp. | 49 | 74.7 | (141.5) |
| <i>Globicephala macrorhynchus</i> | 14 | 21.1 | (26.0) |
| <i>Kogia</i> spp. | 8 | 1.2 | (0.5) |
| <i>Orcinus orca</i> | 2 | 4.5 | (0.7) |
| <i>Physeter macrocephalus</i> | 1 | 1 | |
| Delfín no identificado | 50 | 46.6 | (103.6) |
| TOTAL | 306 | | |

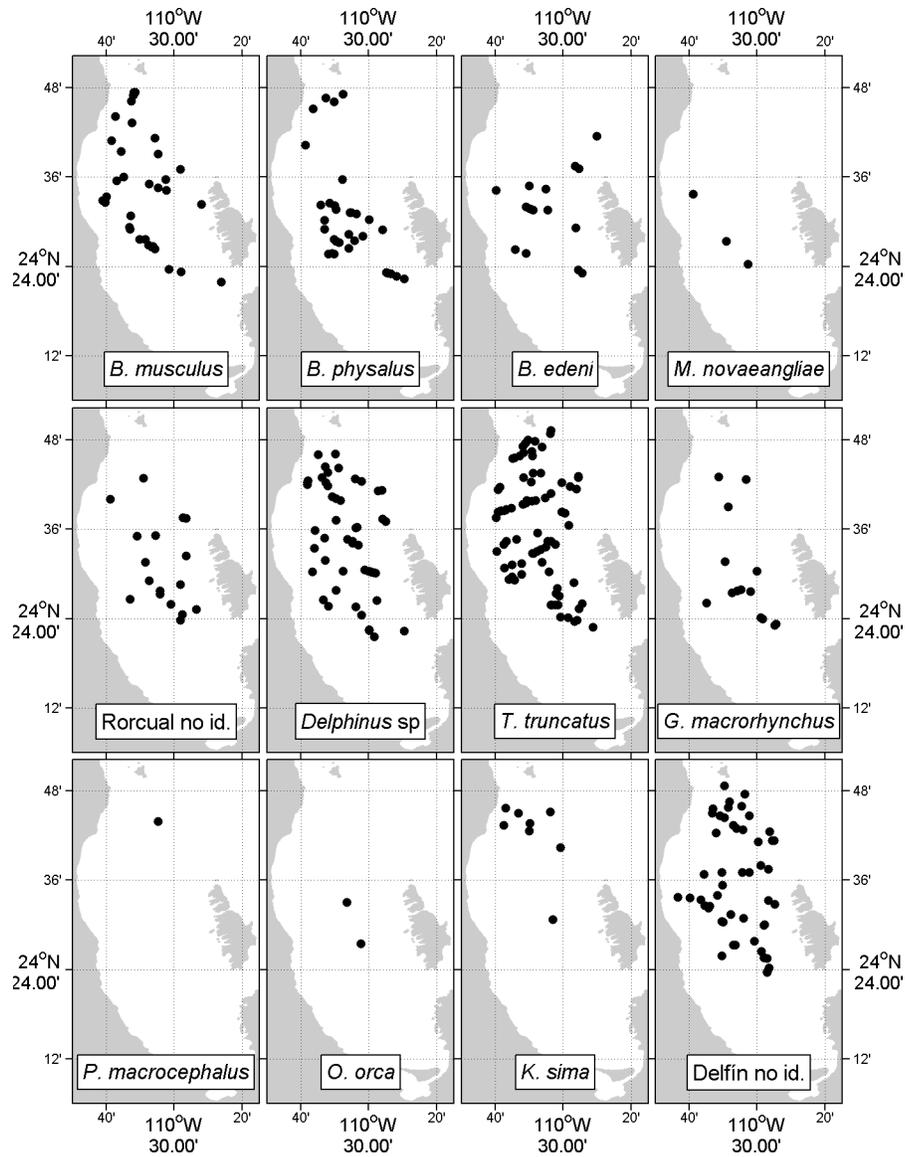


Figura 7. Distribución geográfica de los avistamientos durante el periodo de estudio.

A partir de estos avistamientos y sus respectivas distancias perpendiculares a la línea de transecto, se calculó la función de detección para las seis especies más avistadas. Las distancias perpendiculares de los rorcuales azules fueron juntadas a las de los rorcuales comunes y los rorcuales grandes no identificados, para hacer más robusto el cálculo de la función de detección (método de *pooling*; ver Capítulo 5.1.4). Las distancias de los rorcuales tropicales fueron tratadas por separado, ya que su tamaño corporal y comportamiento en superficie son muy diferentes a las otras dos especies y a los rorcuales no identificados. El tursión presentó un número

suficiente de avistamientos para el cálculo de la función de detección. Los delfines comunes se unieron con los delfines no identificados. Los calderones fueron tratados por separado. Por los pocos avistamientos, se trató de unir a esta última con grupos de tursiones de tamaño similar. Sin embargo, de esta forma las estimaciones presentaron varianzas muy altas y valores puntuales evidentemente sobreestimados.

Las distancias de truncado (w) establecidas a partir de la distribución de frecuencia de las distancias perpendiculares fueron coherentes con las características de tamaño y actividad en superficie de cada especie. Los delfines comunes exhibieron la mayor distancia (3.5km) por presentar mayores tamaños grupales y actividad más notoria en superficie. A estos le siguieron los calderones (2.8km), cuyos tamaños grupales son medianos pero presentan un gran tamaño corporal. Para los rorcuales azules y comunes se determinó la misma distancia (2.3km). El tursión y el rorcual tropical obtuvieron los menores valores (2km). En el caso de la primera, podría deberse a su tendencia de acercamiento a la plataforma de observación, mientras que para la segunda, la distancia puede estar relacionada con su pequeño tamaño y poca actividad en superficie (Figura 8).

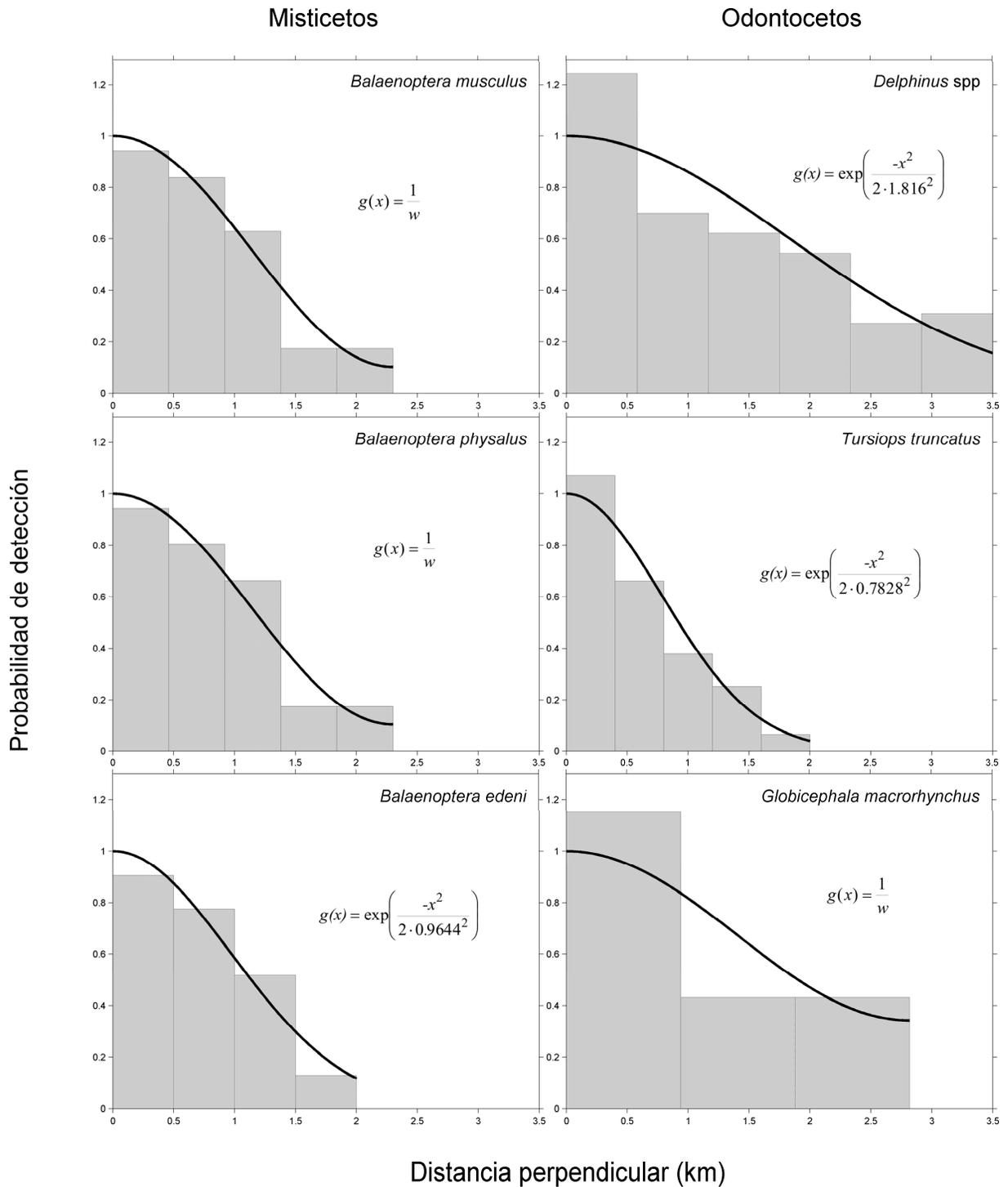


Figura 8. Funciones de probabilidad de detección ($g(x)$; línea negra). w es la distancia de truncado.

A partir del escalamiento a la unidad de la probabilidad de detección, se obtuvo el valor de la probabilidad de densidad de distancias $f(0)$, evaluada desde la línea de transecto para cada especie. Este valor fue incluido finalmente en la ecuación de densidad poblacional. Así mismo, se obtuvo el ancho efectivo de banda (AEB), que es calculado como el inverso de $f(0)$ y se interpreta como una proporción del ancho total de muestreo y representa la distancia a la cual se espera que se detecten todos los grupos (Buckland *et al.*, 2001; Tabla 5). El mayor AEB fue exhibido por los delfines comunes, indicando más dispersión de los avistamientos con respecto a la distancia perpendicular. El menor AEB correspondió a los tursiones, aunque las demás especies presentaron valores similares a esta última, indicando una mayoría de datos cerca de la línea de transecto.

Tabla 5. Parámetros hallados a partir del cálculo de $g(x)$. w es la distancia de truncado *a priori*; $f(0)$ es el valor de probabilidad de densidad de distancias; AEB es el ancho efectivo de banda y %CV es el porcentaje de coeficiente de variación para las estimaciones. Se nombran las funciones y series de expansión usadas para cada especie.

| | w (km) | $f(0)$ | AEB | %CV | Función | Serie de expansión |
|-----------------------------------|----------|---------|---------|-------|--------------|----------------------|
| Misticetos | | | | | | |
| <i>Balaenoptera musculus</i> | 2.3 | 0.78815 | 1.26880 | 5.86 | Uniforme | Coseno |
| <i>Balaenoptera physalus</i> | 2.3 | 0.78817 | 1.26880 | 5.86 | Uniforme | Coseno |
| <i>Balaenoptera edeni</i> | 2.0 | 0.86009 | 1.16270 | 20.40 | Media-normal | Polinomio hermitaño |
| Odontocetos | | | | | | |
| <i>Delphinus spp</i> | 3.5 | 0.46436 | 2.15350 | 8.60 | Media-normal | Polinomio hermitaño |
| <i>Tursiops truncatus</i> | 2.0 | 1.03020 | 0.97072 | 8.63 | Media-normal | Polinomio hermitaño |
| <i>Globicephala macrorhynchus</i> | 2.8 | 0.52880 | 1.89110 | 20.87 | Uniforme | Coseno (1 parametro) |

Luego de transformar las unidades de individuos a peso, se obtuvo el valor de densidad más probable con su respectivo intervalo de confianza al 95% de confiabilidad; basado en el cálculo de la varianza por iteraciones secuenciales (*bootstrap*) (Figura 9). En general, se aprecia una dominancia de los misticetos sobre los odontocetos, especialmente en el caso de los rorcuales azules y sobre las demás especies. Sin embargo, hay momentos del año en los que la densidad de delfines comunes se acercó a las biomásas de los misticetos, superando incluso a los

rorcuales tropicales, aunque esto sólo se presentó en un muestreo en el invierno de 2007-2008. El rorcual azul exhibió en Febrero-08 la mayor densidad entre los cetáceos, con 5.8 ton.km^{-2} , lo cual equivale aproximadamente a un individuo cada 31km^2 . A este valor, le siguió la abundancia de delfines comunes, registrada en Enero-08, con un pico de 3.5 ton.km^{-2} , equivalente a unos 17 individuos cada kilómetro cuadrado.

Fueron evidentes tres momentos en los que se presentaron aumentos en las abundancias de los misticetos. El primero se registró en primavera, entre mediados de Abril-07 y mediados de Junio-07, dominado por el rorcual azul, quien apareció anteriormente en invierno de 2007. Luego, a mediados de primavera aparecieron los rorcuales común y tropical con biomasa menores. Los rorcuales azules no volvieron a ser registrados hasta Febrero-08, siendo esa la biomasa más alta del periodo de estudio. Por su parte, los rorcuales común y tropical, presentaron otro periodo importante desde finales de verano hasta finales de otoño. Para estas especies, fue posible seguir dos picos completos desde su inicio hasta su final. La tendencia del rorcual tropical siguió el mismo patrón que el rorcual común, ya que se registró y dejó de registrarse en los mismos periodos, pero sus valores máximos presentaron un desfase temporal. Las tres especies de misticetos reaparecieron en el segundo periodo de invierno (Febrero-08) (Figura 9).

Las tendencias entre los odontocetos fueron más disímiles. Aunque los delfines comunes presentaron el mayor valor de biomasa en el segundo invierno, sólo este valor destaca sobre las otras especies en todo el periodo de estudio. Aunque el resto del año se presentó de manera más o menos estable, durante todas las estaciones, sus biomasa estuvieron por debajo de los otros dos odontocetos. El tursión se registró durante casi todo el periodo de estudio, excepto en Febrero-07 y Diciembre-07, pero su periodo más importante fue durante primavera y verano. Los calderones solo se presentaron en dos periodos a finales de verano e inicios de otoño (Figura 9).

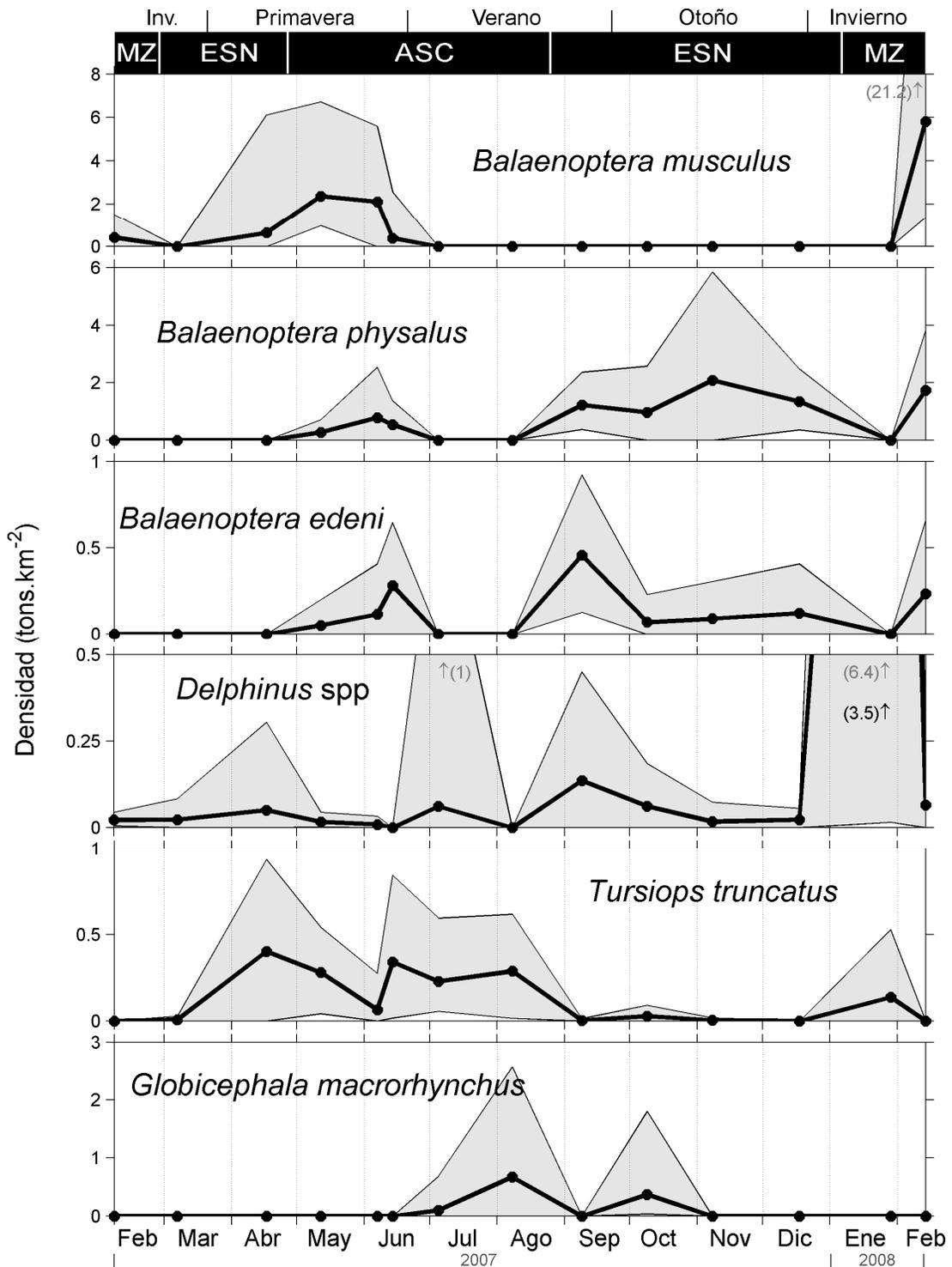


Figura 9. Biomasa de los cetáceos más frecuentes sobre Cuenca Alfonso. Las áreas sombreadas en gris representan el intervalo de confianza de la densidad con un 95% de confiabilidad. (●) representa el valor puntual de la estimación. Se indican las condiciones predominantes de la columna de agua (Capítulo 6.2.1): mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC).

Para aquellas especies con aparición esporádica y pocos avistamientos, no fue posible calcular una función de detección, por lo que se calculó un índice de abundancia relativa al esfuerzo de muestreo (kg.km^{-1}). El rorcual jorobado se presentó solo durante el primer invierno. El cachalote sólo se registró a finales de verano, con el avistamiento de un macho adulto. Las orcas fueron avistadas en dos ocasiones en invierno y mediados de otoño. A diferencia de las anteriores especies, el cachalote enano fue más recurrente, exhibiendo cuatro picos a lo largo del año. Uno en cada invierno evaluado, uno durante la transición entre primavera y verano, y otro a inicios de otoño (Figura 10).

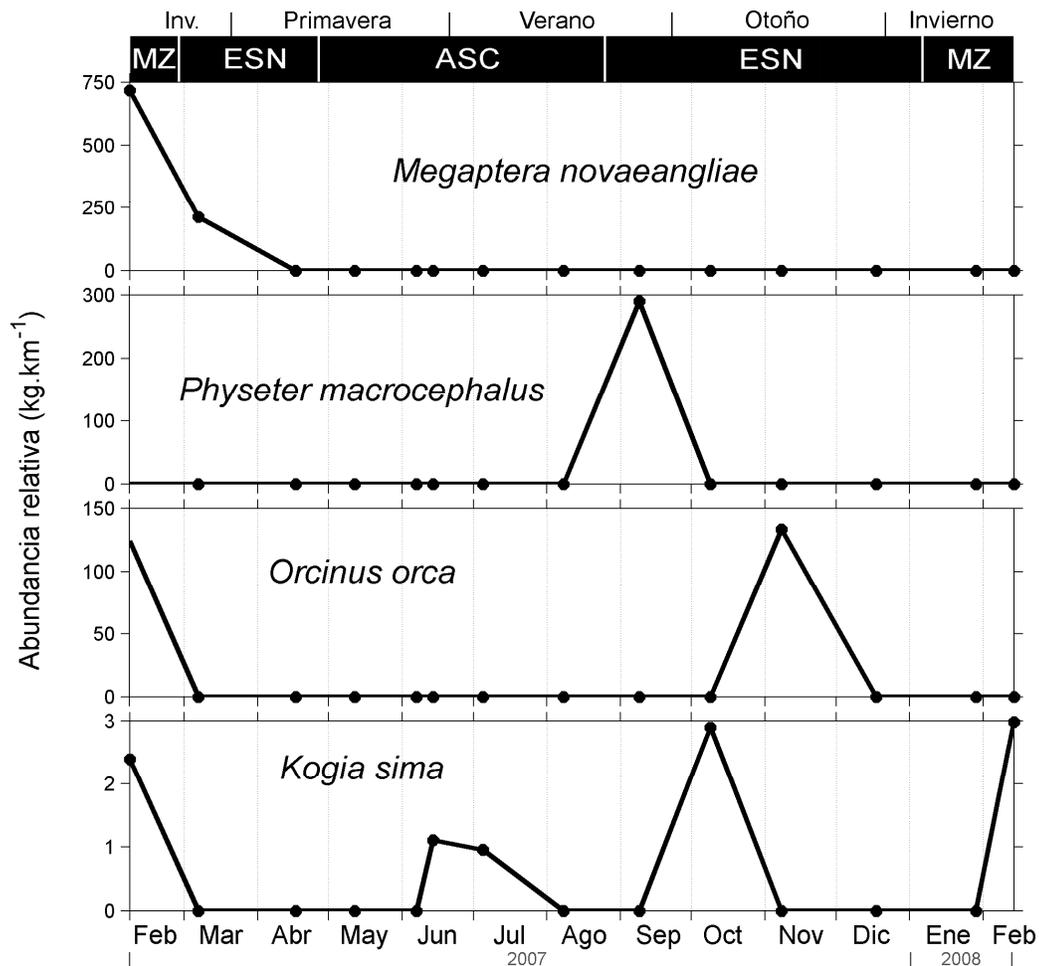


Figura 10. Abundancia relativa de las especies menos frecuentes. Se indican las condiciones predominantes de la columna de agua (Capítulo 6.2.1): mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC).

6.2. Columna de agua

6.2.1. Estructura física

Los 14 perfiles de temperatura a lo largo del año (Figura 11), reflejaron cambios evidentes en el grado de estratificación y mezcla del agua en la columna superior sobre la Cuenca, así como incrementos y decrementos estacionales en los valores cercanos a la superficie. La temperatura varió entre los 10.0 y 28.3°C a lo largo de la columna. Los menores valores superficiales se registraron en Febrero-07, Enero-08 y Febrero-08; mientras que los mayores tuvieron lugar entre Agosto-07 y Noviembre-07. La parte superior de la columna fue relativamente homogénea entre Febrero-07 y Abril-07. Luego, se evidenció un proceso de estratificación, intensificado entre Mayo-07 y Noviembre-07. Nuevamente, entre Diciembre-07 y Febrero-08, se presentaron condiciones homogéneas. Debido a problemas logísticos en algunos lances, no todos los perfiles de temperatura tuvieron un correspondiente en salinidad. Sin embargo, en aquellos disponibles, el comportamiento de la variable reflejó también un cambio temporal. Los valores de salinidad variaron entre 33.9 y 35.4UPS. Los mayores se presentaron entre Diciembre-07 y Febrero-08 y los menores, correspondieron a salinidades bajas a una profundidad cercana a 10m en Junio-07 y Julio-07. Para el resto de los muestreos no hubo cambios drásticos evidentes en la salinidad a lo largo de la columna. En los muestreos en los que fue posible, se calculó la densidad del agua a partir de la temperatura y salinidad. El comportamiento de esta variable es consistente con el patrón detectado para la temperatura, lo cual sugiere una estructura física determinada por los cambios en esta última variable, más que en la salinidad.

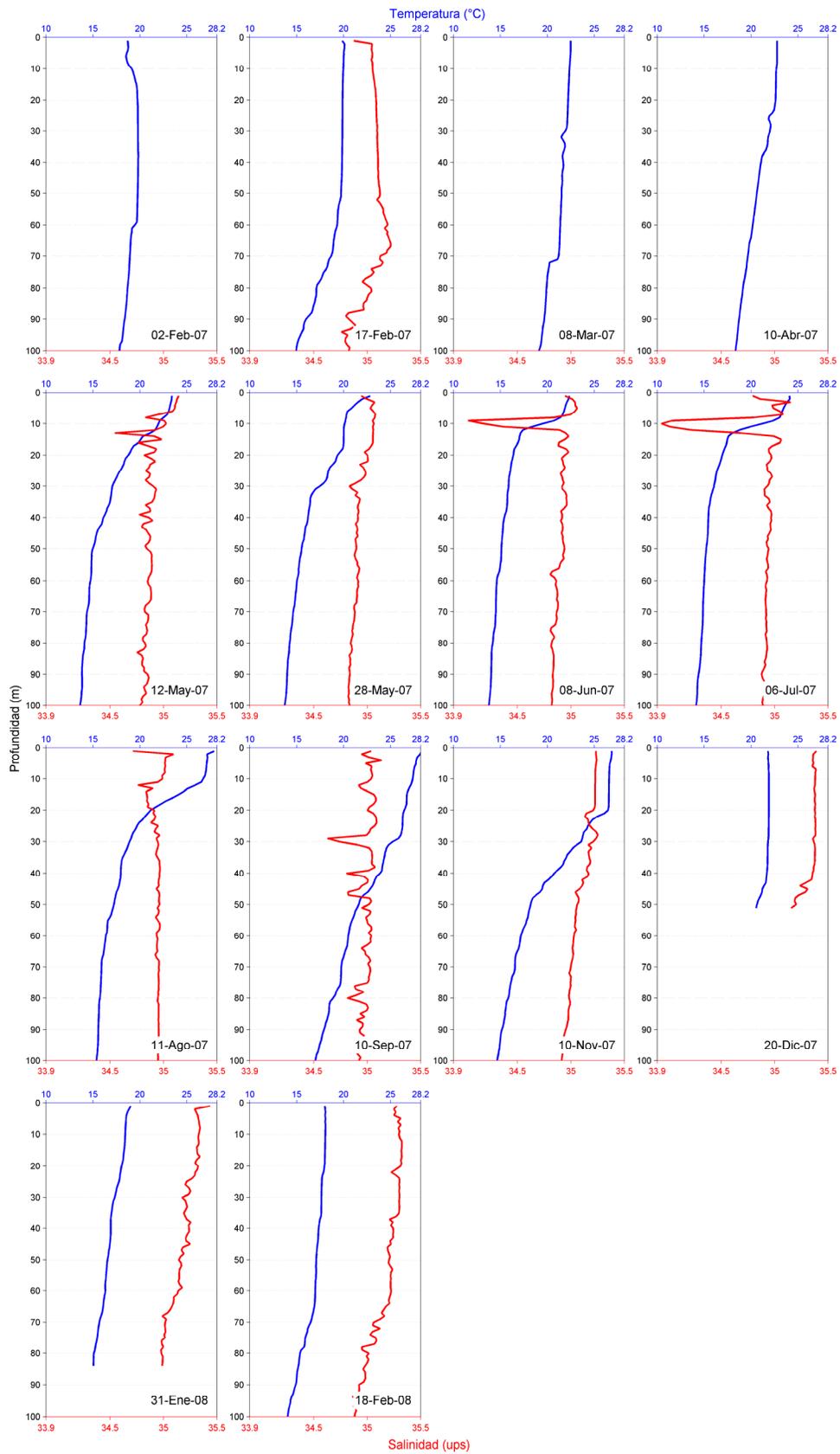


Figura 11. Perfiles de temperatura y salinidad sobre Cuenca Alfonso (Feb/07-Feb/08).

Las tendencias detectadas a partir de estas variables, sugieren la presencia de tres condiciones predominantes. Durante Febrero-07 y entre Enero-08 y Febrero-08, se presentaron condiciones de **mezcla (MZ)** en la columna de agua, con temperaturas alrededor de los 19°C en los primeros 70m y de 15 a 17°C a partir de los 60m respectivamente. La capa de mezcla fue muy profunda en este periodo, y no se evidencia una termoclina muy marcada. Durante Marzo-07 y Abril-07, la columna de agua sufrió una leve **estratificación (ESN)**, profundización de la capa de mezcla y un ligero calentamiento de la columna de agua sobre la termoclina, llegando a los 23°C cerca de la superficie. Luego, durante el periodo entre Mayo-07 y gran parte de Agosto-07 se presentó un fenómeno de **ascenso de agua profunda (ASC)**. Aunque la columna de agua se mantuvo estratificada durante este periodo, la termoclina se hizo más somera, dejando una estrecha capa de mezcla. Bajo esta, se presentaron temperaturas de hasta 16°C a escasos 10m de profundidad. Una vez que se relajó este ascenso, a finales de Agosto-07, volvieron a presentarse condiciones de estratificación (ESN), se profundizó de nuevo la capa de mezcla y hubo un aumento considerable de la temperatura superficial, que llegó hasta los 28°C. A partir de Enero-08 hasta Febrero-08 se registraron nuevamente condiciones de mezcla (MZ) (Figura 12).

El comportamiento temporal de la densidad en la columna de agua fue consistente con el patrón descrito para la temperatura, estando asociados los mayores valores a aguas más frías. Las densidades más altas fueron detectadas entre Febrero-07 y Julio-07, especialmente a inicios de Junio-07 y Julio-07, cuando las aguas más densas alcanzaron los 25m de profundidad y abarcaron la mayor parte de la columna superior (Figura 12). Luego, entre Agosto-07 y Diciembre-07, la densidad de la capa superior disminuyó con el aumento de la temperatura. El segundo periodo de alta densidad se registró desde Diciembre-07 hasta Febrero-08, cuando se observaron valores de 25.5 a 26 δ -t a lo largo de toda la capa superior.

La salinidad por su parte, marcó un periodo de valores altos (>35UPS) durante Febrero-07 en la parte superior de la columna, hasta los 75m. Entre Mayo-07 y Julio-07, se observó de manera sostenida la presencia de aguas por debajo de los 34.4UPS, a unos 10m de profundidad. A partir de Septiembre-07 la salinidad aumentó, hasta alcanzar los valores más altos entre Diciembre-07 y Febrero-08 (35.3UPS). A partir de los mapas de contorno, se hizo evidente que la temperatura fue la variable que mejor describió la estructura física de la columna, ya que la resolución temporal de los muestreos fue mayor y los gradientes fueron claramente definidos; siendo estos consistentes con el patrón hallado para la densidad (Figura 12).

A partir de los rangos de salinidad y temperatura descritos para las masas de agua presentes en el Golfo de California y las costas de Baja California por Álvarez-Borrego y Schwartzlose (1979), Monreal-Gómez *et al.* (2001) y Durazo y Baumgartner (2002), se construyó un diagrama de temperatura-salinidad (T-S; Figura 13). Según este, bajo condiciones de mezcla estuvo presente en mayor medida el Agua del Golfo de California (AGC) que se forma hacia el norte. En condiciones estratificadas adquirió especial importancia el Agua Subtropical Superficial (AStS), así como el AGC. Aunque durante el periodo de ascenso de agua profunda se presentaron estas dos masas de agua, también se registró Agua de Transición (AT) entre el AStS y el Agua Sub-Ártica (ASA), también llamada de la Corriente de California. En los primeros metros de la columna estuvo presente durante todos los periodos el Agua Ecuatorial Sub-superficial (AESs). En ninguno de los periodos fue registrada la influencia de Agua Tropical Superficial (ATS).

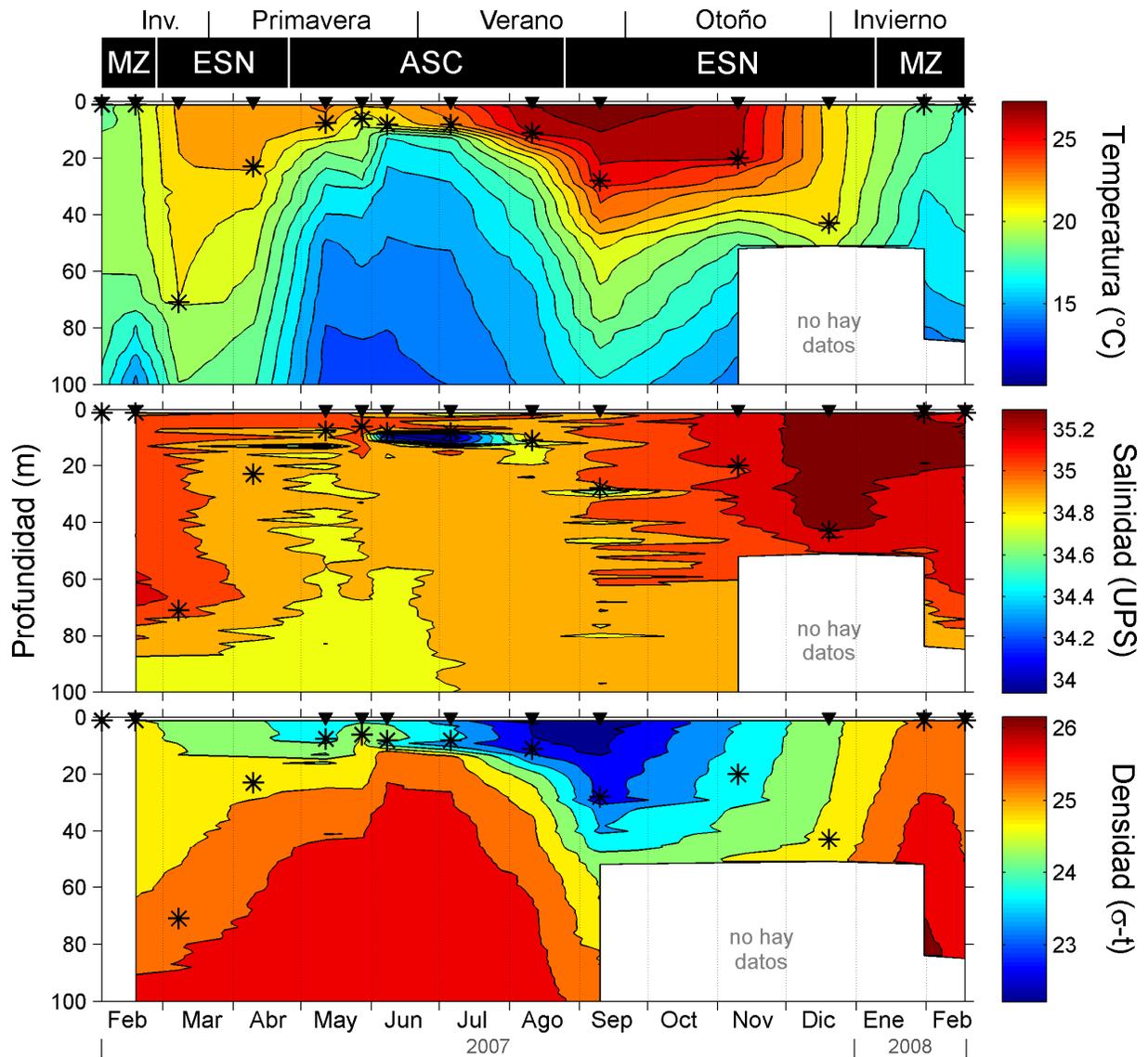


Figura 12. Estructura física temporal de la columna de agua. Se indican las condiciones predominantes: mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC). Se indican la profundidad de la capa de mezcla (límite superior de la termoclina; asterisco) y las fechas de muestreo (▼).

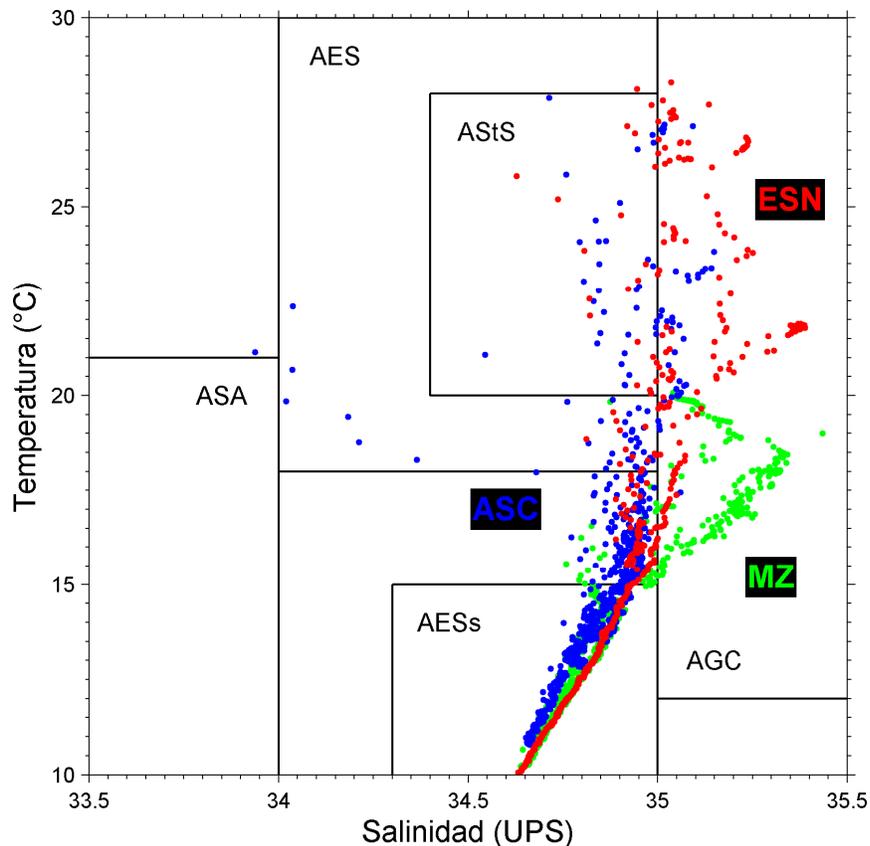


Figura 13. Diagrama T-S. Masas de agua presentes durante las condiciones dominantes en la estructura de la columna de agua. AStS: Agua Sub-tropical Superficial, AGC: Agua del Golfo de California, AESs: Agua Ecuatorial Sub-superficial, AES: Agua Ecuatorial Superficial, ASA: Agua Sub-Ártica.

Los mayores cambios en el nivel de penetración de la luz se dieron en los primeros 70m de la columna de agua (Figura 14). Se presentaron tres momentos de mayor incidencia: en Febrero-07, entre Abril-07 y Mayo-07, y entre Septiembre-07 y Diciembre-07. Las condiciones de penetración reducida se presentaron en Marzo-07 y entre Mayo-07 y Julio-07. Como se discutirá más adelante, este patrón de penetración de la luz y la profundidad de la capa eufótica, puede estar ligado a la actividad fitoplanctónica, indicada por la concentración de clorofila-a en la columna de agua.

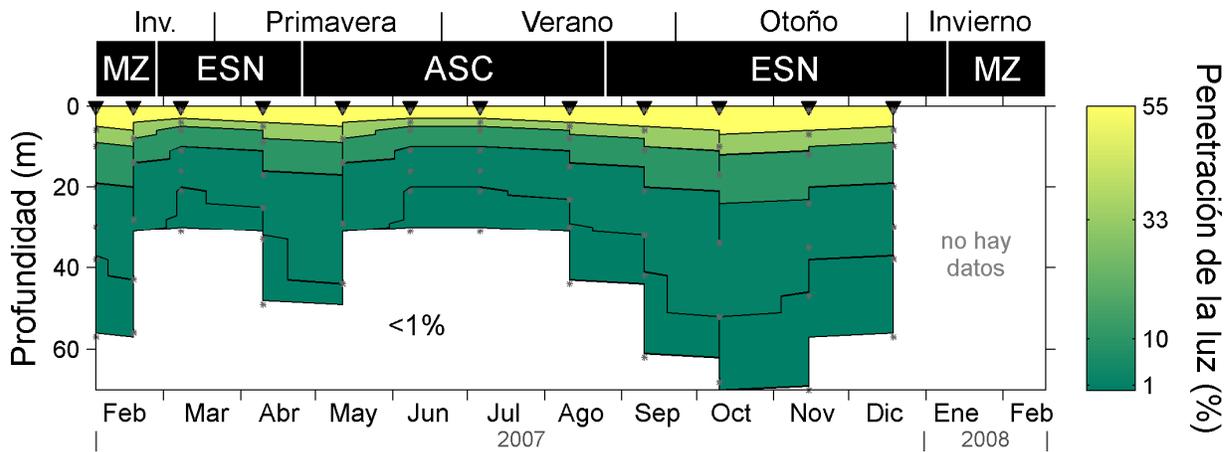


Figura 14. Patrón temporal de la penetración de la luz sobre Cuenca Alfonso. En la parte superior se encuentran las condiciones dominantes de la columna de agua: mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC). Se indican las profundidades de los niveles de penetración (asteriscos grises) y las fechas de muestreo (▼).

6.2.2. Nutrientes

El patrón temporal de la concentración de los tres grupos de nutrientes a lo largo de la columna de agua fue similar entre sí, y los mayores cambios se registraron en los primeros 60m (Figura 15). En Febrero-07, se registraron valores medios y altos a lo largo de toda la columna de agua. Las concentraciones disminuyeron ligeramente en Marzo-07 en la columna superior. Luego, entre Abril-07 y Agosto-07 se detectó un aumento de la concentración en forma de 'domo', cuyo límite superior se ubicó alrededor de los 15m entre Junio-07 y Julio-07. Este límite estuvo marcado por un gradiente abrupto (nutriclina) hacia concentraciones más bajas cerca de la superficie. En el caso del PO_4 , sobre este domo se presentó otro pico de concentración alta (1.5 a $2\mu M$) cerca de la superficie en Mayo-07.

Entre Agosto-07 y Diciembre-07, la concentración de nutrientes disminuyó a lo largo de toda la columna, presentándose los valores más bajos. Una excepción fue el nitrógeno inorgánico disuelto (NID), que presentó concentraciones altas (12 a $16\mu M$) por debajo de los 30m entre Septiembre-07 y Octubre-07, las cuales se extendieron como valores medios (NID; 6 a $8\mu M$) hasta la superficie. A partir de Diciembre-07, se

observaron concentraciones altas y medias a lo largo de toda la columna con algunos picos a diferentes profundidades. Este comportamiento marcó tres condiciones generales que coinciden temporalmente con los periodos hallados a partir de la estructura física de la columna de agua: Dos periodos de altas y medias concentraciones a lo largo de toda la columna superior, coincidiendo con las condiciones de mezcla (MZ), dos periodos de bajas concentraciones en gran parte de la columna agua, cuando se presentaron condiciones de estratificación y capa de mezcla profunda (ESN), y un periodo de inyección de nutrientes en altas concentraciones hacia capas superficiales durante el ascenso de agua profunda (ASC).

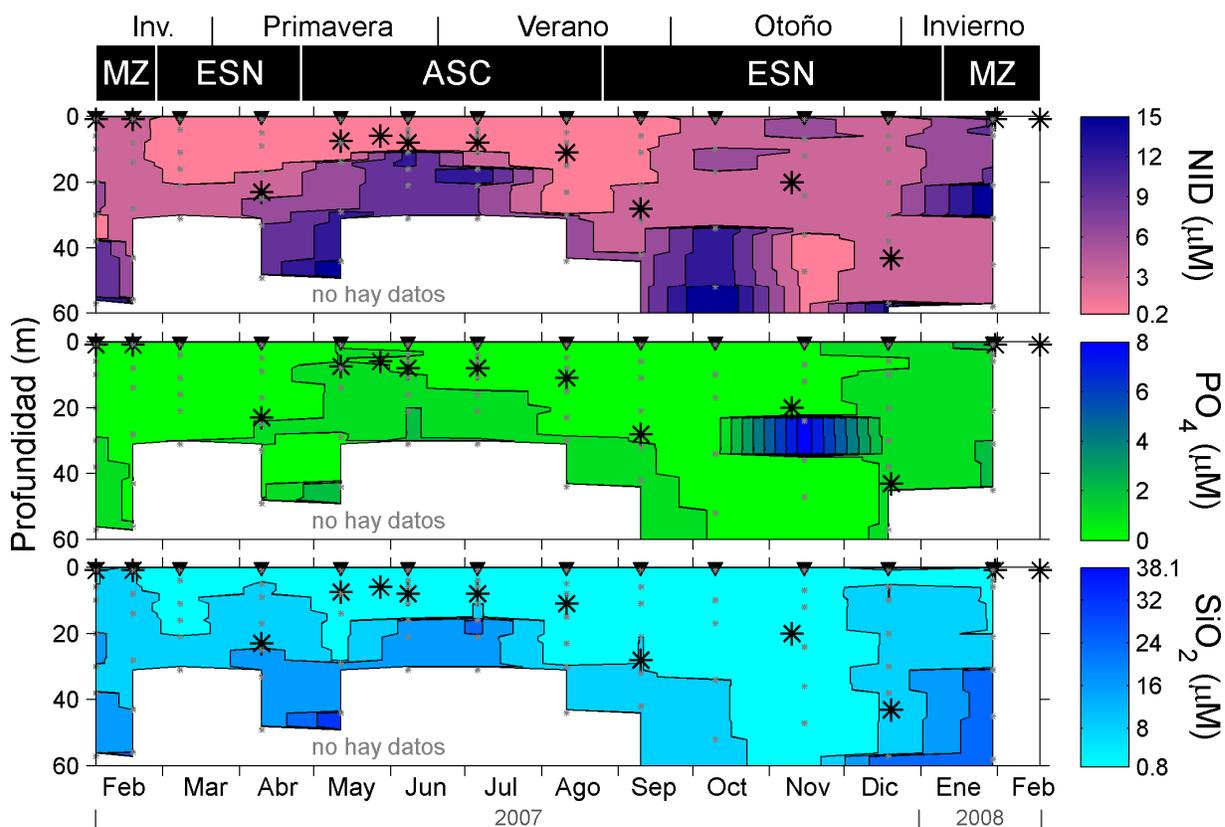


Figura 15. Concentración de nutrientes en la columna de agua. En la parte superior se encuentran las condiciones físicas dominantes: mezcla (MZ), estratificación con capa de mezcla profunda (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC). Se indican las profundidades de las muestras (puntos grises), fechas de muestreo (▼) y la profundidad de la capa de mezcla (asteriscos negros).

6.3. Respuesta biológica

6.3.1. Clorofila-a

El comportamiento de la concentración de clorofila-a fue acorde con los periodos definidos por la estructura física de la columna. Durante los periodos de mezcla (MZ), se presentaron concentraciones altas y medias en un amplio rango de la columna, desde la superficie hasta al menos 40m. En los periodos de estratificación y capa de mezcla profunda (ESN), las concentraciones disminuyeron, reflejando condiciones más oligotróficas. El periodo de ascenso de agua profunda (ASC) estuvo marcado por la aparición de agregaciones superficiales y subsuperficiales de clorofila-a, presentándose los mayores valores del periodo de estudio a profundidades de hasta 40m (Figura 16).

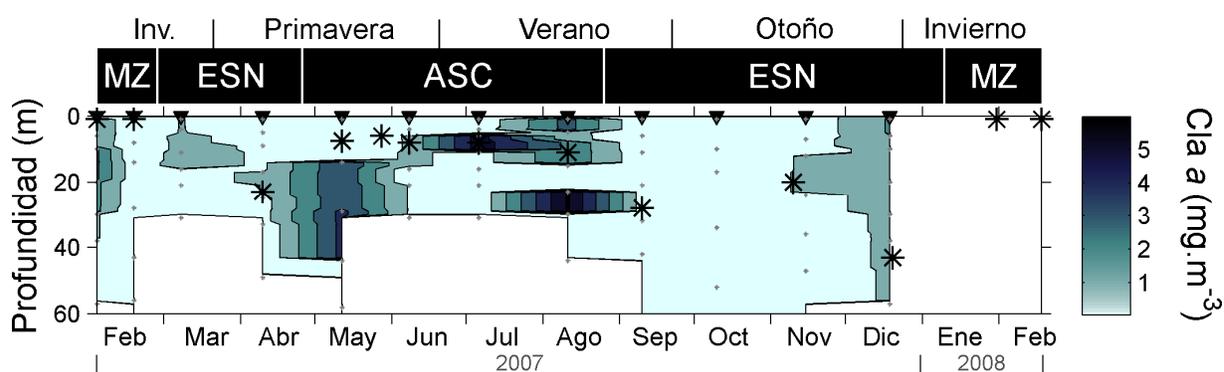


Figura 16. Concentración de Clorofila-a en la columna de agua. En la parte superior se encuentran las condiciones físicas dominantes: mezcla (MZ), estratificación (ESN) y ascenso de agua profunda (ASC). Se indica la profundidad de las muestras (puntos grises), la profundidad de la capa de mezcla (asteriscos negros) y las fechas de los muestreos (▼).

6.3.2. Material particulado en hundimiento (MPH)

Mediante un análisis previo se determinó que prácticamente todos los flujos de diferentes tipos de material particulado en hundimiento, presentaron un patrón temporal virtualmente igual al flujo total de material. Incluso separando la fracción litogénica del flujo, el material biogénico particulado (MBP) siguió un flujo similar. Este se caracterizó por presentar dos picos al inicio de cada periodo de estratificación (ESN), un leve incremento durante la temporada de ascenso de agua

profunda (ASC) y un gran incremento al final del segundo periodo de estratificación (Figura 17).

Ya que la magnitud de este flujo no parece reflejar la temporalidad estacional observada en la estructura física de la columna de agua y los efectos hasta ahora vistos en los nutrientes y clorofila-*a*, se decidió examinar los contenidos porcentuales dentro del MBP. Los contenidos porcentuales de ópalo, mostraron un patrón diferente (Figura 17). No todos los aumentos en el flujo total de MBP correspondieron a altos valores porcentuales de ópalo. El contenido de ópalo fue alto durante el primer periodo de estratificación y todo el periodo de ascenso. El patrón de este material fue inverso al CaCO_3 . Durante el segundo periodo de estratificación, el sílice disminuyó sensiblemente, mientras que el CaCO_3 se mostró dominante durante este periodo. En condiciones de mezcla (Diciembre-07 a Febrero-08) el ópalo volvió a dominar en los contenidos de MBP (Figura 17). El flujo de exopolímeros transparentes (EPT), material que agrega la nieve marina (expresado en términos de equivalentes de goma de xantano (EqXG)), fue muy importante durante el periodo de ascenso y en menor medida durante la transición entre el segundo periodo de estratificación y la mezcla. Por su parte, el contenido de carbono orgánico en el MBP se mantuvo estable a lo largo del año, sugiriendo una producción biológica importante, que se refleja en los constituyentes de los flujos a lo largo del año (Figura 17).

6.3.3. Zooplancton

El flujo de pelotillas fecales de zooplancton presentó un comportamiento diferente entre tamaños. Este, fue ampliamente dominado por las pelotillas pequeñas, entre 0.04 y 0.12mm de diámetro, cuyos máximos valores superaron hasta por un orden de magnitud a las pelotillas medianas (0.13 a 0.32mm), seguidas por las grandes (0.13 a 0.48mm). Hubo cambios drásticos en los flujos en pocas semanas, incluso de una semana a otra, y se presentaron picos de mayor flujo sin un aumento progresivo aparente para los tres rangos de tamaño. El flujo de la mayoría de pelotillas (pequeñas y medianas) fue mucho mayor durante el periodo de transición entre la

época de mezcla y durante el primer periodo de estratificación. Sin embargo, esto no sucedió con las pelotillas grandes, cuyos máximos valores se presentaron a finales del segundo periodo de estratificación y segundo periodo de mezcla (Figura 18).

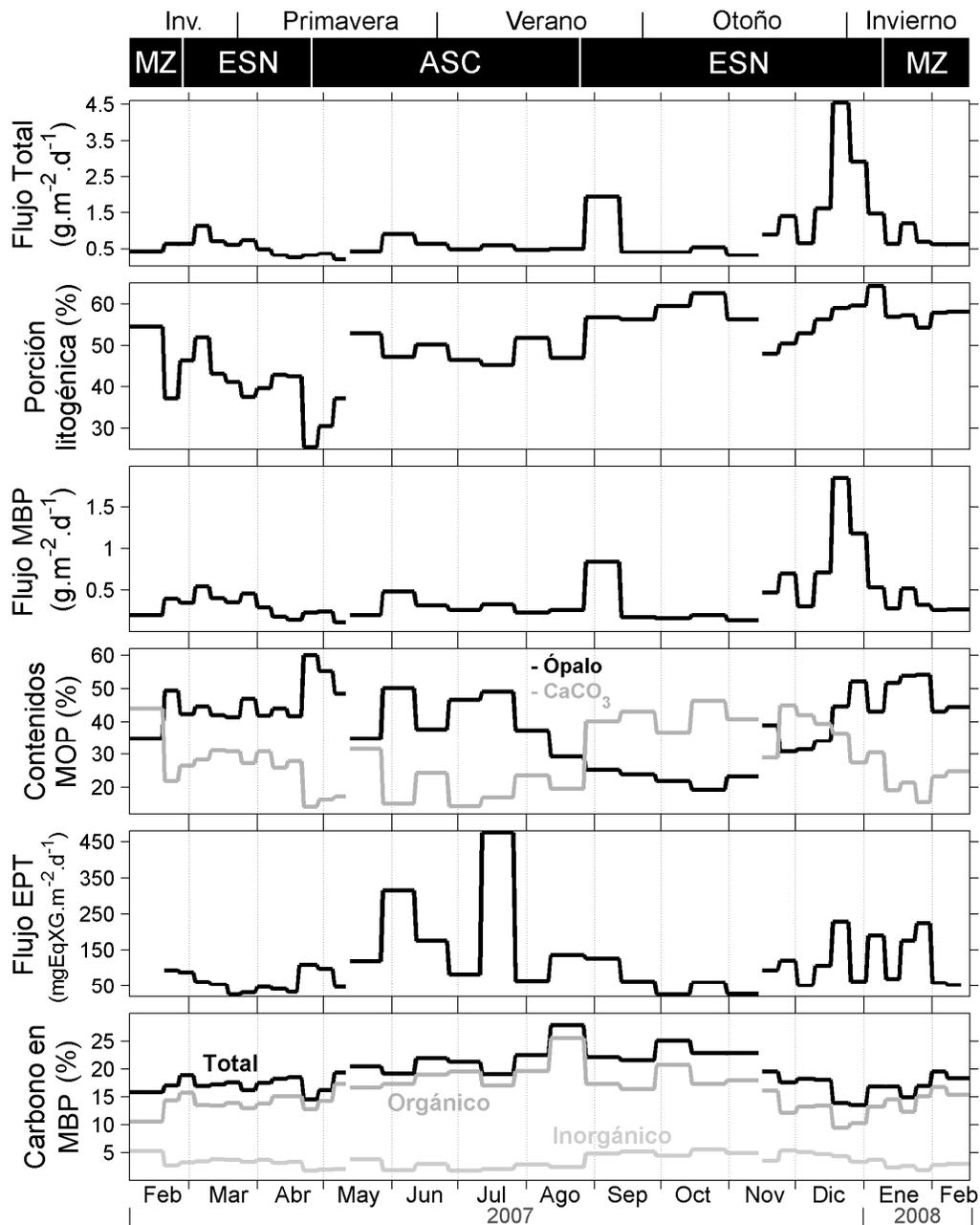


Figura 17. Material particulado en hundimiento. Se presenta el flujo total de material, su porción litogénica y biogénica. Basado en el flujo de MBP, se muestran las proporciones de ópalo, carbonato de calcio, carbono total, orgánico e inorgánico. En la parte superior se muestran las condiciones e la estructura física de la columna de agua.

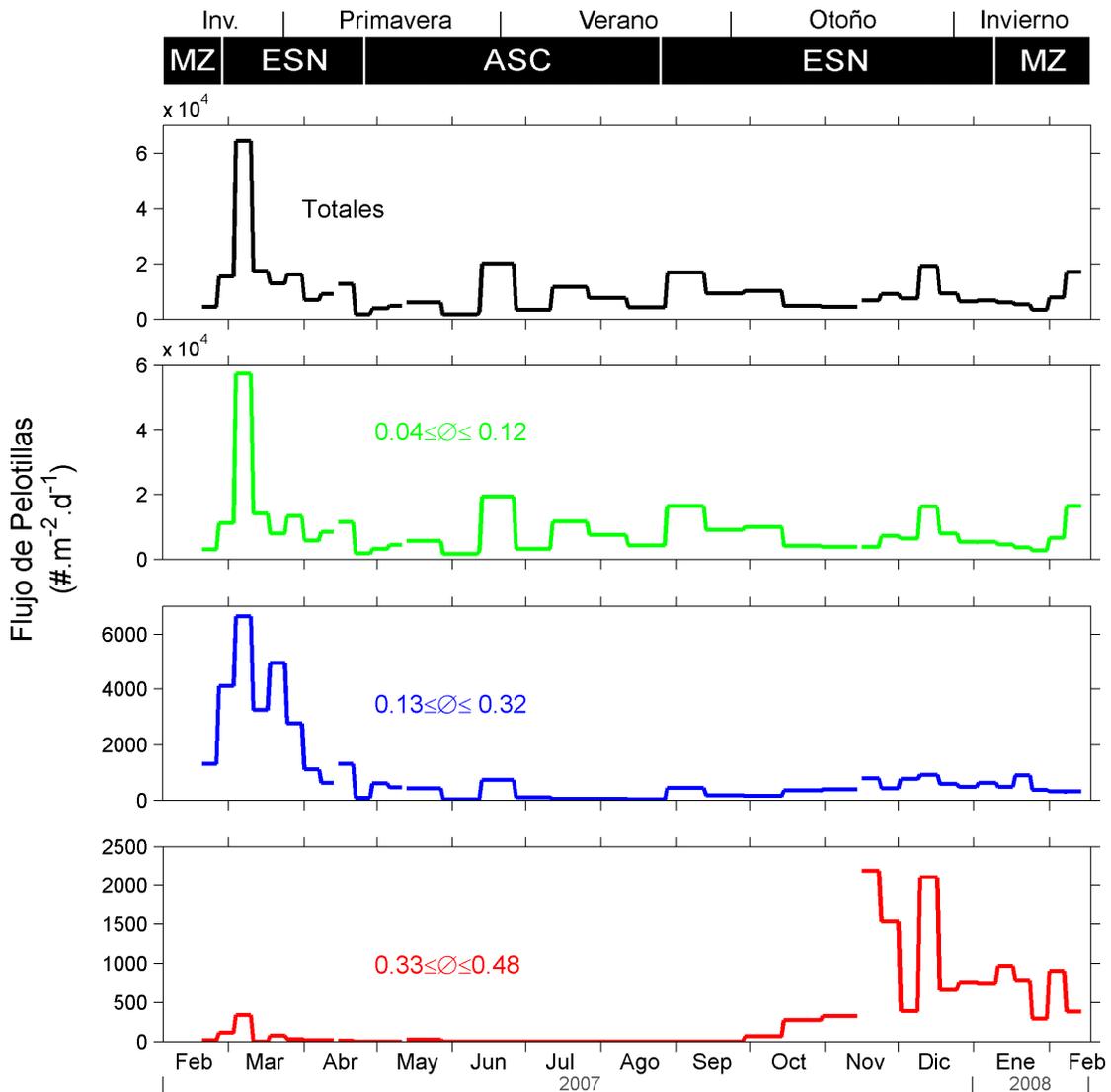


Figura 18. Flujo de pelotillas fecales de diferentes diámetros (\emptyset) sobre Cuenca Alfonso. Los recuadros superiores indican las condiciones físicas dominantes en la estructura física de la columna de agua.

Se contó también con información de densidad de eufáusidos en muestreos esporádicos durante el periodo de estudio tomados por el Departamento de Plancton y Ecología Marina de CICIMAR-IPN (N. Romero-Ibarra, *datos sin publicar*, 2009). Ya que su resolución temporal es baja, no es mucho lo que se puede concluir sobre el comportamiento temporal de la abundancia de eufáusidos. Sin embargo, es evidente que las mayores densidades se presentaron durante las épocas de mezcla, en

contraste con los bajos valores en el periodo de ascenso y estratificación. Aunque los datos de pelotillas fecales de mayor diámetro tienen una resolución temporal mucho más alta y los datos no son estrictamente comparables, no parece haber una correspondencia entre los picos temporales de las variables. Mientras que las pelotillas mostraron su mayor incremento en condiciones estratificadas, la densidad de eufáusidos lo exhibió en condiciones de mezcla. De hecho, las mayores densidades de eufáusidos que se han registrado sobre la Cuenca desde 2004, se presentaron en los meses de Febrero de 2007 (11.9org.m^{-3}) y Febrero de 2008 (15.4org.m^{-3}), usando redes de $300\mu\text{m}$ (Figura 19).



Figura 19. Biovolumen de eufáusidos sobre Cuenca Alfonso. Se muestran los valores para dos tamaños de poro de red y el total.

6.4. Cuenca Alfonso en el suroeste del Golfo de California

6.4.1. Clorofila-a superficial

La concentración de clorofila-a superficial (a partir de información satelital) fue muy variable a lo largo del año en el sur del Golfo de California, especialmente del lado de la costa occidental. Durante los meses de Febrero-07 y Marzo-07 se presentaron valores máximos de 4.0 y 5.0mg.m^{-3} . Luego, entre Abril-07 y Mayo-07, las máximas estuvieron entre 2.0 y 3.5mg.m^{-3} ; mientras que en Junio-07 y Julio-07, se mantuvieron estables alrededor de 2.5mg.m^{-3} . En Agosto-07 la concentración máxima varió entre los 2.0 y 1.0mg.m^{-3} y el periodo de Septiembre-07 a Noviembre-07 presentó las concentraciones más bajas, manteniéndose entre 1.0 y 1.7mg.m^{-3} . En Diciembre-07 las concentraciones máximas aumentaron rápidamente hasta

alcanzar los 5.0mg.m^{-3} . Enero comenzó con valores alrededor de los 2.5 hasta alcanzar 4.5mg.m^{-3} y luego, en Febrero-08, las concentraciones máximas variaron entre 3.5 y 4.3mg.m^{-3} .

A partir del análisis de las imágenes, se identificaron tres condiciones principales en cuanto a zonificación de la Cla-S en el centro del Golfo y la costa occidental. Independientemente de los rangos de valores que adoptó la variable a lo largo del periodo de estudio, hubo momentos en los que toda o gran parte de la costa occidental presentó concentraciones relativamente más altas que el centro del Golfo. En otras ocasiones, la Bahía de La Paz exhibió valores más altos con respecto a la costa occidental y el centro. Una tercera situación corresponde a los momentos en los que tanto la costa occidental, la Bahía y el centro del Golfo presentaron concentraciones bajas o medias. Con estas categorías definidas, se caracterizó el comportamiento temporal de la concentración del Cla-S en las tres zonas: Bahía de La Paz, la costa oeste del Golfo y el centro del Golfo (Figura 20). La Bahía de La Paz se mantuvo durante gran parte del año con concentraciones relativamente más altas que el resto de la costa occidental y aún más que el centro del Golfo, el cual se mantiene oligotrófico con respecto a sus costas la mayoría del tiempo.

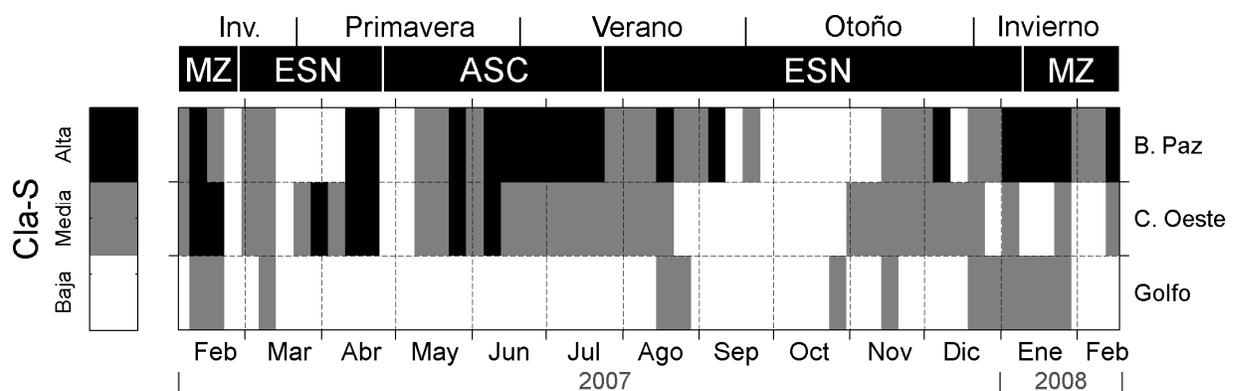


Figura 20. Concentración relativa de clorofila-a superficial en tres zonas del suroeste del Golfo de California. Las categorías en la escala son relativas al rango de valores de la variable en cada periodo. En la parte superior se muestran las condiciones físicas de la columna de agua sobre la Cuenca.

Entre el primer periodo de mezcla y la mitad del periodo de ascenso, la Bahía de La Paz y la costa occidental se comportaron de forma sincronizada, excepto por un periodo entre la tercera semana de Marzo-07 y la primera semana de Abril-07, cuando la costa occidental presentó concentraciones relativamente más altas que la Bahía. Durante el resto del periodo de ascenso y la mitad del segundo periodo de estratificación, la Bahía exhibió valores relativamente más altos que la costa occidental y el centro del Golfo.

Entre finales de Septiembre-07 e inicios de Noviembre-07, durante el periodo de estratificación, se presentaron condiciones oligotróficas en la Bahía; con un retraso de un mes con respecto a condiciones similares en la costa occidental y el centro del Golfo. Este periodo de baja actividad fitoplanctónica fue más corto dentro de la Bahía, tras el cual, los valores aumentaron a finales de Noviembre-07. Desde ese momento y durante todo el periodo de mezcla, la Bahía presentó en general valores relativamente más altos de Cla-S que la costa occidental, cuyas condiciones variaron entre concentraciones medias y bajas durante dicho periodo.

En resumen, la Bahía de La Paz presentó tres periodos en los cuales su concentración de Cla-S fue más alta en relación a la costa occidental y el centro del Golfo. El primero fue un periodo corto en Febrero-07, cuando tanto la Bahía como la costa occidental presentaron valores altos y medios (Figura 21a). Luego, entre mediados de Abril-07 e inicios de Septiembre-07, se comportó de forma independiente a la costa occidental, presentando altas concentraciones relativas con respecto a los valores medios en la costa occidental y las condiciones oligotróficas del el centro del Golfo (Figura 21b). Luego de un periodo de concentraciones bajas en las tres zonas (Figura 21c), la Bahía exhibió altos valores entre Diciembre-07 y Febrero-08 (Figura 21d).

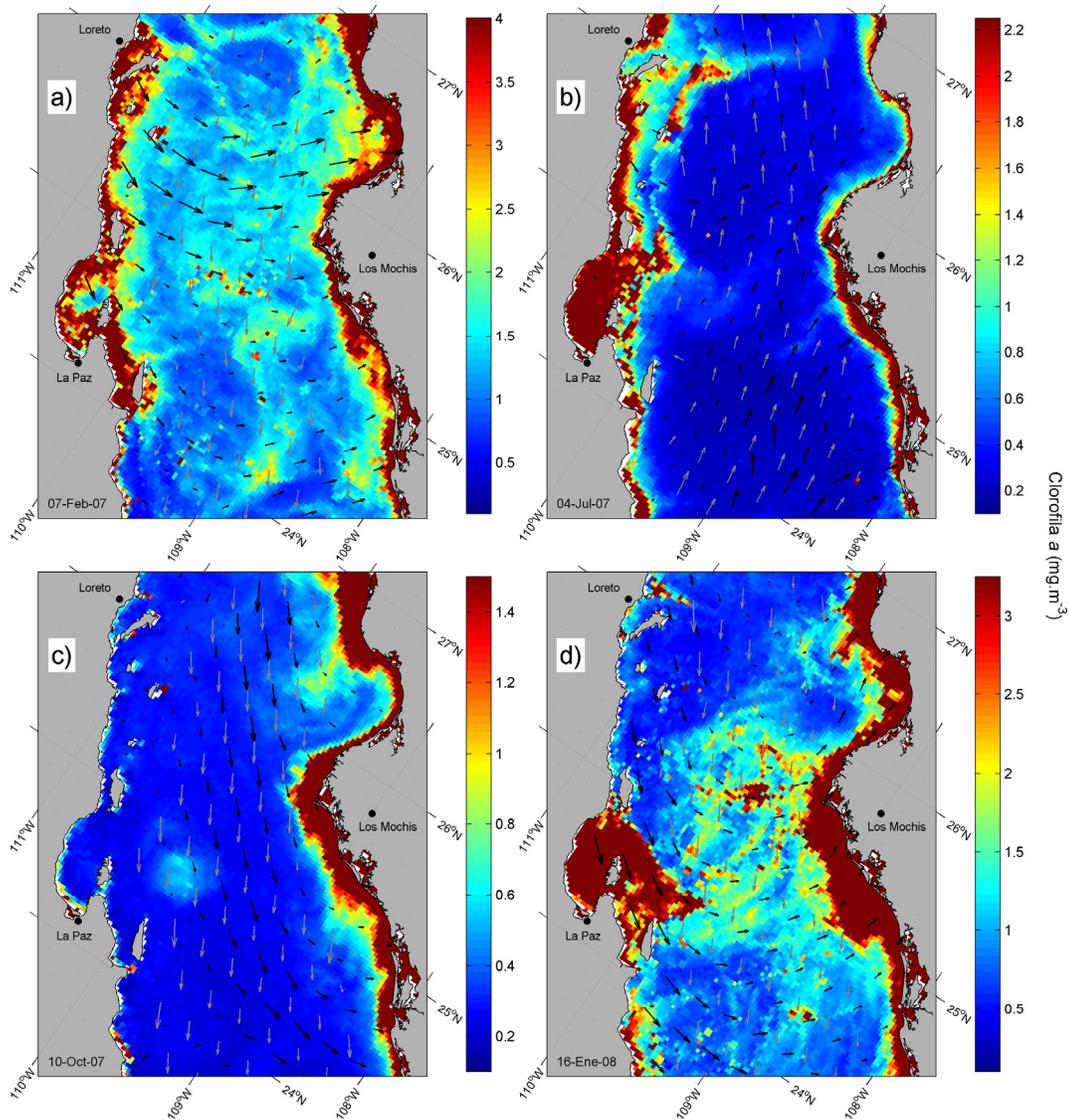


Figura 21. Condiciones generales de concentración de Cla-S al suroeste del Golfo de California. Se muestra el estrés de viento superficial (flechas grises) y la dirección e intensidad de la corriente geostrófica (flechas negras). Ver explicación de cada condición (a, b, c y d) en el texto.

6.4.2. Estrés de viento superficial

El estrés de viento superficial en el sur del Golfo exhibió un patrón monzónico bien conocido (ver Capítulos 1.2 y 7.1). Vientos del noroeste soplaron durante los periodos de mezcla siendo más fuertes durante el segundo. Los periodos de estratificación parecen estar marcados por una transición: En el primer periodo de estratificación comenzaron a cambiar progresivamente hacia vientos del sureste. El

inicio del periodo de ascenso coincidió con el inicio del régimen de vientos del sureste, que se mantuvo durante todo este periodo, incluso hasta los inicios del segundo periodo de estratificación. En ese momento, los vientos cambiaron drásticamente de dirección, volviendo a ser del noroeste. Estos vientos se mantuvieron durante gran parte del periodo de estratificación y el segundo periodo de mezcla (Figura 22).

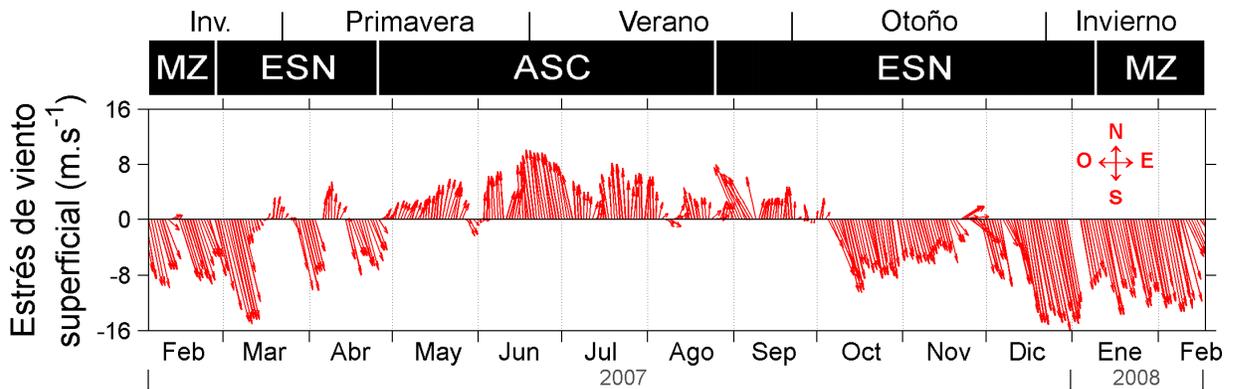


Figura 22. Estrés de viento superficial en el sur del Golfo de California. Los datos corresponden a medias semanales móviles. Se muestra en la parte superior las condiciones físicas predominantes en la columna de agua sobre Cuenca Alfonso. Los valores negativos corresponden a vientos del norte y los positivos del sur.

7. ANÁLISIS

De acuerdo con lo descrito anteriormente, algunas particularidades biológicas de los cetáceos hacen presumir que los incrementos temporales de su biomasa sobre Cuenca Alfonso se deban a cambios importantes en las condiciones fisicoquímicas y biológicas del medio. Estas, proporcionarían un hábitat adecuado para los diferentes requerimientos de las especies encontradas, especialmente en lo referente a la disponibilidad de sus presas (ver Capítulo 1.1). De acuerdo con las tendencias temporales de las variables ambientales evaluadas, existen cambios importantes en la columna de agua sobre la Cuenca; algunos de ellos parecen obedecer a cambios estacionales típicos de la región, mientras que otros, pueden responder a fenómenos más locales. A partir de la integración de información oceanográfica y biológica, los cambios en la biomasa de cetáceos y sus requerimientos biológicos conocidos, fue posible analizar el contexto ambiental que modula la incursión temporal de las especies más frecuentes en la Cuenca.

7.1. Cambios temporales en las condiciones del hábitat

La región sur del Golfo de California exhibe una dinámica oceanográfica anual compleja, que no se limita a los procesos derivados del cambio estacional (Castro *et al.*, 2000; Bernal *et al.*, 2001). Sin embargo, gran parte de esta dinámica obedece a la inversión en el régimen temporal de vientos (Parés-Sierra *et al.*, 2003; Marinone *et al.*, 2004), asociado al patrón de cambio monzónico estacional típico de la región (Adams y Comrie, 1997; Anderson *et al.*, 2000; Anderson *et al.*, 2000b; Bordoni *et al.*, 2004; Figura 22). Este régimen es de particular importancia para las condiciones ambientales del sur del Golfo de California (Castro *et al.*, 2000; Bernal *et al.*, 2001), por lo que la sucesión de estaciones es un buen referente al momento de analizar los cambios temporales más importantes en el ambiente de la Cuenca. Por ejemplo, los vientos predominantes del noroeste, son fortalecidos por sistemas de baja presión en el sureste durante el invierno, cuando la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es más meridional. A medida que el ángulo de la Tierra con respecto al Sol decrece y avanzan las estaciones, los vientos sufren un cambio de

dirección y fuerza (Lavín y Marinone, 2003; Poore *et al.*, 2005). Este régimen monzónico puede estar influyendo sobre la estacionalidad de la estructura fisicoquímica y biológica de la columna de agua. Sin embargo, se observaron otros cambios que obedecerían a fenómenos locales.

7.1.1. Mezcla

Los dos periodos de invierno evaluados presentaron condiciones de mezcla (Figura 12), en las cuales dominaron los vientos del noroeste (Figura 22). El estrés turbulento ocasionado por la intensidad y duración de estos vientos, pudo provocar esta condición de homogeneidad en la columna de agua en los primeros 30-50m de profundidad, de acuerdo con su estructura térmica. Esto favoreció la recirculación de nutrientes a lo largo de los primeros 60m de la columna superior (Figura 15), cuya disponibilidad, provocó florecimientos de fitoplancton detectados en los primeros 40 y 50m (Figura 16). De acuerdo al patrón temporal de la porción de ópalo en el flujo de material biogénico en hundimiento (Figura 17), y asumiendo una pobre contribución de radiolarios y silicoflagelados en este ambiente, estos florecimientos parecen ser dominados por diatomeas (Egge y Aksnes, 1992; Ragueneau *et al.*, 2000; Coradin y Jean-Lopez, 2003). Por lo general, el crecimiento de diatomeas requiere de alta disponibilidad de nutrientes y han sido descritas como dominantes en los florecimientos algales de invierno y primavera en la región (Valdez-Holgín *et al.*, 1999; Verdugo-Díaz, 2004). Las condiciones de mezcla fueron de gran importancia biológica para la Cuenca dentro del contexto regional, ya que la zona exhibió concentraciones relativamente más altas de clorofila-*a* superficial con respecto al resto de la costa oeste del Golfo, especialmente en Enero y Febrero de 2008 (Figura 20).

7.1.2. Ascenso de agua en estratificación

El final del invierno estuvo marcado por un cambio en la dirección e intensidad de los vientos, que progresivamente comenzaron a soplar del suroeste (Figura 22). Paralelo a esto, se observó la estratificación de la columna de agua y profundización de la capa de mezcla, bajo la cual se ubicó una termoclina poco pronunciada (Figura 12).

Bajo esta estructura física, fue evidente un decremento en los nutrientes a lo largo de los primeros 20m de la columna superior (Figura 15). La profundización de la capa de mezcla crea una barrera para la dilución de este material dentro de la zona eufótica (Williams y Follows, 2003), por lo cual, se registró también una disminución en la concentración de clorofila-a tanto en la columna de agua (Figura 16) como regionalmente, en superficie (Figura 20). Este decremento general a lo largo de la costa suroeste del Golfo apoya la idea del patrón de vientos como detonante del cambio observado en la estructura física de la columna de agua.

Sin embargo, estas condiciones no duraron más de un mes. Seguidamente, se registró un evento cuyas características persistieron por un periodo de aproximadamente cuatro meses, hasta la segunda mitad del verano. Si bien, la estratificación de la columna de agua se mantuvo, la profundidad de la capa de mezcla disminuyó, ubicándose entre los primeros 10m y la termoclina se hizo mucho más pronunciada (Figura 12). Bajo ésta se registraron aguas frías de hasta 15°C en los primeros 30m de la columna. Aunque dicha incursión de agua fría no llegó a romper la termoclina, cuyo límite superior se mantuvo generalmente por encima de los 10m, sí trajo consigo nutrientes dentro de la zona eufótica (Figuras 14 y 15). Gracias a esto se presentó un importante incremento de la concentración de clorofila-a de picos sub-superficiales, muy cerca del límite superior de la termoclina. Esto puede deberse a que, bajo condiciones de estratificación, la difusión de nutrientes hacia la capa de mezcla donde el fitoplancton puede captarlos, se ve limitada por la barrera de la termoclina (Platt *et al.*, 2003), que en este caso fue bastante pronunciada. De acuerdo con la dominancia observada del sílice biogénico sobre el carbonato de calcio (Figura 17), los florecimientos asociados a este periodo de ascenso de agua profunda también corresponderían en su mayoría a diatomeas (Ragueneau *et al.*, 2000). Éstas, evidentemente enriquecieron el hábitat de la Cuenca durante la primavera y gran parte del verano.

La persistencia de agua fría por un periodo considerable de tiempo bajo la termoclina durante estas condiciones estratificadas tiene varias explicaciones posibles aunque,

como se discute a continuación, la causalidad de este evento en particular no es bien entendida. Una posibilidad es la incursión de una masa de agua externa con menor temperatura. Durante Junio-07 y Julio-07, cuando este ascenso alcanzó la zona más somera, se registró la presencia de una masa de agua intermedia entre el Agua Sub-Ártica y el Agua Ecuatorial Sub-superficial (Figuras 11, 12 y 13) justo bajo la termoclina. Esto quiere decir que agua que en algún momento estuvo asociada a la Corriente de California incursionó a la Cuenca durante esta época. Sin embargo, esto no explica la presencia de agua fría a lo largo del resto de la columna de agua, bajo la termoclina. De ser así, la salinidad del agua a lo largo de la columna sería similar a la de dicha capa delgada de agua. Esto corrobora que el fenómeno se trata de un ascenso de agua profunda sobre la cual se ubicó dicha masa de agua intermedia, bajo una termoclina muy pronunciada. La influencia del Agua de la Corriente de California ha sido reportada para la región, aunque su presencia se da particularmente en invierno y primavera cuando dicha corriente incrementa su fuerza hacia el sur (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979).

Una primera interpretación a la causalidad del fenómeno es el bombeo ocasionado por la formación de un giro ciclónico sobre la Cuenca. Un movimiento de este tipo produciría, dependiendo de su duración y velocidad de vórtice, un flujo vertical divergente de agua profunda con sus respectivas consecuencias biológicas, derivadas de la inyección de nutrientes a la zona eufótica (Seki *et al.*, 2001). Aunque no es la primera vez que se propone un evento de circulación ciclónica sobre el área de influencia de la Cuenca (Monreal-Gómez *et al.*, 2001; Sánchez-Velazco *et al.*, 2006), su temporalidad se desconoce y no hay estudios que permitan determinar su patrón temporal o sus causas. Trayectorias medidas con ayuda de boyas de deriva (M.F. Lavín *com. pers.*, 2008), han mostrado que dicho giro se ubica principalmente en la zona de influencia de la Cuenca, presentando una duración de hasta un mes y medio, con una velocidad de vórtice de aproximadamente un giro por día. Sin embargo, sigue siendo escasa la información sobre la causalidad y efectos físicos de dicho fenómeno. Recientes cálculos basados en mediciones *in situ* de velocidad geostrofica sugieren que dicho giro no tendría la fuerza necesaria para producir un

desplazamiento vertical de agua como el observado durante este estudio. Al parecer su influencia no sobrepasaría los 30m de profundidad (E. Beier, *datos sin publicar*; O. Viktorovich-Zaitzev *com. pers.*, 2009). Las últimas hipótesis al respecto apuntan a la presencia de un patrón local de vientos asociado a las diferencias de temperatura entre el agua y la tierra y la morfología de la Bahía, que fortalecerían este ascenso. La influencia del patrón general de vientos regionales sobre este evento también es desconocido y requiere más estudio. No obstante, es interesante notar que el cambio del régimen de dirección y velocidad de los vientos, afianzándose como dominantes aquellos del suroeste, coincide con el paso de condiciones estratificadas con capa de mezcla profunda a condiciones de ascenso (Figura 22). Así mismo, el momento en el que el agua profunda alcanzó las capas más someras, donde se registra el gradiente más abrupto en la termoclina, coincide con el momento en el que el estrés de los vientos regionales del sur alcanzó su máxima fuerza (Figuras 12 y 13).

Si bien, la concentración de clorofila-a superficial no fue tan alta durante este periodo de ascenso con respecto a los periodos de mezcla, se destacó sobre el resto de la costa suroeste del Golfo y la parte central (Figura 20). De esta forma se puede inferir que este evento físico y su efecto en los productores primarios, es propio de la Bahía, lo que ocasiona una mayor concentración de fitoplancton en el área. De acuerdo con los patrones espaciales de clorofila-a superficial y la dirección de la corriente geostrofica derivada de la información satelital, parece que este material es incluso exportado, al menos de forma esporádica hacia el Golfo circundante, a través de la Boca Norte de la Bahía, por la cual se presenta la mayor parte del intercambio.

7.1.3. Estratificación y profundización de la capa de mezcla

Ya desde el inicio de la primavera, fue evidente un aumento en la temperatura del agua superficial debido a una mayor irradiación solar (Figura 12). Sin embargo, el evento de ascenso descrito anteriormente trajo agua fría cerca de las capas superficiales a medida que transcurría la primavera y el verano. Una vez que se relajó esta condición en la segunda mitad del verano y se profundizó la capa de mezcla, las capas superficiales se calentaron, registrándose las mayores

temperaturas del periodo de estudio en otoño. Estas condiciones se mantuvieron incluso por un corto periodo después del cambio registrado en el régimen de vientos (Figuras 12 y 22). El aumento considerable en la temperatura, en ausencia de un evento turbulento, incrementó la profundidad de la capa de mezcla. Si bien se registró la presencia de agua a menos de 17°C en otoño, estas no sobrepasaron los 50m y siempre bajo la termoclina. Estas aguas fueron ricas en nutrientes; sin embargo, no estuvieron disponibles para el fitoplancton debido a que no alcanzaron la zona eufótica (Figuras 12 y 14). De acuerdo con los altos contenidos de carbonato de calcio con respecto al sílice biogénico en el material biogénico en hundimiento (Figura 17), bajo estas condiciones dominó el fitoplancton calcáreo, que en su mayoría está representado por cocolitofóridos, cuyo crecimiento se hace más eficiente en concentraciones bajas de nutrientes (Le Quéré *et al.*, 2005). Aunque se podría suponer que en este periodo oligotrófico no hay oferta de biomasa suficiente en los niveles inferiores que permita la presencia de presas potenciales para los cetáceos, este periodo de estratificación tuvo presencia importante de algunas especies, tanto de misticetos como de odontocetos. Como se discute más adelante, estas especies podrían encontrar presas ubicadas bajo la zona eufótica u otras que se ven atraídas por las altas temperaturas.

7.2. Cuenca Alfonso como hábitat temporal para varias especies de cetáceos

Es evidente entonces que el ambiente fisicoquímico de Cuenca Alfonso varía considerablemente durante el ciclo anual. Esta variabilidad produce efectos sobre los productores primarios de manera consecuente, por lo tanto es de esperar que dicha señal se exprese también en los niveles superiores, los cetáceos en este caso. Sin embargo, un factor importante a tener en cuenta antes de interpretar la relación temporal entre las condiciones del hábitat y la presencia de los cetáceos, es la dimensión espacial cubierta. Como se señaló anteriormente, no hay razones para suponer que alguna de las especies que se presentaron sobre la Cuenca tenga un rango de distribución restringido a la misma. Por el contrario, dichos rangos probablemente abarcan una región mucho más extensa. Entonces, la presencia de una especie sobre la Cuenca en un momento dado, debe ser interpretada como la

respuesta al encuentro de condiciones favorables dentro de una parte específica de su rango de distribución. Dicho de otro modo, se trata de una expansión temporal de su hábitat, que puede obedecer al encuentro de recursos; ya sea alimento o cualquier otra condición favorable para cubrir sus necesidades biológicas.

7.2.1. *Misticetos*

La abundancia del rorcual azul en la Cuenca es un buen ejemplo de lo anterior. Dentro de su patrón de migración, esta especie entra al Golfo a finales del año y tiende a distribuirse primero hacia el norte del Golfo, en un área bastante productiva conocida como el Canal de Ballenas, entre las Grandes Islas (Gendron, 2002). Luego, comienzan a bajar, distribuyéndose más hacia el suroeste del Golfo, donde también se alimentan activamente de eufáusidos, principalmente *Nyctiphanes simplex* (Gendron, 1990), especie dominante en el Golfo (Brinton y Townsend, 1980). En esta zona, se pueden observar enjambres diurnos en la superficie, debido a su reproducción entre Febrero y Junio (Gendron, 1992). Si bien, los rorcuales azules han sido asociados a zonas con alta concentración de clorofila y baja temperatura en el Golfo de California (Chávez-Andrade, 2006), su patrón de distribución, así como las condiciones que la modulan, no son aún muy claros. No obstante, la especie está ligada en general a pulsos importantes de producción fitoplanctónica, ya que la agregación de su presa responde a estos florecimientos (Fiedler *et al.*, 1998; Croll *et al.*, 2005).

Para el caso particular de este estudio, el flujo de pelotillas fecales de mayor diámetro, parece ser un buen indicador de la disponibilidad de eufáusidos en el medio, toda vez que sus incrementos coinciden con los mayores florecimientos algales, especialmente durante el segundo periodo de mezcla (Figura 18). Sin embargo, el incremento del flujo de pelotillas no fue tan alto en el periodo de ascenso. Esto representa una incertidumbre acerca del papel de las condiciones de ascenso sobre la disponibilidad de eufáusidos, ya que los rorcuales azules sí mostraron un aumento importante en dicha temporada (Figura 9). A partir de mediciones de abundancia *in situ* dentro de la Bahía, estudios previos sugieren que

la abundancia de *N. simplex* presenta incrementos importantes en primavera (De Silva-Dávila y Palomares-García, 2002). Una de las razones para que el flujo de pelotillas no responda de manera consecuente con esto, puede ser el efecto de la depredación intensiva sobre los eufáusidos, que no se limita a los rorcuales azules. Aunque se desconoce la abundancia de otros potenciales depredadores de eufáusidos en esta zona, su agregación es de esperarse, teniendo en cuenta que la Bahía de La Paz parece ser biológicamente más rica que el Golfo circundante durante este periodo (Figura 20). Esto es reforzado por la co-presencia de tres especies de misticetos, situación que también sucede en el segundo periodo de mezcla (Figura 9). Sin embargo, en este último las altas concentraciones de clorofila-a superficial y el alto flujo de pelotillas, sugieren que la agregación de eufáusidos debió ser lo suficientemente grande como para que fuera evidente en el material en hundimiento, a pesar de un posible efecto de la depredación. Es dudoso que un consumo intensivo remueva una gran parte de los enjambres antes de que estos produzcan pelotillas. Por otro lado, la incidencia de otros procesos que afectan el flujo de las pelotillas durante su camino entre la capa superficiales y los 300m de profundidad (donde se encuentra la trampa de sedimento), es desconocida para el área. Estos procesos pueden incluir la descomposición microbiana, coprofagia por parte de diversos organismos, incluso algunos peces, y/o destrucción de su estructura (Viitasalo *et al.*, 1999; Roy *et al.*, 2000; Turner, 2002; Kiorbøe, 2003).

Es así que debido a su naturaleza estenófaga y dominancia sobre las demás especies de rorcuales, el rorcual azul se constituyó en un buen indicador de las condiciones temporales del medio, que a su vez, aunque no es totalmente claro que estas modulen la disponibilidad de su presa. De hecho, las condiciones locales del periodo de ascenso pudieron tener un papel importante en lo que se considera como una presencia extemporánea de la especie en la Bahía, ya que para esta época del año no es común avistarlas en el área (D. Gendron *com. pers.*, 2008). Sin embargo, no es el único rorcual cuya abundancia reaccionó a las condiciones descritas para estos dos periodos. Tanto durante el segundo periodo de mezcla como en condiciones de ascenso, esta especie estuvo acompañada de los rorcuales común y

tropical. Dentro de sus posibles presas también han sido descritos los eufáusidos y otros tipos de macrozooplancton (Pauly *et al.*, 1998; Ladrón-de-Guevara, 2008), por lo que se podría pensar en un escenario de competencia por una presa común en donde domina el rorcual azul. En este caso, se podría dar una repartición espacial del hábitat, tal como el encontrado por Del-Ángel-Rodríguez (1997) para la Bahía con base en el contenido de heces para los rorcuales azul y tropical.

Si bien la biomasa de rorcuales azules durante estos periodos sugiere que los eufáusidos son la presa disponible más importante, se deben tener en cuenta otras potenciales para los otros rorcuales. La sardina también está estrechamente ligada a florecimientos algales durante el invierno en la región suroeste del Golfo de California y hace parte de la dieta descrita para los rorcuales común y tropical (Pauly *et al.*, 1998; Jaume-Schinkel, 2004). De hecho, el patrón de presencia interanual de esta última, parece estar relacionado con la presencia de sardina, inferida a partir de las capturas comerciales en el Golfo (Salvadeo *et al.*, 2007). En invierno, se espera la presencia de sardina en la Bahía de acuerdo con su patrón de migración dentro del Golfo, ya que es cuando los adultos se dirigen hacia el sur para desovar (Hamman *et al.*, 1988); mientras que en primavera e inicios de verano, es probable la presencia de un *stock* cálido proveniente del Pacífico (Félix-Urraga *et al.*, 2004). La hipótesis de una repartición de hábitat entre los rorcuales azul, común y tropical mediante el consumo de diferentes recursos, es coherente con recientes estudios que sugieren una diferencia en la posición trófica de estas especies. Las razones isotópicas de nitrógeno en piel, sugieren que el rorcual azul se ubicaría en el lugar más bajo por consumir solamente zooplancton; le seguiría el rorcual común, que puede consumir tanto zooplancton como pequeños pelágicos y sobre estas, se encontraría el rorcual tropical, en cuya dieta dominan los pequeños pelágicos como la sardina (Gendron *et al.*, 2001). Más allá del escenario de competencia o repartición del nicho, es evidente que las condiciones de mezcla y ascenso, son importantes para la incursión de misticetos hacia la Cuenca, mediante la modulación de la disponibilidad de su presa.

Por el contrario, la relación entre las condiciones oligotróficas del segundo y más largo periodo de estratificación con los incrementos en biomasa de los rorcuales común y tropical, no es tan clara. Por la baja concentración de clorofila-a en la columna de agua (Figura 16) y en general, en todo el suroeste del Golfo (Figuras 20 y 21), este periodo no parecería beneficiar una alta disponibilidad de presas como eufáusidos o sardinas y no hay un indicio importante de la presencia de estos grupos en el área en esta época del año. Como se discute más adelante, la presencia de odontocetos teutófagos en esta temporada (*i.e.* calderones, cachalotes y cachalotes enanos; Figuras 9 y 10), hace suponer una alta disponibilidad de calamares. Este grupo ocupa sólo una minoría en la dieta descrita para estos rorcuales (Pauly *et al.*, 1998) y no hay evidencia que lo sugiera como su presa potencial en el Golfo, aunque se ha sugerido que el rorcual común consumiría presas de mayor nivel trófico durante el verano que en invierno (Jaume-Schinkel, 2004).

Debido a la escasa información sobre el espectro trófico de estas dos especies en el Golfo, es difícil ligar las condiciones de estratificación con la biomasa de estas especies, al menos, mediante sus necesidades alimentarias. Sin embargo, la presencia de las dos especies por un tiempo tan prolongado bajo estas condiciones, llevan a suponer un escenario hipotético de disponibilidad de presas, con base en las condiciones observadas. Si bien los eufáusidos están mayormente ligados a florecimientos de microalgas en la zona eufótica, su dieta es básicamente oportunista y el detritus hace parte de su dieta (Longhurst, 1967). Los factores que parecen limitar en mayor medida la distribución de los eufáusidos parecen ser la temperatura y el oxígeno disuelto (Tremblay, 2008). Teniendo esto en cuenta, es posible que durante las condiciones de estratificación haya disponibilidad de eufáusidos por debajo de los 60m, donde se registraron temperaturas inferiores a los 17°C, ideales para estos organismos (Tremblay, 2008). La abundancia de los rorcuales comunes alcanzó su pico más alto en este periodo coincidiendo con la incursión más somera de aguas a esas temperaturas. Los altos contenidos de CaCO₃ y los flujos estables de carbono orgánico bajo estas condiciones (Figura 17) hacen suponer que existe una producción suficiente de material orgánico incluso para ser exportada.

Aunque los pocos arrastres de zooplancton con los que se contó debieron cubrir un rango de profundidad entre los primeros 200m de la columna, el muestreo puntual llevado a cabo en Noviembre-07, durante condiciones estratificadas y cuando los rorcuales comunes alcanzaron su mayor densidad, no reflejó una alta disponibilidad de zooplancton. Desafortunadamente, no se cuenta con más muestreos de zooplancton a esa profundidad que permitan corroborar esta hipótesis y los flujos de pelotillas fecales pueden no estar reflejando la disponibilidad de organismos, sobretodo bajo supuestas condiciones de alta detritivoría. Sin embargo, es claro que siendo el rorcual común una especie residente del Golfo (Tershy *et al.*, 1993; Bérubé *et al.*, 2002), debe tener estrategias de alimentación cuando las condiciones de la zona eufótica no son favorables para la agregación de las presas, más aún, cuando estas condiciones se presentan en prácticamente todo el sur del Golfo, como es el caso del periodo de estratificación descrito en este estudio (Figuras 20 y 21).

7.2.2. *Odontocetos*

Aunque los odontocetos exhibieron en general biomásas menores que los misticetos, sus mayores requerimientos energéticos (Barlow *et al.*, 2008) los hacen buenos indicadores de las condiciones del medio y disponibilidad de presas. La biomasa que más resalta dentro en el ciclo anual, es la de los delfines comunes, acercándose incluso a los valores registrados para los misticetos. Esta es una especie esencialmente ictiófaga (Pauly *et al.*, 1998; Pusineri *et al.*, 2007; Meynier *et al.*, 2008), cuyos requerimientos energéticos parecen estar dentro de los más altos en comparación a los demás odontocetos e incluso algunos misticetos (Barlow *et al.*, 2008). Es de esperar que un incremento importante de sus biomásas dentro de la Cuenca requiera de una alta disponibilidad de presas. Su abundancia más importante se registró en condiciones de mezcla (invierno 2008; Figura 9). Esto sugiere que la especie puede aprovechar principalmente recursos cercanos a la base de la red trófica como pequeños pelágicos. Sin embargo, fue una especie presente casi todo el año, incluso en condiciones estratificadas, por lo cual se infiere que podría explotar otros recursos como el calamar que podría hacer parte de la dieta de

la especie (Díaz-Gamboa, 2009) y que, como se discute más adelante, estaría disponible bajo estas condiciones. No obstante, sus bajas biomásas durante el resto del año en comparación con el periodo de mezcla, sugieren que la especie podría no encontrar suficientes presas en la Cuenca como para incursionar de manera importante. Durante este tiempo, la especie podría estar más dispersa en el Golfo circundante por la costa oeste o incluso en medio del Golfo, abarcando áreas más extensas y en grupos más grandes, tal como se ha descrito para las costas del Pacífico (Ferguson *et al.*, 2006).

Si bien los calderones solo fueron registrados en dos muestreos, estos se presentaron justo bajo las condiciones de mayor temperatura superficial e inicio de la profundización de la capa de mezcla (Figuras 9 y 12). Esta especie es casi por completo teutófaga (Clarke, 1996; Pauly *et al.*, 1998) y se ha sugerido que en aguas oceánicas siguen la migración vertical del calamar, que inicia su ascenso desde aguas profundas al atardecer; momento en el que los calderones exhiben sus buceos más profundos (Baird *et al.*, 2003). Esto puede ocurrir en aguas del Golfo circundante a la Bahía, donde suelen avistarse grandes grupos de calderones incluso en invierno (Laboratorio de Ecología de Cetáceos y Quelónios CICIMAR-IPN, *datos sin publicar*). Sin embargo, su presencia dentro de la Bahía principalmente en verano, puede deberse a que los calamares gigantes suelen agregarse por miles en aguas costeras y cálidas para desovar (Nigmatullin *et al.*, 2001); comportamiento que ya ha sido descrito en el centro del Golfo (Staaf *et al.*, 2008) y que probablemente suceda en la Bahía durante esta temporada. Aún siendo el periodo de estratificación de características más oligotróficas sobre la Cuenca, ofrece condiciones potencialmente favorables para una agregación importante de la presa principal de los calderones. El calamar gigante se ha descrito como presa importante para varias especies de odontocetos en el Golfo (Díaz-Gamboa, 2009), entre ellas, el cachalote cuyo único registro en este estudio no aporta información suficiente sobre la temporalidad de la especie en el área. Sin embargo, siendo animales esencialmente teutófagos (Ruiz-Cooley *et al.*, 2004; Guerrero de la Rosa, 2008), su aparición durante la

estratificación fortalece la idea de una alta disponibilidad de calamares dentro de la Bahía en este periodo.

Los tursiones por su parte estuvieron presentes mayormente a finales del primer periodo de estratificación y se mantuvieron durante todo el periodo de ascenso, lo cual sugiere que aprovecharon la disponibilidad de presas cercanas a la base de la red trófica, como lo son algunos pelágicos menores. Teniendo en cuenta que el ecotipo oceánico frecuentemente asociado al cachalote en el Golfo consume principalmente calamar gigante (Díaz-Gamboa, 2003), se esperaría un incremento importante durante la temporada de estratificación. Esto pudo deberse a que simplemente no se detectó dicho incremento: es posible que la resolución temporal del muestreo haya sido baja con respecto a la duración de las condiciones favorables para la incursión de los tursiones. Los incrementos en biomasa durante este periodo de estratificación de otras especies reportadas como teutófagas se detectaron durante muestreos puntuales; lo cual hace suponer que el periodo de alta disponibilidad de calamar bajo estas condiciones es corto.

El cachalote pigmeo, otra especie teutófaga (Clarke, 1996; Pauly *et al.*, 1998; Santos *et al.*, 2006), fue registrada aunque en pocas ocasiones y durante todas las temporadas, incluyendo el periodo de estratificación. Debido a que es uno de los pocos cetáceos solitarios (o en muy pequeños grupos) de tamaño corporal pequeño (hasta 2.7m); sus requerimientos de calamar son bajos comparados con los calderones o cachalotes, que se mueven en grupos numerosos o tienen grandes tamaños corporales (Barlow *et al.*, 2008). Lo anterior puede significar que los cachalotes pigmeos no son un buen indicador de las condiciones del medio. La presencia de la especie en todas las temporadas sugiere que es oportunista en lo referente a la cantidad del recurso. En cualquier momento en el que se registró la especie, se esperaría una disponibilidad mínima de calamar, dado que es un recurso en general abundante en todo el Golfo (Morales-Bojórquez *et al.*, 2001; Rosas-Luis *et al.*, 2008). Esto explicaría su aparición bajo diferentes condiciones ambientales (Figura 10) y no interfiere con la hipótesis de la importancia de las condiciones

cálidas para la incursión costera de cetáceos teutófagos hacia la Cuenca, aprovechando posiblemente el desove del calamar. Este comportamiento supondría un menor gasto metabólico, ya que los buceos de alimentación de estas especies en mar abierto suelen ser más profundos que Cuenca Alfonso (>400m; Baird *et al.*, 2002; Baird *et al.*, 2003; Davis *et al.*, 2007).

7.2.3. Posible estacionalidad de las relaciones observadas

El comportamiento observado del hábitat fisicoquímico y biológico para los cetáceos, derivado de fenómenos locales y regionales, conlleva a una pregunta obligada: ¿Cuál es la estacionalidad de estas relaciones? La cobertura temporal del estudio no permite hacer conclusiones al respecto. Sin embargo, las condiciones de mezcla y estratificación de la columna de agua y sus correspondientes efectos en la base de la red trófica, parecen tener un carácter estacional, de acuerdo con el patrón de los vientos e irradiación solar respectivamente. Esta dinámica mostró influir en la segregación de las especies de cetáceos sobre la Cuenca, dependiendo de sus necesidades alimentarias (Figura 23). Por lo tanto, este patrón debería ser estable entre años, salvo la presencia de eventos anómalos como El Niño. Anteriormente, Salvadeo (2008) encontró un patrón temporal similar para un periodo de tres años, en el que los odontocetos se segregan de forma similar, dependiendo de si son teutófagos (temporada cálida) o ictiófagos (temporada fría).

No obstante, un periodo observado en el presente estudio de casi tres meses del año, estuvo dominado por condiciones cuya periodicidad, magnitud y causas no son aún bien entendidas. Es evidente que el ascenso de agua profunda en condiciones estratificadas tuvo consecuencias biológicas importantes, incentivando la producción primaria y propiciando un hábitat para los cetáceos principalmente zooplanctófagos y en menor medida ictiófagos. El efecto de una posible variación temporal en este fenómeno sobre la presencia de las especies es desconocido; aunque se esperaría que prolongara el tiempo anual de uso de la Cuenca por parte de cetáceos, principalmente zooplanctófagos y ictiófagos.

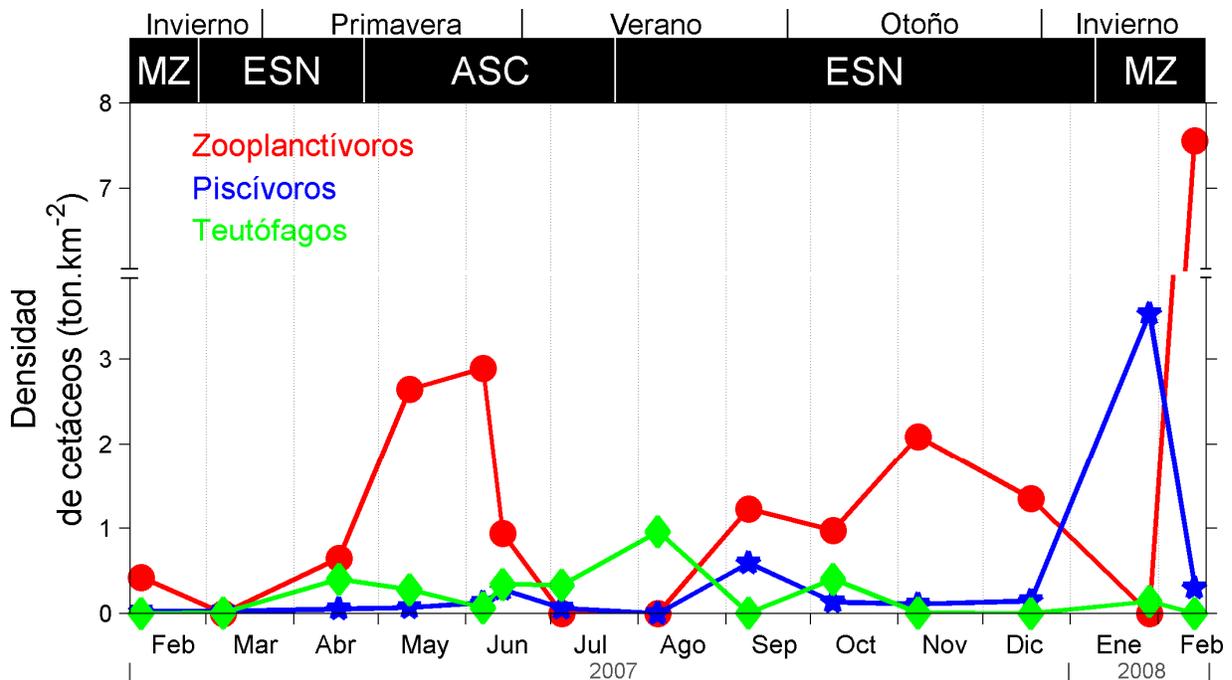


Figura 23. Biomasa de cetáceos predominantemente zooplanctófagos (*B. musculus* y *B. physalus*), ictiófagos (*B. edeni* y *D. spp*) y teutófagos (*G. macrorhynchus* y *T. truncatus*).

En un estudio previo Flores-Ramírez *et al.* (1996) encontraron una dominancia muy clara en la abundancia relativa de rorcuales tropicales con respecto a los demás misticetos, así como de *D. capensis* entre los odontocetos. Por el contrario, en este estudio, la biomasa de estos dos ictiófagos se mantuvieron moderadas en comparación a las de las otras especies frecuentes, excepto por un incremento puntual de los delfines comunes. Si bien las metodologías no son del todo comparables, las diferencias podrían deberse a que las condiciones que favorecen la disponibilidad de peces pelágicos planctívoros como la sardina podrían haber cambiado en el área en los últimos 17 años. No obstante, establecer dichos cambios requeriría una caracterización del hábitat a mayores escalas de tiempo y espacio.

Aunque gran parte de la respuesta de los productores primarios durante estas condiciones es sub-superficial, también se evidenciaron incrementos cerca de la superficie. Una aproximación preliminar a los patrones interanuales de clorofila-a derivados del sensor SeaWiFS sobre la Cuenca entre 1997 y 2007 (Figura 24; M.A. Pardo, *datos sin publicar*, 2009) muestra que las condiciones observadas en la

columna de agua durante 2007 se reflejan bien en la clorofila-a superficial. La serie de tiempo muestra de manera clara las condiciones de El Niño de 1997-1998 y las posteriores condiciones de La Niña en 2000-2001. Luego de estos periodos anómalos, se aprecia una estacionalidad bimodal más o menos estable entre los años 2002 a 2007. Los incrementos más importantes se presentan por lo general entre Diciembre y Enero. Luego, generalmente entre Mayo y Junio, se presenta otro incremento. Sin embargo, la magnitud y duración de estas condiciones varía interanualmente, lo cual hace suponer una respuesta igualmente variable de las especies de cetáceos cuya abundancia estuvo más relacionada con el comportamiento de la base de la red trófica, como es el caso del rorcual azul. Por el contrario, los periodos más oligotróficos son más estables en duración y magnitud entre años, por lo que las especies asociadas a dichas condiciones, como los teutófagos, podrían presentarse dentro del área de manera más predecible.

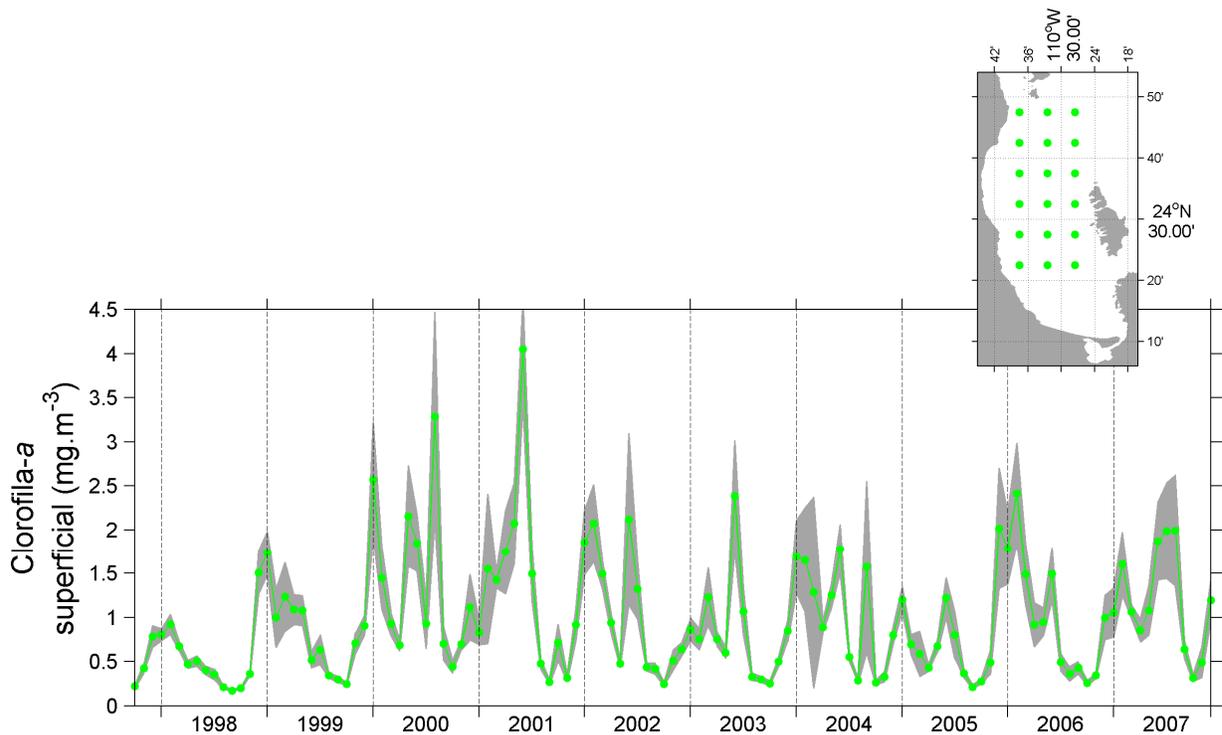


Figura 24. Promedio mensual de clorofila-a superficial sobre Cuenca Alfonso de 1997 a 2007. Cada punto corresponde al último día del mes. El área en gris representa el rango de la desviación estándar espacial. Se muestran los puntos de muestreo en el mapa superior.

8. CONCLUSIONES

- Los cambios más importantes en el ambiente fisicoquímico sobre Cuenca Alfonso a lo largo del año, obedecen a un régimen estacional y a la presencia de fenómenos locales que alteran la dinámica de mezcla y estratificación de la columna de agua. Esta dinámica condiciona la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica.
- El patrón monzónico de vientos parece propiciar el paso de condiciones mezcladas (vientos del noroeste) a condiciones estratificadas (vientos del suroeste) en la columna de agua sobre Cuenca Alfonso, mientras que su efecto sobre la condiciones de ascenso son inciertas y requiere de mayor estudio.
- Las condiciones de mezcla y ascenso de agua profunda producen un efecto importante en la base de la red trófica sobre Cuenca Alfonso, estimulando incrementos en la concentración de clorofila-a e influyendo en la agregación de presas para cetáceos zooplanctófagos y ictiófagos.
- Las condiciones de estratificación y capa de mezcla profunda sobre la Cuenca producen mayor oligotrofia en la zona eufótica. Sin embargo, los flujos estables de carbono orgánico sugieren un sistema en el cual se mantiene la exportación de material que favorecería la disponibilidad de presas potenciales que parecen condicionar la presencia de rorcuales comunes y tropicales durante este periodo. La temperatura superficial durante este periodo también podría favorecer la disponibilidad de presas para las especies de cetáceos teutófagos, aunque su biomasa sea menor con respecto a los demás grupos (zooplanctófagos e ictiófagos).
- El fenómeno de ascenso de agua profunda en la Cuenca enriquece biológicamente el área de la Bahía de La Paz con respecto al Golfo circundante, por lo cual, podría

constituirse en un área importante para la agregación de cetáceos durante este periodo, cuando las áreas circundantes son más oligotróficas.

- Los cetáceos zooplanctófagos y ictiófagos reflejaron mejor la heterogeneidad de las condiciones fisicoquímicas de la columna de agua a lo largo del año, mientras que los teutófagos mostraron una clara tendencia a incursionar a la Cuenca bajo condiciones estratificadas y oligotróficas en la zona eufótica. El efecto de cada una de estas condiciones sobre las posibles presas de los cetáceos deberá ser evaluado en detalle en el futuro.

9. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

Futuros trabajos encaminados a esclarecer la relación de los cetáceos con el ambiente del Golfo de California, deben apoyarse de información que cubra series de tiempo y áreas mayores, tanto de los parámetros ambientales, como de la presencia de cetáceos. Para esto, el Golfo podría ser dividido en subáreas, de acuerdo con la información disponible. Así, se podrían analizar las relaciones a diferentes escalas espaciales, temporales, diseños de muestreo, precisión de las estimaciones, etc.

Debido a la importancia de evaluar la regularidad con la que se presentan las relaciones observadas, se podrían analizar series de tiempo de varios años para parámetros que pudieran indicar la respuesta biológica a las condiciones fisicoquímicas observadas. Por ejemplo, un análisis mensual multianual de la concentración de clorofila-*a* semanal sobre la Cuenca (lo cual requeriría un producto de alta precisión), junto con la dinámica semanal multianual de los vientos, tanto regionales como locales, serviría para establecer una hipótesis sobre la temporalidad de las relaciones observadas en este estudio. La cobertura de dichas bases debería ser superior a los diez años con el fin de aclarar la dinámica no solo estacional sino respecto a eventos decadales, de magnitud global y continental.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, D.K. & A.C. Comrie. 1997. The North American Monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society* 7(10): 2197-2213.
- Aguirre-Bahena, F. 2007. Cambios temporales en los componentes y los flujos de la materia en hundimiento en Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, durante el período 2002-2005. *Tesis de Doctorado*. Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 103p.
- Allredge, A.L. & M.W. Silver. 1988. Characteristics, dynamics and significance of marine snow. *Progress in Oceanography* 20(1):41–82.
- Álvarez-Borrogo, S. & R.A. Schwartzlose. 1979. Masas de agua del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 6:1-21.
- Anderson, B.T., J.O. Roads & S. Chen. 2000. Large-scale forcing of summertime monsoon surges over the Gulf of California and the Southwestern United States. *Journal Of Geophysical Research* 105(D19):24.455-24.667.
- Anderson, B.T., J.O. Roads, S. Chen & H.H. Juang. 2000b. Regional simulation of the low-level monsoon winds over the Gulf of California and southwestern United States. *Journal Of Geophysical Research* 105(D14)17.955–17.969.
- Badan-Dangon, A., C.E. Dorman, M.A. Merrifield & C.D. Winant. 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 96: 16877–16896.
- Baird, R.W., J.F. Borsani, M.B. Hanson & P.L. Tyack. 2002. Diving and night-time behavior of long-finned pilot whales in the Ligurian Sea. *Marine Ecology Progress Series* 237: 301-305.
- Baird, R.W., D.J. McSweeney, M.R. Heithaus & G.J. Marshall. 2003. Short-finned pilot whale diving behavior: deep feeders and day-time socialites. *En: 15th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals*, 14-19 de Diciembre, Greensboro, EUA.

- Baker, C.S., L.M. Herman, A. Perry, W.S. Lawton, J.M. Straley, A.A. Wolman, G.D. Kaufman, H.E. Winn, J.D. Hall, J.M. Reinke & J. Östman. 1986. Migratory movement and population structure of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in the central and eastern North Pacific. *Marine Ecology Progress Series* 31: 105-119.
- Ballance, L.T., R.L. Pitman & P.C. Fiedler. 2006. Oceanographic influences on seabirds and cetaceans of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69: 360–390.
- Barlow, J., M. Kahru & B.G. Mitchell. 2008. Cetacean biomass, prey consumption, and primary production requirements in the California Current ecosystem. *Marine Ecology Progress Series* 371:285–295.
- Barlow, J., T. Gerrodette & J. Forcada. 2001. Factors affecting perpendicular sighting distances on shipboard line-transect surveys for cetaceans. *Journal of Cetacean Research and Management* 3(2):201–212.
- Becker, J.J., D.T. Sandwell, W.H.F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, G. Sharman, R. Trimmer, J. VonRosenburg, G. Wallace & P. Weatherall (*En Prensa*) Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc-Seconds Resolution: SRTM30_PLUS. Sometido a: *Marine Geodesy*, Octubre 8 de 2008. Revisado: Enero 16 de 2009.
- Beier, E. 1999. Estudio de la marea y la circulación estacional en el Golfo de California mediante un modelo de dos capas heterogéneas. *Tesis de Doctorado*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Ensenada, BC, México.
- Bernal, G., P. Ripa & J.C. Herguera. 2001. Variabilidad oceanográfica y climática en el Bajo Golfo de California: Influencias del Trópico y Pacífico Norte. *Ciencias Marinas* 27(4): 595-617.

- Bérubé, M., J. Urbán, A.E. Dizon, R.L. Brownell & P.J. Palsboll. 2002. Genetic identification of a small and highly isolated population of fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the Sea of Cortez, Mexico. *Conservation Genetics* 3(2):183-190.
- Bordoni, S., P.E. Ciesielski, R.H. Johnson, B.D. McNoldy & B. Stevens. 2004. The low-level circulation of the North American Monsoon as revealed by QuikSCAT. *Geophysical Research Letters* 31(L10109):1-4.
- Bowen, W.D. 1997. Role of marine mammals in aquatic ecosystems. *Marine Ecology Progress Series* 158:267-274.
- Brinton, E. & A.W. Townsend. 1980. Euphausiids in the Gulf of California - The 1957 cruises. *CalCOFI Report XXI*:211-236.
- Brodie, P.F. 1975. Cetacean energetics, an overview of intraspecific size variation. *Ecology* 56:152-161.
- Buckland, S.T., D.R. Anderson, K.P. Burnham, J.L. Laake, D.L. Borchers & L. Thomas. 2001. *Introduction to Distance Sampling*. Oxford University Press, Nueva York.
- Burnham, K.P. & D.R. Anderson. 2002. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical-Theoretic Approach*. Springer, Nueva York.
- Carwardine, M. 1995. *Whales, dolphins and porpoises: The visual guide to all the world's cetaceans*. Dorling Kindersley Limited, Londres. 256pp.
- Castro, R., A.S. Mascarenhas, R. Durazo & C.A. Collins. 2000. Variación estacional de la temperatura y salinidad en la entrada del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas* 26(4): 561–583.
- Chávez-Andrade, M. 2006. Caracterización del hábitat de grandes cetáceos del Golfo de California durante invierno. *Tesis de Maestría*. Instituto Politécnico Nacional – Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 80p.
- Clarke, M.R. 1996. Cephalopods as Prey. III. Cetaceans *En: The Royal Society (Ed.) The Role of Cephalopods in the World's Oceans. Philosophical Transactions: Biological Sciences* 351(1343): 1053-1065.

- Collins, C.A., N. Garfield, A.S. Mascarenhas, M.G. Spearman & T.A. Rago. 1997. Ocean currents across the entrance to the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 102, 927–936.
- Coradin, T. & P. Jean-Lopez. 2003. Biogenic Silica Patterning: Simple Chemistry or Subtle Biology?. *ChemBioChem* 3:1-9.
- Cox, R.A., F. Culkin, R. Greenhalgh & J.P. Riley. 1962. Chlorinity, conductivity and density of sea-water. *Nature* 193:518-520.
- Croll, D.A., B. Marinovic, S. Benson, F.P. Chávez, N. Black, R. Ternullo & B.R. Tershy. 2005. From wind to whales: trophic links in a coastal upwelling system. *Marine Ecology Progress Series* 289: 117-130.
- Davis, R.W., N. Jaquet, D. Gendron, U. Markaida, G. Bazzino & W. Gilly. 2007. Diving behavior of sperm whales in relation to behavior of a major prey species, the jumbo squid, in the Gulf of California, Mexico. *Marine Ecology Progress Series* 333:291-302.
- Davis, R.W., G.S. Fargion, T.D. Leming, M. Baumgartner, W.E. Evans, L.J. Hansen & K. Mullin. 1998. Physical habitat of cetaceans along the continental slope in the northcentral and western Gulf of Mexico. *Marine Mammal Science* 14(3): 490-507.
- Dawson, S., P. Wade, E. Slooten & J. Barlow. 2008. Design and field methods for sighting surveys of cetaceans in coastal and riverine habitats. *Mammal Review* 38(1):19–49.
- Del Ángel-Rodríguez, J.A. 1997. Hábitos alimentarios y distribución espaciotemporal de los rorcuales común (*Balaenoptera physalus*) y azul (*Balaenoptera musculus*) en la Bahía de la Paz, B.C.S., México. *Tesis de Maestría*. Instituto Politécnico Nacional – Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 78p.
- DeMaster, D.J. 1981. The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45(10):1715-1732.

- De Silva-Dávila, R. & R. Palomares-García. 2002. Distributional patterns of the euphausiid community in Bahía de La Paz, B.C.S., México. *Contributions to the Study of East Pacific Crustaceans* 1: 109-125.
- Desortova, B. 1981. Relationship between chlorophyll-a concentration and phytoplankton biomass in several reservoirs in Czechoslovakia. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie* 66(2): 153-169.
- Díaz-Gamboa, R.E. 2003. Diferenciación entre tursiones *Tursiops truncatus* costeros y oceánicos en el Golfo de California por medio de isótopos estables de carbono y nitrógeno. *Tesis de Maestría*. Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 64p.
- Díaz-Gamboa, R.E. 2009. Relaciones tróficas de los cetáceos teutófagos con el calamar gigante *Dosidicus gigas* en el Golfo de California. *Tesis de Doctorado*. Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 107p.
- Doniol-Valcroze, T., D. Berteaux, P. Larouche & R. Sears. 2007. Influence of thermal fronts on habitat selection by four rorqual whale species in the Gulf of St. Lawrence. *Marine Ecology Progress Series* 335: 207–216.
- Durazo, R. & T.R. Baumgartner. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Progress in Oceanography* 54: 7–31.
- Egge, J.K. & D.L. Aksnes. 1992. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition. *Marine Ecology Progress Series* 83: 281-289.
- Eppley, R.W., E.H. Renger, E.L. Venrick & M.M. Mullin. 1973. A study of plankton dynamics and nutrient cycling in the central gyre of the North Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography* 18(4): 534-551.
- Etnoyer, P., D. Canny, B.R. Mate, L.E. Morgan, J.G. Ortega-Ortiz & W.J. Nichols. 2006. Sea-surface temperature gradients across blue whale and sea turtle foraging trajectories off the Baja California Peninsula, Mexico. *Deep-Sea Research II* 53: 340–358.

- Evans, K. & M.A. Hindell. 2004. The diet of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in southern Australian Waters. *ICES Journal of Marine Science* 61: 1313-1329.
- Farr, T.G., P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank & D. Alsdorf. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics* 45: RG2004, DOI:10.1029/2005RG000183.
- Félix-Uraga, R., V.M. Gómez-Muñoz, C. Quiñónez-Velázquez, F.N. Melo-Barrera & W. García-Franco. 2004. On the existence of pacific sardine groups off the west coast of Baja California and Southern California. *CalCOFI Report* 45: 146-151.
- Ferguson, M.C., J. Barlow, P. Fiedler, S.B. Reilly & T. Gerrodette (2006) Spatial models of delphinid (family Delphinidae) encounter rate and group size in the eastern tropical Pacific Ocean. *Ecological Modelling*. 193(3-4): 645-662.
- Fiedler, P., S. Reilly, R. Hewitt, D. Demer, V. Philbrick, S. Smith, W. Armstrong, D. Croll, B. Tershy, B. Mate. 1998. Blue whale habitat and prey in the California Channel Islands. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 45(8-9): 1781-1801.
- Fiedler, P.C. 2002. The annual cycle and biological effects of the Costa Rica Dome. *Deep-Sea Research I* 49: 321–338.
- Fish, F.E. 2000. Biomechanics and Energetics in Aquatic and Semiaquatic Mammals: Platypus to Whale. *Physiological and Biochemical Zoology* 73(6): 683-698.
- Fish, F.E. & C.A. Hui. 2008. Dolphin swimming: A review. *Mammal Review* 21(4):181-195.
- Flores-Ramírez, S., J.R.Urbán, G. Villarreal-Chávez & R. Valles-Jiménez. 1996. Cambios espaciales y temporales de la estructura comunitaria de los cetáceos en Bahía de La Paz, B.C.S., México (1988-1991). *Ciencias Marinas* 22(2): 151-173.
- Forney, K.A. 2000. Environmental Models of Cetacean Abundance: Reducing Uncertainty in Population Trends. *Conservation Biology* 14(5):1271-1286.
- Forney, K.A. & J. Barlow. 1998. Seasonal patterns in the abundance and distribution of California cetaceans, 1991-1992. *Marine Mammal Science* 14(3): 460-489.

- Gendron, D. 1990. Relación entre la abundancia de eufáusidos y de ballenas azules (*Balaenoptera musculus*) en el Golfo de California. *Tesis de Maestría*. Instituto Politécnico Nacional – Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 85p.
- Gendron, D. 2002. Ecología poblacional de la ballena azul, *Balaenoptera musculus*, de la Península de Baja California. *Tesis de Doctorado*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, BC, México. 112p.
- Gendron, D., S. Aguñiga & J.D. Carriquiry. 2001. $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ in skin biopsy samples: a note on their applicability for examining the relative trophic level in three rorqual species. *Journal of Cetacean Research and Management* 41:44.
- Gendron, D. & J. Urban. 1993. Evidence of feeding by humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in the Baja California breeding ground, Mexico. *Marine Mammal Science* 9:76-81.
- Guerrero de la Rosa, F.J. 2008. Variación en la dieta de los cachalotes del Golfo de California con base en isótopos estables de carbono y nitrógeno. *Tesis de Maestría*. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas – Instituto Politécnico Nacional. La Paz, BCS, México. 84p.
- Guerrero-Ruiz, M., J. Urbán-Ramírez & R. Rojas-Bracho. 2006. Las Ballenas del Golfo de California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) - Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D.F. 524p.
- Hammann, M.G, T.R. Baumgartner & A. Badan-Dangon. 1988. Coupling of the pacific sardine (*Sardinops sagax caeruleus*) life cycle with the Gulf of California pelagic environment. *CalCOFI Report XXIX*: 102-109.
- Hedley, S. & S.T. Buckland. 2004. Spatial models for line transect sampling. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 9: 181-99.
- Hind, A.T. & S.C. Gurney. 1997. The metabolic cost of swimming in marine homeotherms. *The Journal of Experimental Biology* 200: 531-542.
- Holt, R.S & J. Cologne. 1987. Factors affecting line transect estimates of dolphin school density. *The Journal of Wildlife Management* 51(4): 836-843.

- Honjo, S. 1997. The rain of ocean particles and Earth's carbon cycle. *Oceanus* 40(2): 4-7.
- Jaquet, N. & D. Gendron. 2002. Distribution and relative abundance of sperm whales in relation to key environmental features, squid landings and the distribution of other cetacean species in the Gulf of California, Mexico. *Marine Biology* 141: 591–601
- Jaramillo-Legorreta, A.M., L. Rojas-Bracho & T. Gerrodette. 1999. A new abundance estimate for vaquitas: First step for recovery. *Marine Mammal Science* 15(4):957-973.
- Jaume-Schinkel, M.S. 2004. Hábitos alimentarios del rorcual común *Balaenoptera physalus* en el Golfo de California mediante el uso de isótopos estables de nitrógeno y carbono. *Tesis de Maestría*. Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 78p.
- Jefferson, T.A., S. Leatherwood & M.A. Webber. 1993. *Marine mammals of the world. FAO species identification guide*. FAO, Rome. 320pp.
- Jeffrey, S.W. & G.P. Humphrey. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, and *c1* and *c2* in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemical Physiology Pflanz* 167: 191-194.
- Jiménez-Illescas, A.R, M. Obeso-Nieblas & M.A. Alatorre-Mendieta. 1994. Hidrología de la Bahía de La Paz. *Oceanología. Unidad de Educación en Ciencia y Tecnología de Mar* 1:115-131.
- Kinzey, D. & T. Gerrodette. 2001. Conversion factors for binocular reticles. *Marine Mammal Science* 17(2): 353-361.
- Kjørboe, T. 2003. High turnover rates of copepod fecal pellets due to *Noctiluca scintillans* grazing. *Marine Ecology Progress Series* 258: 181-188.
- Ladrón de Guevara, P., B.E. Lavaniegos & G. Heckel. 2008. Fin whales (*Balaenoptera physalus*) foraging on daytime surface swarms of the euphausiid *Nyctiphanes simplex* in Ballenas Channel, Gulf of California, Mexico. *Journal of Mammalogy* 89(3):559–566.

- Lavín, M.F. & S.G. Marinone. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California *En: O.U. Velasco-Fuentes et al. (eds.) Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. p. 173-204.
- Lerczak, J.A. & R.C. Hobbs. 1998. Calculating sighting distances from angular readings during shipboard, aerial, and shore-based marine mammal surveys. *Marine Mammal Science* 14(3):590-599.
- Le Quére, C., S.P. Harrison, I.C. Prentice, E.T. Buitenhuis, O. Aumont, L. Bopp, H. Claustre, L. Cotrim da Cunha, R. Geider, X. Giraud, C. Klaas, K.E. Kohfeld, L. Legendre, M. Manizza, T. Platt, R. B. Rivkin, S. Sathyendranath, J. Uitz, A.J. Watson & D. Wolf-Gladrow. 2005. Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models. *Global Change Biology* 1:2016-2040.
- Littaye, A, A. Gannier, S. Laran & J.P.F. Wilson. 2004. The relationship between summer aggregation of fin whales and satellite-derived environmental conditions in the northwestern Mediterranean Sea. *Remote Sensing of Environment* 90: 44–52.
- Lluch-Cota, S.E., E.A. Aragón-Noriega, F. Arreguín-Sánchez, D. Auriol-Gamboa, J.J. Bautista-Romero, R.C. Brusca, R. Cervantes-Duarte, R. Cortés-Altamirano, P. Del-Monte-Luna, A. Esquivel-Herrera, G. Fernández, M.E. Hendrickx, S. Hernández-Vázquez, H. Herrera-Cervantes, M. Kahru, M. Lavín, D. Lluch-Belda, D.B. Lluch-Cota, J. López-Martínez, S.G. Marinone, M.O. Nevárez-Martínez, S. Ortega-García, E. Palacios-Castro, A. Parés-Sierra, G. Ponce-Díaz, M. Ramírez-Rodríguez, C.A. Salinas-Zavala, R.A. Schwartzlose & A.P. Sierra-Beltrán. 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography* 73(1):1-26.
- Longhurst, A. 1967. Diversity and trophic structure of zooplankton communities in the California Current. *Deep-Sea Research* 14: 393-08.
- Manasrah R., M. Raheed & M.I. Badran. 2006. Relationships between water temperature, nutrients and dissolved oxygen in the Northern Gulf of Aqaba, Red Sea. *Oceanologia* 48(2):237-253.

- Marcín-Medina, R. 1997. Comportamiento del tursi3n (*Tursiops truncatus* Montagu, 1821) en la Ensenada de La Paz, Baja California Sur, M3xico. *Tesis de Maestría*. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas – Instituto Politécnico Nacional. La Paz, BCS, M3xico. 79p.
- Marinone, S.G. 2003. A three dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 108(C10): 3325.
- Marinone, S.G., A. Par3s-Sierra, R. Castro & A. Mascarenhas. 2004. Correction to “Temporal and Spatial variation of the surface winds in the Gulf of California”. *Geophysical Research Letters* 31(L10305).
- Mascarenhas Jr., A.S., R. Castro, C.A. Collins & R. Durazo. 2004. Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research* 109(7).
- Mendes, S., W. Turrell, T. Lütkebohle & P. Thompson. 2002. Influence of the tidal cycle and a tidal intrusion front on the spatio-temporal distribution of coastal bottlenose dolphins. *Marine Ecology Progress Series* 239: 221–229.
- Mercuri, M. 2007. Varamiento de mamíferos marinos en Isla Magdalena, B.C.S., M3xico y su relación con factores físicos y biológicos. *Tesis de Maestría*. Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, M3xico. 125p.
- Meynier, L., A. Stockin, M.K.H. Bando & P.J. Duignan. 2008. Stomach contents of common dolphin (*Delphinus* sp.) from New Zealand Waters. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 42: 257-268.
- Monreal-G3mez, M.A., A. Molina-Cruz, D.A. Salas-de-Le3n. 2001. Water masses and cyclonic circulation in Bay of La Paz, Gulf of California, during June 1998. *Journal of Marine Systems* 30: 305-315.
- Moore, S.E. 2008. Marine mammals as ecosystem sentinels. *Journal of Mammalogy* 89(3): 534–540.

- Morales, E., M. Cisneros, M. Nevárez & A. Hernández. 2001. Review of stock assessment and fishery biology of *Dosidicus gigas* in the Gulf of California, Mexico. *Fisheries Research* 54: 83-94.
- Nigmatullin, CH.M, K.N. Nesis & A.I. Arkhipkin. 2001. A review of the biology of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae). *Fisheries Research* 54: 9-19.
- Noren, D.P., T.M. Williams, P. Berry & E. Butler. 1999. Thermoregulation during swimming and diving in bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*. *Journal of Comparative Physiology* 169: 93-99.
- Obeso-Nieblas, M., B. Shirasago-Germán, J. Gaviño-Rodríguez, E. Perez-Lezama, H. Obeso-Huerta & Á. Jiménez-Illescas. 2008. Variabilidad hidográfica en Bahía de La Paz, Golfo de California, México (1995-2005). *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 43(3): 559-567.
- Okamura, H., S. Minamikawa & T. Kitakado. 2006. Effect of surfacing patterns on abundance estimates of long-diving animals. *Fisheries Science* 72: 631–638.
- O'Reilly, J.E., S. Maritorena, D.A. Siegel, M.C. O'Brien, D. Toole, B.G. Mitchell, M. Kahru, F.P. Chavez, P. Strutton, G.F. Cota, S.B. Hooker, C.R. McClain, K.L. Carder, F. Müller-Karger, L. Harding, A. Magnuson, D. Phinney, G.F. Moore, J. Aiken, K.R. Arrigo, R. Letelier & M. Culver (2000) Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. *En: S.B. Hooker & E.R. Firestone (eds.) SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum. 11: 9-27.*
- Ortega-Ortiz, J.G. 2002. Multiscale analyses of cetacean distribution in the Gulf of Mexico. *Tesis de Doctorado*. Texas A&M University, EUA. 186p.
- Palacios, D.M. 2003. Oceanographic conditions around the Galápagos Archipiélago and their influence on cetacean community. *Tesis de Doctorado*. Oregon State University, EUA. 200p.
- Palacios-Hernández, E., Beier, E., Lavín, M.F. & P. Ripa. 2002. The Effect of the seasonal variation of stratification on the circulation of the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* 32(3): 705–728.

- Panigada, S., M. Zanardelli, M. MacKenzie, C. Donovan, F. Mélin & P.S. Hammond. 2008. Modelling habitat preferences for fin whales and striped dolphins in the Pelagos Sanctuary (Western Mediterranean Sea) with physiographic and remote sensing variables. *Remote Sensing of Environment* 112: 3400–3412.
- Parés-Sierra, A., A. Mascarenhas, S.G. Marinone & R. Castro. 2003. Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters* 30(6): 1-4.
- Pauly, D., A.W. Trites, E. Capuli & V. Christensen. 1998. Diet composition and trophic levels of marine mammals. *ICES Journal of Marine Science* 55: 467-481.
- Pegau, E.S., E. Boss & A. Martínez. 2002. Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters* 29.
- Pickard, G.L. & W.J. Emery. 1982. Descriptive physical oceanography. 4ta Ed. Pergamon Press, Oxford.
- Platt, T., S. Sathyendranath, A.M. Edwards, D.S. Broomhead & O. Ulloa. 2003. Nitrate supply and demand in the mixed layer of the ocean. *Marine Ecology Progress Series* 254: 3-9.
- Polovina, J.J., E. Howell, D.R. Kobayashi & M.P. Seki. 2001. The transition zone chlorophyll front, a dynamic global feature defining migration and forage habitat for marine resources. *Progress in Oceanography* 49(1-4):469-483.
- Polovina, J.J., P. Kleiber & D.R. Kobayashi. 1999. Application of TOPEX-POSEIDON satellite altimetry to simulate transport dynamics of larvae of spiny lobster, *Panulirus marginatus*, in the Northwestern Hawaiian Islands, 1993-1996. *Fishery Bulletin* 97(1): 132-143.
- Poore, R.Z., M.J. Pavich & H.D. Grissino-Mayer. 2005. Record of the North American southwest monsoon from Gulf of Mexico sediment cores. *Geology* 33(3): 209-212.
- Praca, E. & A. Gannier. 2008. Ecological niches of three teuthophageous odontocetes in the northwestern Mediterranean Sea. *Ocean Science* 4: 49–59.

- Pusineri, C., V. Magnin, L. Meynier, J. Spitz, S. Hassani & V. Ridoux. 2007. Food and feeding ecology of the common Dolphin (*Delphinus delphis*) in the oceanic northeast Atlantic and comparison with its diet in neritic areas. *Marine Mammal Science* 23: 30-47.
- Ragueneau, O., P. Treguer, A. Leynaert, R.F. Anderson, M.A. Brzezinski, D.J. DeMaster, R.C. Dugdale, J. Dymond, G. Fischer, R. Francois, C. Heinze, E. Maier-Reimer, V. Martin-Jezequel, D.M. Nelson & B. Queguiner. 2000. A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity Proxy. *Global and Planetary Change* 26: 317-365.
- Rasmussen, K., D.M. Palacios, J. Calambokidis, M.T. Saborío, L. Dalla-Rosa, E.R. Secchi, G.H. Steiger, J.M. Allen & G.S. Stone. 2007. Southern Hemisphere humpback whales wintering off Central America: insights from water temperature into the longest mammalian migration. *Biology Letters: Marine Biology* 67: 1-4.
- Reeves, R.R., B.S. Stewart, P.J. Clapham & J.A. Powell. 2002. *Guide to marine mammals of the world*. National Audubon Society, Nueva York. 528pp.
- Reilly, S.B. 1990. Seasonal changes in distribution and habitat differences among dolphins in the eastern tropical Pacific. *Marine Ecology Progress Series* 66: 1-11.
- Rhee, G.Y. & I.J. Gotham. 1981. The effect of environmental factors on phytoplankton growth: Temperature and the interactions of temperature with nutrient limitation. *Limnology and Oceanography* 26(4):635-648.
- Romero-Ibarra, N. 2005. Primeras observaciones de la naturaleza de partículas en sedimentación en el Golfo de San Lorenzo (Canadá). *Tesis de Doctorado*. Instituto Politécnico Nacional – Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 131p.
- Romero-Ibarra, N., N. Silverberg & F. Aguirre-Bahena. 2008. *Seguimiento de la comunidad zooplanctónica en Bahía de La Paz a través del flujo de sus pelotillas fecales*. En Memorias, Congreso Mexicano de Ecología, 16-21 de Noviembre, Mérida, México.

- Rosas-Luis, R., C.A. Salinas-Zavala, V. Koch, P. Del Monte Luna & M.V. Morales-Zárate. 2008. Importance of jumbo squid *Dosidicus gigas* (Orbigny, 1835) in the pelagic ecosystem of the central Gulf of California. *Ecological Modelling* 218: 149-161.
- Roy, S., N. Silverberg, N. Romero, D. Deibel, B. Klein, C. Savenkoff, A. Vézina, J.É. Tremblay, L. Legendre & R.B. Rivkin. 2000. Importance of mesozooplankton feeding for the downward flux of biogenic carbon in the Gulf of St. Lawrence (Canada). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 47(3-4): 519-544.
- Ruiz-Cooley, R.I., D. Gendron, S. Aguñiga, S. Mesnick & J.D. Carriquiry. 2004. Trophic relationships between sperm whales and jumbo squid using stable isotopes of C and N. *Marine Ecology Progress Series* 277: 275-283.
- Salinas-Zacarías, M. 2005. Ecología de los tursiones, *Tursiops truncatus*, en la Bahía de La Paz, B. C. S., México. *Tesis de Maestría*. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 102p.
- Salvadeo, C.J. 2008. Análisis de la comunidad de odontocetos y la relación con su ambiente, en el extremo sur-occidental del Golfo de California, México (2003-2006). *Tesis de Maestría*. Instituto Politécnico Nacional – Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 75p.
- Salvadeo, C.J., S. Flores-Ramírez, A. Gómez-Gallardo, S. Jaume-Schnkel, D. Lluch-Belda & J. Urbán. 2007. The Bryde's whale (*Balaenoptera edeni*) in La Paz Bay, Mexico and its relationship with climatic changes and prey availability *En*: 1st. GOLBEC Clitop Symposium: "Climate impacts on oceanic top predators". 3-7 de Diciembre, La Paz, México. p62 en el libro de resúmenes.
- Sánchez-Velasco, L., E. Beier, C. Avalos-García & M.F. Lavín. 2006. Larval fish assemblages and geostrophic circulation in Bahía de La Paz and the surrounding southwestern region of the Gulf of California. *Journal of Plankton Research* 28(11): 1-18.

- Sandwell, D.T. & W.H.F. Smith. 2009. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. *Journal Of Geophysical Research* 114:B01411. DOI:10.1029/2008JB006008.
- Santos, M.B., G.J. Pierce, A. López, R.J. Reid, V. Ridoux & E. Mente. 2006. Pygmy Sperm whales *Kogia breviceps* in the Northeast Atlantic: New information on stomach contents and strandings. *Marine Mammal Science* 22(3): 600-616.
- Seki, M.P., J.J. Polovina, R.E. Brainard, R.R. Bidigare, C.L. Leonard & D.G. Foley. 2001. Biological enhancement at cyclonic eddies tracked with GOES thermal imagery in Hawaiian Waters. *Geophysical Research Letters* 28(8): 1583-1586.
- Silverberg, N., F. Aguirre, S. Aguiñiga & N. Romero. 2006. Flujo vertical de materia particulada en la Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, durante 2002. *Ciencias Marinas* 32(1A):73–82.
- Smith, S.D. 1988. Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *Journal of Geophysical Research* 93(C12):15467-15472.
- Springer, A.M., J.F. Piatt, V.P. Shuntov, G.B. Van Vliet, V.L. Vladimirov, A.E. Kuzin & A.S. Perlov. 1999. Marine birds and mammals of the Pacific Subarctic Gyres. *Progress in Oceanography* 43: 443–487.
- Staaf, D.J., S. Camarillo-Coop, S.H.D. Haddock, A.C. Nyack, J. Payne, C.A. Salinas-Zavala, B.A. Seibel, L. Trueblood, C. Widmer & W.F. Gilly. 2008. Natural egg mass deposition by the Humboldt squid (*Dosidicus gigas*) in the Gulf of California and characteristics of hatchlings and paralarvae. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 88(4): 759-770.
- Strickland, J.D. & T. Parsons. 1972. *A practical Handbook of Seawater Analysis*. Fisheries Research Board of Canada. 2da Ed. Ottawa. 310 pp.
- Tershy, B.R., D. Breese & C.S. Strong. 1991. Abundance, seasonal distribution and populations composition of balaenopterid whales in the Canal de Ballenas, Gulf of California, Mexico. *Report of the International Whaling Commission*. Special Issue 2: 369-375

- Tershy, B.R., D. Breese & S. Álvarez-Borrego. 1991. Increase in cetacean and seabird numbers in the Canal de Ballenas during na El Niño-Southern Oscillation event. *Marine Ecology Progress Series* 69: 299-302.
- Tershy B.R., J. Urbán, D. Breese, L. Rojas & L.T. Findley. 1993. Are fin whale resident to the Gulf of California?. *Revista de Investigación Científica de la Universidad Autónoma de Baja California Sur* 1:69–72.
- Thomas, L., J.L. Laake, S. Strindberg, F.F.C. Marques, S.T. Buckland, D.L. Borchers, D.R. Anderson, K.P. Burnham, S.L. Hedley, J.H. Pollard, J.R.B. Bishop & T.A. Marques. 2006. *Distance 5.0. Release 1*. Research Unit for Wildlife Population Assessment, University of St. Andrews, UK.
- Thomas L., S.T. Buckland, K.P. Burnham, D.R. Anderson, J.L. Laake, D.L. Borchers & S. Strindberg. 2002. Distance sampling. *Encyclopedia of Environmetrics* 1:544-552. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Thomas, L. & D. Sandilands. 2007. Designing line transect surveys for complex survey regions. *Journal of Cetacean Research and Management* 9(1):1-13.
- Tremblay, N. 2008. Variación estacional de los indicadores de estrés oxidativo asociada a la migración vertical de los eufáusidos subtropicales del Golfo de California. *Tesis de Maestría*. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas – Instituto Politécnico Nacional. La Paz, BCS, México. 147p.
- Turner, T.J. 2002. Zooplankton fecal pellets, marine snow and sinking phytoplankton blooms. *Aquatic Microbiology Ecology* 27: 57-102
- Tynan, C.T., D.G. Ainley, J.A. Barth, T.J. Cowles, S.D. Pierce & L.B. Spear. 2005. Cetacean distributions relative to ocean processes in the northern California Current System. *Deep-Sea Research II* 52: 145–167.
- Urban-Ramírez, J., L. Rojas-Bracho, H. Pérez-Cortes, A. Gómez-Guallardo, S. Swartz & R.L. Brownell. 2002. A review of gray whales in their wintering grounds in Mexican waters. *Report to the International Whaling Commission* SC/54/BRG1.

- Valdez-Holguín, J., S. Álvarez-Borrego & C.C. Trees. 1999. Caracterización estacional y espacial de los parámetros fotosintéticos del fitoplancton del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 25(4): 445-467
- Verdugo-Díaz, G. 2004. Respuesta ecofisiológica del fitoplancton ante la variabilidad ambiental en una bahía subtropical de Baja California Sur, México. *Tesis de Doctorado*. Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, BCS, México. 138p.
- Viitasalo, M., M. Rosenberg, A. Heiskanen & M. Koski. 1999. Sedimentation of copepod fecal material in the coastal northern Baltic Sea: Where did all the pellets go?. *Limnology and Oceanography* 44(6): 1388-1399.
- Whitehead, H., B. McGill & B. Worm. 2008. Diversity of deep-water cetaceans in relation to temperature: implications for ocean warming. *Ecology Letters* 11: 1198-1207
- Williams, R.G. & M.J. Follows. 2003. Physical Transport of Nutrients and the Maintenance of Biological Production *En*: M. Fasham (ed). *Ocean Biogeochemistry: The role of the ocean carbon cycle in global change*. Berlin Heidelberg New York, Springer.
- Williams, T.M. 1999. The evolution of cost efficient swimming in marine mammals: limits to energetic optimization. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 354: 193-201.
- Williams, T.M., D. Noren, P. Berry, J.A. Estes, C. Allison & J. Kirtland. 1999. The diving physiology of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). III. Thermoregulation at depth. *The Journal of Experimental Biology* 202: 2763–2769.

ANEXO II

Ecuaciones para el cálculo de la distancia curvilínea (r). Tomadas de Jaramillo *et al.* (1999)

Los siguientes términos y ecuaciones se esquematizan en las Figuras Ai y Aii:

θ = Ángulo que forman los binoculares al alinear la retícula 0 con el horizonte. También, ángulo análogo formado entre el radio terrestre (rt) y la línea (y).

t = línea tangente a la superficie terrestre.

rt = radio terrestre = 6'370.000 m

Entonces, t : $y = a - bx$ [A1]

$$a = rt + h$$

rt : $y = b_{rt} \cdot x$

$$b_{rt} = -\frac{1}{b} = \frac{1}{b}$$

$$y = \frac{1}{b}x \quad [A2]$$

Despejando b en A1 y A2:

$$\frac{x}{y} = -\frac{y-a}{x}$$

$$x^2 = ay - y^2 \quad [A3]$$

Superficie terrestre:

$$x^2 + y^2 = rt^2 \quad [A4]$$

Sustituyendo por A3:

$$ay - y^2 + y^2 = rt^2$$

$$ay = (rt + h)y = rt^2$$

La recta y :

$$y = \frac{rt^2}{rt+h}$$

El ángulo θ :

$$\theta = \arccos\left(\frac{y}{rt}\right) = \arccos\left(\frac{\frac{rt^2}{rt+h}}{rt}\right) = \arccos\left(\frac{rt}{rt+h}\right)$$

Intersección entre la recta p y la superficie terrestre; punto (x, y) (Figura Aii):

$$b = \tan(\theta + \lambda) = \tan\left[\arccos\left(\frac{rt}{rt+h}\right) + (ret \cdot angret)\right]$$

El punto x de la intersección:

$$rt^2 - x^2 = (a - bx)^2 = a^2 - 2abx + b^2x^2$$

$$(1 + b^2)x^2 - (2ab)x + (a^2 - rt^2) = 0$$

Sustituyendo:

$$A = 1 + b^2$$

$$B = -2 \cdot (rt + h) \cdot b$$

$$C = (rt + h)^2 - rt^2$$

El punto x de la intersección:

$$x_{\text{inf}} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

La distancia curvilínea dc entre el barco y el grupo avistado:

$$r = \arcsen\left(\frac{x_{\text{inf}}}{rt}\right) \cdot rt$$

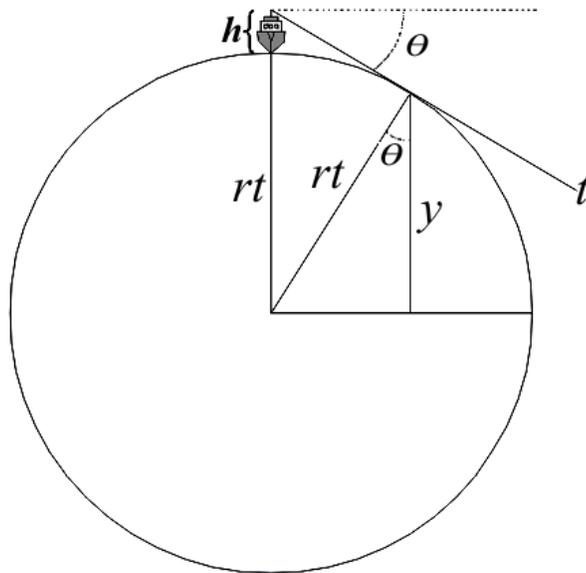


Figura All. Esquema de las principales distancias, líneas y ángulos usados para el cálculo de r .

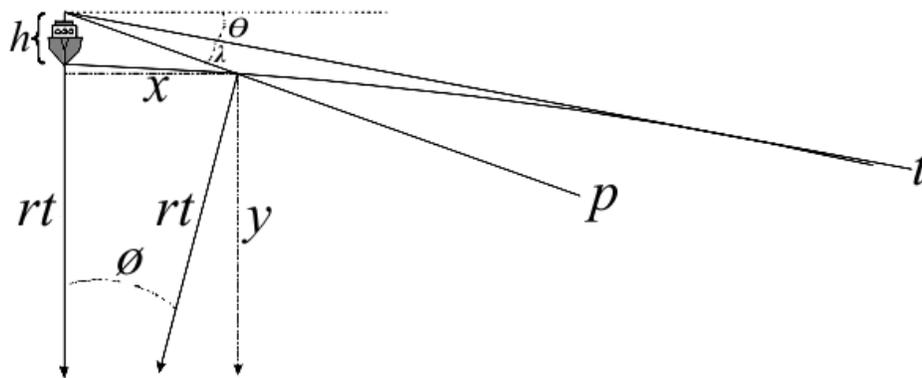


Figura All.ii. Detalle de All. mostrando nuevos parámetros.